



UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

**FORMAS DE ALUMÍNIO, DE FÓSFORO E
FOSFATASE ÁCIDA EM SOLOS DE VÁRZEA
CULTIVADOS COM FEIJOEIRO:
INFLUÊNCIA DE CALAGEM E FÓSFORO**

LUIZ ARNALDO FERNANDES

1999

LUIZ ARNALDO FERNANDES

**FORMAS DE ALUMÍNIO, DE FÓSFORO E
FOSFATASE ÁCIDA EM SOLOS DE VÁRZEA
CULTIVADOS COM FEIJOEIRO: INFLUÊNCIA DE
CALAGEM E FÓSFORO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Doutor".

Orientador

Prof. Valdemar Faquin

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
1999**

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

Fernandes, Luiz Arnaldo

Formas de alumínio, de fósforo e fosfatase ácida em solos de várzea cultivados com feijoeiro: influência de calagem e fósforo / Luiz Arnaldo Fernandes. -- Lavras : UFLA, 1999.

111 p. : il.

Orientador: Valdemar Faquin.

Tese (Doutorado) -- UFLA.

Bibliografia.

1. Fósforo. 2. Fracionamento. 3. Alumínio. 4. Fosfatase. 5. Calagem. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.41

-631.81

LUIZ ARNALDO FERNANDES

**FORMAS DE ALUMÍNIO, DE FÓSFORO E FOSFATASE ÁCIDA
EM SOLOS DE VÁRZEA CULTIVADOS COM FELJOEIRO:
INFLUÊNCIA DE CALAGEM E FÓSFORO
FELJOEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Curso de Pós-
graduação em Agronomia, área de concentração em
Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título
de "Doutor".

APROVADA em 19 de novembro de 1999.

Prof. Antonio E. Furtini Neto UFLA

Prof. José Maria de Lima UFLA

Prof. Nilton Curi UFLA

Prof. Jaime W. Vargas Mello UFV



Prof. Valdemar Faquin

UFLA

(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus, por sempre estar presente,

DEDICO

*Aos meus pais, Aparecido e Cleuza, pelo exemplo de vida, e especialmente a
minha esposa, Luciana, pelo amor, carinho e companheirismo,*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela oportunidade, concessão da bolsa de estudos e apoio financeiro.

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

Aos professores Antonio Eduardo Furtini Neto, Custódio Donizete dos Santos e Nilton Curi pela coorientação, sugestões e amizade.

Aos professores José Maria de Lima e Jaime. W. Vargas de Mello pelas valiosas sugestões apresentadas.

Aos bolsistas de iniciação científica Alex Teixeira Andrade, Antonio Claret de Oliveira Junior, Edmar Fernando Corte, Kelvin Shin-Iti Kabeya e Silvino Guimarães Moreira pela dedicação e auxílio na condução e avaliação do experimento.

Aos professores Max Leandro Naves Silva e João Batista Corrêa e ao pesquisador Paulo Emilio Ferreira da Motta pelo auxílio nas análises laboratoriais e amizade.

Ao professor Rui Carvalho, pela amizade, críticas, sugestões e companheirismo.

Aos colegas Marcelo, Watson, Júlio Bertoni, Júlio da Nóbrega, Eduardo, Geraldo, Antônio, Adriana, Paula, Eliane, Flávia, Isabela, Isabel, Ana Rosa, Fábio, Paulo, Rogério, Marco Aurélio, Marcos Kondo, Euclides, Cristiane, Irvina, Carlos Alberto e Alvaro pela amizade e agradável convívio.

Aos professores, funcionários e alunos do Departamento de Ciência do Solo, e a todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

Página

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Formas de fósforo e atividade da fosfatase ácida na planta	2
2.2 Acidez e alumínio em solos de várzea	4
2.3 Fósforo em solos de várzea	6
2.4 Extratores de fósforo do solo	8
2.5 Fosfatase ácida no solo	10
3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
CAPÍTULO 2: Frações de fósforo e atividade da fosfatase ácida em pantas de feijoeiro culticadas em solos de várzea	19
RESUMO	19
ABSTRACT	20
1 INTRODUÇÃO	21
2 MATERIAL E MÉTODOS	22
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
3.1 Produção de matéria seca de grãos	27
3.2 Concentração e níveis críticos de fósforo total	30
3.3 Concentrações e níveis críticos de fósforo total solúvel em ácido, orgânico e inorgânico solúveis em ácido	36

3.4 Atividade da fosfatase ácida	41
4 CONCLUSÕES	44
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
CAPÍTULO 3: Formas de alumínio, de fósforo e fosfatase ácida em solos de várzea cultivados com feijoeiro.	49
RESUMO	49
ABSTRACT	50
1 INTRODUÇÃO	51
2 MATERIAL E MÉTODOS	53
2.1 Determinações analíticas	53
2.1.1 Carbono orgânico do solo e pH em água	53
2.1.2 Formas de alumínio do solo	54
2.1.3 Fracionamento de fósforo no solo	54
2.1.4 Fosforo pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1, Resina e Olsen	55
2.1.5 Atividade da fosfatase ácida do solo	55
2.2 Avaliação do experimento	56
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
3.1 Formas de alumínio no solo	56
3.2 Formas de fósforo no solo	69
3.3 Extratores de fósforo do solo	81
3.4 Atividade da fosfatase ácida no solo	88
4 CONCLUSÕES	93
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXO	103

RESUMO

FERNANDES, Luiz Arnaldo. Formas de alumínio, de fósforo e fosfatase ácida em solos de várzea cultivados com feijoeiro: influência de calagem e fósforo. Lavras: UFLA, 1999. 111p. (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)¹.

Conduziu-se um experimento em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, com os seguintes objetivos: verificar a influência dos atributos de quatro solos de várzea sobre a distribuição de algumas frações de fósforo nas folhas de feijoeiro e determinar suas respectivas concentrações críticas e a relação dessas frações com a atividade da fosfatase ácida foliar; verificar a influência da aplicação de calcário e de fósforo em algumas formas de Al e de P e na atividade da fosfatase ácida em quatro solos de várzea e; estimar a capacidade de diferentes extratores de fósforo em prever a disponibilidade desse nutriente para o feijoeiro. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4x5x2 com quatro repetições, sendo quatro solos [Glei Húmico (GH), Glei Pouco Húmico (GP), Aluvial (A) e Orgânico (O)], cinco doses de P (75, 150, 300, 500 e 800 mg dm⁻³ de P) e dois níveis de calagem (sem e com). Em vasos de três dm⁻³, cultivaram-se três plantas, sendo uma colhida no florescimento, na qual avaliaram-se as concentrações de P total (Pt), P total solúvel em ácido (Pts), P orgânico (Po) e P inorgânico solúvel em ácido (Pi), nas demais, colhidas no final do ciclo, a produção de grãos. Os níveis críticos das frações de fósforo nas folhas de feijoeiro foram influenciados pelos atributos do solo que refletem a poder tampão de P e não apresentaram relação com atividade da fosfatase ácida foliar. A aplicação de calcário e as doses crescentes de P alteram as formas de Al e de P e, a atividade da fosfatase ácida dos solos de várzea. Os extratores Resina e Olsen recuperaram preferencialmente as formas de P lábeis, sendo eficientes em prever a disponibilidade de fósforo para as plantas de feijoeiro, na presença de calagem.

¹Comitê Orientador: Valdemar Faquin - UFLA (Orientador), Antonio E. Furtini Neto - UFLA, Nilton Curi - UFLA e Custódio D. dos Santos - UFLA.

ABSTRACT

FERNANDES, Luis Arnaldo. Forms of aluminum, phosphorus and acid phosphatase in lowland soils cultivated with bean plant: influence of liming and phosphorus. Lavras: UFLA, 1999. 111p. (Thesis - Doctorate in Soil and Plant Nutrition)¹.

An experiment was conducted in greenhouse of the Soil Science Department of the Universidade Federal de Lavras, with the following objectives: To verify the influences of the features of four lowland soils upon the distribution of some fractions of phosphorus in the plant leaves and determinate its respective critical concentrations and the relationship of these fractions with leaf acid phosphatase activity, verify the influence of the application of limestone and phosphorus on some forms of Al and P and acid phosphatase activity in four lowland soils and estimate the capacity of different phosphorus extractors in estimating the availability of that nutrient for the bean plant. The experimental design was the completely randomized, in 4x5x2 factorial scheme with four replications, being four soils [Humic gley (GP), Low Humic Gley (GP), Aluvial (A) and Bog Soil (O)], five doses of P (75, 150, 300, 500 and 800 mg dm⁻³ of P) and two levels of liming (without and with). In dm⁻³ pots, three plants were grown, one being harvested at flowering, in which the concentrations of total P (Pt), acid soluble total P (Pts), organic P (Po) and acid soluble inorganic P (Pi) were evaluated, in the others, harvested at the end of the cycle, grain yield. The critical levels of the fractions of phosphorus in the bean plant leaves were influenced by the features of the soil which reflect the phosphorus buffer power and they did not present any relationship with leaf acid phosphatase activity. Application of limestone and the growing doses of P changed the forms of Al and P and the acid phosphatase activity of the lowland soils. The extractors Resina and Olsen recovered preferentially the labile forms of P, their being efficient in estimating the availability of phosphorus for bean plants in the presence of liming.

¹Guidance Committee: Valdemar Faquin -UFLA (adviser), Antonio E. Furtini Neto - UFLA, Nilton Curi - UFLA and Custódio D. dos Santos - UFLA.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, existem cerca de 30 milhões de hectares de várzeas irrigáveis sem aproveitamento racional. Desde total, 1,5 milhões encontram-se no estado de Minas Gerais, sendo 200.000 hectares localizados no sul do estado. Devido a sua localização topográfica favorável à mecanização e disponibilidade de água, as várzeas apresentam-se, na sua maioria, como potencialmente aptas de serem incorporadas como novas áreas produtivas.

O aproveitamento das várzeas tem sido limitado quase exclusivamente ao cultivo do arroz irrigado por inundação contínua no período chuvoso. No período da seca, espécies como o feijoeiro podem ser cultivadas, maximizando a exploração dessas áreas. No entanto, na maioria dos casos, essa possibilidade é descartada pelos agricultores em decorrência de insucessos obtidos por falta de informações sobre o manejo da fertilidade dos solos de várzea, quando cultivados com culturas de sequeiro, uma vez que as recomendações de calagem e as tabelas de adubação não contemplam esses solos, que passam certo período do ano inundados. O que ocorre é uma extrapolação dos conhecimentos que se têm para os solos de terras altas, nem sempre com sucesso.

Como a maior parte dos solos brasileiros, os solos de várzea têm problemas relativos à fertilidade do solo, e para serem racionalmente explorados, devem ser conhecidos seus problemas, bem como avaliada sua capacidade de suprir nutrientes para as plantas.

Em trabalho conduzido no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, por Andrade (1997), utilizando a técnica do elemento faltante, verificou-se, em quatro classes de solo predominantes nas várzeas do Sul de Minas Gerais, elevada toxidez por alumínio e deficiências

severas de fósforo, potássio, nitrogênio e boro para o feijoeiro. Após esse trabalho, vários outros foram conduzidos com o objetivo de avaliar a resposta do feijoeiro a doses de calcário (Faquin et al., 1998), boro (Mariano, 1998), potássio (Villa, 1999) e nitrogênio (Corrêa, 1999).

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivos: verificar a influência dos atributos de quatro solos de várzea sobre a distribuição de algumas frações de fósforo nas folhas de feijoeiro e determinar suas respectivas concentrações críticas e a relação dessas frações com a atividade da fosfatase ácida foliar; e verificar a influência da aplicação de calcário e de fósforo em algumas formas de alumínio e de fósforo e na atividade da fosfatase ácida em quatro solos de várzea e estimar a capacidade de diferentes extratores de fósforo em prever a disponibilidade desse nutriente para o feijoeiro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Formas de fósforo e atividade da fosfatase ácida na planta

Ao se avaliar a concentração total de fósforo em determinada planta, deve-se considerar que o valor da forma ativa de P encontrado pode estar superestimado em função da presença de formas de reserva, principalmente de P inorgânico, causada pela maior ou menor disponibilidade do nutriente no solo, processo este governado pela relação entre os fatores intensidade (I), quantidade (Q), capacidade tampão (Q/I) e difusão de P no solo.

A facilidade de absorção, pelas plantas, do P da solução que está em equilíbrio com a forma lábil é negativamente relacionada com a energia de ligação de P e com a capacidade tampão deste elemento no solo (Holford e Mattingly, 1979). Desse modo, em solos com maior capacidade tampão, há uma menor extração de P pelos vegetais (Muniz et al., 1985). Portanto, além da exigência metabólica peculiar de cada espécie ou cultivar, a concentração de P

na solução do solo próximo às raízes, que é função dos mecanismos que governam a disponibilidade de P no solo, é capaz de influenciar diretamente a absorção de P e seu acúmulo na parte aérea (Fabres et al., 1987).

Desse modo, para o estabelecimento dos processos metabólicos, é importante que se considere a alocação interna do nutriente e sua utilização no metabolismo e crescimento (Gerloff e Gabelman, 1983). As alterações na absorção de fósforo, em função da maior ou menor facilidade do solo em suprir o nutriente à planta, levariam a mudanças nas formas de reserva do P na planta. Em condições de maior disponibilidade do nutriente, ocorre seu acúmulo na forma inorgânica (Pi), compartimentalizado no vacúolo, ou via síntese de compostos de reserva como polifosfatos e ácido fítico. Esta fração de reserva (Pi) é mais sensível à disponibilidade do elemento no meio do que outras frações fosfatadas na planta (Bielecki, 1973).

O aumento da atividade da fosfatase ácida parece ser devido a um incremento na "síntese de novo" da enzima, cuja formação é inibida pelo íon fosfato por um mecanismo de retroinibição (Reid e Bielecki, 1970).

Em estudos de correlação, geralmente se relaciona a quantidade do nutriente disponível por determinado extrator com o conteúdo total do nutriente na planta. No entanto, devido às várias formas em que o nutriente pode se encontrar no tecido vegetal, o conteúdo nem sempre reflete o estado nutricional da planta.

Também a forma em que o nutriente se encontra no solo pode afetar a quantidade absorvida pelas plantas. Com o desenvolvimento do método do fracionamento de P, tornou-se possível o estudo das relações entre as formas de P do solo e o crescimento das plantas. Com a informação de qual forma de P do solo é preferencialmente absorvida pelas plantas, é possível selecionar o extrator que melhor reflete o comportamento da planta em determinado solo. Segundo Kamprath e Watson (1980), em solos ácidos ou neutros, o P ligado ao

alumínio é a principal fonte de P absorvida pelas plantas, juntamente com o P ligado a cálcio quando presente. Desse modo, métodos que extraem preferencialmente essas formas de P poderão dar uma boa estimativa do P disponível para as plantas em solos ácidos ou neutros.

Além das diferentes formas de fósforo, a determinação da atividade das fosfatases nos tecidos foliares tem sido sugerida como uma ferramenta de diagnose da deficiência de fósforo. Vários trabalhos mostram que o P presente nos tecidos vegetais, em diferentes espécies de plantas, altera o nível da fosfatase ácida, sendo que o aumento da atividade desta enzima tem sido verificado quando a planta encontra-se sob condições de deficiência de P (Garcia e Ascencio, 1992; Ascencio, 1994). Desse modo, a atividade da fosfatase ácida no tecido vegetal tem sido investigada como uma resposta da planta à deficiência de P (Duff, Sarath e Plaxton, 1994). Antibus e Lesica (1990) relataram que a atividade da fosfatase ácida correlacionou-se positivamente com o conteúdo de P vacuolar de epífitas. Silva e Basso (1993), em cana-de-açúcar, e Fernandes et al. (1998), em feijoeiro, verificaram correlação negativa entre atividade “in vivo” da fosfatase ácida com o crescimento e as quantidades de P acumuladas pelas plantas.

2.2. Acidez e alumínio em solos de várzea

Os solos inundados apresentam características bem diferentes daquelas dos solos bem drenados. A inundação provoca alterações em todos os processos químicos e biológicos que nele ocorrem, alterando, entre outros, a dinâmica de nutrientes.

De acordo com Ponnampertuma (1972), quando um solo ácido, sob condições aeróbicas,   inundado, seu pH decresce inicialmente durante os primeiros dias, aumentando posteriormente até atingir valores próximos à neutralidade poucas semanas após a inundação, devido à redução de compostos

que liberam OH⁻. Em solos alcalinos ocorre uma redução do seu pH com a inundação, devido ao aumento da pressão parcial de CO₂, que resulta em uma liberação de íons H⁺, também tendendo à neutralidade.

A recomendação de calagem para solos de várzea drenados tem sido baseada em dados obtidos em solos bem drenados, nem sempre com resultados satisfatórios. Estas recomendações podem sub ou superestimar a dose de calcário a ser aplicada, dependendo das características do solo (Miranda, 1993). A maioria dos solos Orgânicos possui acidez muito acentuada, observando-se geralmente teores elevados de alumínio trocável e, após a drenagem, a calagem tem sido uma prática indispensável para viabilizar o processo produtivo (Quaggio et al., 1987).

Os solos de várzea, assim como a maioria dos solos brasileiros, apresentam problemas relativos à fertilidade, principalmente quando cultivados em condições de sequeiro. Embora evidente o efeito da matéria orgânica do solo sobre o alumínio tóxico às plantas, alguns autores têm verificado efeito positivo da aplicação de calcário em solos de várzea, com elevados teores de matéria orgânica, quando são cultivados em condições de drenagem (Quaggio et al., 1987, Faquin et al, 1998). Corroborando esses autores, Pavan (1983) encontrou maiores teores de Al trocável em solos Orgânicos do que em solos minerais.

Os resultados contraditórios encontrados na literatura despertam o interesse pelo conhecimento das várias formas em que o Al se encontra no solo. Várias soluções extratoras têm sido utilizadas para quantificar as diferentes formas de Al. O cloreto de potássio 1 mol L⁻¹ é a solução mais utilizada para determinar os teores de Al trocável (Bertsh e Bloom, 1996). Segundo esses autores, o alumínio extraído pelo cloreto de potássio, além de representar um índice de toxicidade de Al às plantas, é utilizado também para o cálculo da capacidade de troca de cátions do solo e em alguns métodos de recomendação de calagem. As soluções de cloreto de lantânio 0,33 mol L⁻¹, de cloreto de cobre 0,5

mol L⁻¹ e de pirofosfato de sódio 0,025 mol L⁻¹, além de extraírem o Al trocável, extraem também o Al complexado por compostos orgânicos do solo (Shuman, 1990). A solução de oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ pH 3,0, além das formas de Al extraídas pelo pirofosfato de sódio, ainda remove o Al inorgânico amorfo (Wang McKeague e Kodama, 1986; Parfitt, 1989).

Embora reconhecida a importância da quantificação das formas de alumínio para o entendimento da dinâmica desse elemento no solo, não existe uma linha divisória clara entre as várias formas, sendo essas normalmente diferenciadas em função do método usado na determinação (Pionke e Corey, 1967).

2.3 Fósforo em solos de várzea

Na maioria dos solos dos trópicos úmidos, o P é considerado um dos nutrientes mais limitantes à produtividade dos agroecossistemas (Ae et al., 1990). O ciclo do P, diferentemente do ciclo do C, N e S, envolve reações de equilíbrio entre os constituintes orgânicos e inorgânicos do solo (Duxbury et al., 1989). O P lábil, que regula o nível de P da solução do solo, e que é absorvido pelas plantas, varia em função dos mecanismos físico-químicos e bioquímicos que ocorrem no solo, tais como a depleção de P pelas raízes das plantas, imobilização e mineralização das frações orgânicas e adsorção e dessorção das frações inorgânicas (Sayal e De Datta, 1991).

As condições criadas pela inundação do solo influenciam a transformação e a disponibilidade do P do solo, ocasionando aumento na disponibilidade, que é atribuída à redução do fosfato férrico a fosfato ferroso, hidrólise dos fosfatos e ânions orgânicos, deslocamento do fósforo dos fosfatos de ferro e alumínio por agentes quelantes, produzidos pela decomposição anaeróbica da matéria orgânica, liberação do fósforo da matéria orgânica,

liberação do fósforo nos solos calcários e remoção da capa de óxidos de ferro hidratados, que oclui os fosfatos pela redução do ferro (Ponnanperuma, 1972).

Além das formas inorgânicas, também o P orgânico apresenta, sob condições anaeróbicas, um comportamento diferente daquele verificado em condições aeróbicas. Dentro deste contexto, estudos desenvolvidos por Campbell e Racz (1975) demonstraram uma maior mineralização desta forma de P em solos sob inundação quando comparados a solos mantidos com o grau de umidade próximo à capacidade de campo.

Apesar do aumento na disponibilidade de P observada em solos inundados, segundo Brandon e Mikkelsen (1979), alguns autores têm demonstrado que esta situação se reverte com a drenagem posterior do solo, causando sérios problemas para as culturas subsequentes.

Assim, quando um solo sob inundação é drenado, ocorre a reoxidação dos constituintes reduzidos do solo com mudanças no Eh, pH e concentração de Fe^{+2} , diminuindo a solubilidade tanto do fósforo nativo do solo quanto do fósforo aplicado (Sayal e De Datta, 1991). Segundo Willett (1979), o decréscimo da disponibilidade de P no solo, com a drenagem de solos inundados, está associado ao aumento na adsorção de P (termo que inclui tanto a adsorção do P com a superfície de minerais quanto a precipitação desse elemento na forma de fosfatos de baixa solubilidade com outros elementos na solução do solo), ocasionado pelo aumento da atividade dos óxidos de ferro em adsorver fósforo. Desse modo, deficiência de fósforo tem sido verificada em culturas de sequeiro em rotação com o arroz sob inundação (Willett, 1979; Sah e Mikkelsen, 1986a, 1986b).

No estudo das transformações das formas de P no solo, o método de extração seqüencial, primeiramente proposto por Chang e Jackson (1957), tem sido utilizado visando conhecer a causa de deficiência desse elemento e prever a resposta das culturas à adubação fosfatada. Essa técnica de fracionamento

seqüencial tem sido amplamente utilizada nos estudos sobre o comportamento químico do P em diferentes solos e vem sofrendo uma série de adaptações. Hedley, Steward e Chauhan (1982) propuseram uma metodologia de fracionamento seqüencial do P no solo, onde as formas orgânicas e inorgânicas de P são separadas conforme sua disponibilidade para as plantas.

Embora a metodologia desenvolvida por Hedley, Steward e Chauhan (1992) venha sendo bastante utilizada nos últimos anos, Cross e Schlesinger (1995), em uma exaustiva revisão sobre o fracionamento de P proposto por estes autores, verificaram que a maioria dos trabalhos foi realizada em Mollisols, enquanto, em outros grupamentos de solo, principalmente Spodosols e Oxisols, existem poucos estudos. Para Histosols e Andisols, até aquela data, os trabalhos eram escassos (Cross e Schlesinger, 1995).

Uma outra aplicação do fracionamento de P é a de avaliar o relacionamento das formas do fracionamento com os teores obtidos por diversos extratores utilizados para estimar os teores de P disponível para as plantas. Assim sendo, o conhecimento do relacionamento do P disponível com as formas de P do solo permite identificar qual o extrator é mais adequado para uma determinada área (Barbosa Filho, Kinjo e Muraoka, 1987).

2.4 Extratores de fósforo do solo

Embora a disponibilidade de P para as plantas dependa dos fatores quantidade, intensidade, capacidade e difusão do P no solo, por motivos metodológicos, nos estudos de avaliação da disponibilidade de P para as plantas, o fator quantidade é o mais fácil de ser determinado. Segundo Thomas e Peaslee (1973), as características do solo determinam os compostos de P que constituirão seu fator quantidade, sendo basicamente compostos ligados a ferro, a alumínio e a cálcio, cujas quantidades e combinações dependem do material

de origem, do grau de intemperização do solo e das práticas de uso e manejo a longo prazo.

Os extratores ácidos, como o Mehlich-1, extraem preferencialmente fósforo ligado ao cálcio no solo e apenas pequena proporção ligado ao alumínio e ao ferro. A ação extratora do Mehlich 1, formada pela mistura de dois ácidos fortes diluídos (HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ e H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$), se dá pela ação ácida que promove a protonação do P, e pela troca aniônica em que os radicais cloreto e principalmente os sulfatos substituem os fosfatos ligados ao cálcio e, em menor proporção, os ligados ao alumínio e ao ferro. Os íons sulfato atuam reduzindo a reabsorção do P do solo durante o processo de extração (Mehlich, 1978).

O extrator Mehlich 3 (CH_3COOH $0,2 \text{ mol L}^{-1}$; NH_4NO_3 $0,25 \text{ mol L}^{-1}$; NH_4F $0,015 \text{ mol L}^{-1}$; HNO_3 $0,013 \text{ mol L}^{-1}$ e EDTA $0,001 \text{ mol L}^{-1}$) foi introduzido em 1984 para uso em solos ácidos (Mehlich, 1984). Os seus vários componentes químicos atuam especificamente sobre as formas de P do solo. O ácido acético atua na decomposição da apatita em menor grau do que os ácidos minerais equivalentes; o nitrato faz o papel do cloreto; o fluoreto tem o propósito de liberar ânions fosfato ligados ao alumínio; e o EDTA tem a finalidade de aumentar a extração de micronutrientes do solo, principalmente do cobre (Mehlich, 1984). O extrator Bray 1 (NH_4F $0,03 \text{ mol L}^{-1}$ e HCl $0,025 \text{ mol L}^{-1}$) tem sua ação parecida com o extrator Mehlich 3.

O extrator Olsen (NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ pH 8,5) baseia-se na extração do P ligado a Fe e Al em pH elevado. O íon HCO_3^- atua substituindo o P adsorvido no solo e reduzindo a atividade de Ca^{+2} em solução (Olsen et al., 1954).

Além dessas soluções, a extração de P do solo através da adsorção em resina de troca iônica foi proposta inicialmente por Amer et al. (1955). A resina é um produto comercializado em pequenas esferas de diâmetro de aproximadamente um milímetro ou menos. O material é poroso devido à

estrutura matricial das cadeias de poliestireno. Os grupos funcionais existentes nessas cadeias são do tipo base forte, dissociando-se a qualquer valor de pH. O processo de extração ocorre em suspensão aquosa de terra e resina, havendo uma transferência de P para a resina em função do equilíbrio que existe entre o P lábil e o P em solução. Tendo-se em vista que a capacidade de troca de ânions da resina é muito alta, tem-se, na realidade, uma transferência do P lábil do solo para a resina (Silva e Rajj, 1999).

As principais vantagens desse método, segundo Rajj, Quaggio e Silva (1986), são: extração contínua, dentro do tempo de agitação usado, ocorrendo uma transferência do P da fase sólida do solo para a resina, em meio aquoso, de forma similar ao que ocorre no sistema solo-planta; não é utilizado nenhum reagente químico que poderia dissolver fosfatos não-lábeis; o pH da suspensão solo-resina é um pouco menor que sete, coincidindo com a faixa de maior disponibilidade dos fosfatos do solo; a presença de bicarbonato mantém o tamponamento da suspensão, favorecendo a reprodutibilidade de resultados e tornando-os menos influenciados por mudanças nas relações entre quantidades de solo, resina ou água; e a resina catiônica retira os cátions de maior valência da solução e reduz a força iônica do meio, o que favorece a dissolução do fosfato lábil.

O conhecimento das formas de P preferencialmente recuperadas pelas plantas e pelos extratores permite, como sugerido por Bahia Filho et al. (1987), identificar que extrator é mais adequado para uma determinada área.

2.5 Fosfatase ácida no solo

Fosfatases são enzimas que catalisam a hidrólise de ésteres e anidridos do ácido fosfórico. Por esse mecanismo, moléculas orgânicas que apresentam fosfato como radical sofrem clivagem liberando álcool e ácido fosfórico. A parte orgânica da molécula pode ter várias estruturas químicas, como etilfosfato,

fenilfosfato, glicerolfosfato, dentre outras, de modo que uma fosfatase pode atuar em vários substratos (Nahas, 1992; Duff, Sarath e Plaxton, 1994).

A maior parte dos microrganismos do solo possui atividade de algum tipo de fosfatase. As fosfatases de maior importância na hidrólise de compostos orgânicos de fósforo encontradas no solo são a fosfatase alcalina, a fosfatase ácida, a fosfatase de fosfatidato, a 5'-nucleotidase e a fitase, entre outras (Nahas, 1992).

Vários fatores como a qualidade e a quantidade dos resíduos vegetais incorporados ao solo (Herbien e Neal, 1990), as condições de uso e a aplicação de corretivos e fertilizantes (Fernandes et al., 1998), afetam a atividade das fosfatases. A vegetação pode afetar a atividade dessas enzimas diretamente pela produção das mesmas, ou indiretamente pelo estímulo da atividade microbiológica do solo e pela deposição de resíduos, que aumentam o teor de matéria orgânica do solo. A matéria orgânica do solo, além de aumentar a atividade dos microrganismos, protege a enzima da decomposição (Harrison, 1983).

Uma vez que o fósforo orgânico do solo pode contribuir significativamente para a nutrição das culturas (Van Diest e Black, 1959), a correlação entre atividade das fosfatases e atividade microbiológica pode ser usada para estimar a contribuição das frações de fósforo orgânico para as plantas (Berton, Pratt e Frankenberger, 1997). Harrison (1983) verificou uma relação positiva entre a atividade de fosfatases e disponibilidade de fósforo na rizosfera, enquanto Nahas et al. (1994) não encontraram correlação entre atividade da fosfatase ácida com a disponibilidade de fósforo e com fósforo orgânico. Thien e Meyers (1992) sugerem que para uma avaliação realística da disponibilidade do fósforo orgânico para as plantas, é necessário medir o fósforo rapidamente mineralizável pelos microrganismos dos solo e a atividade de fosfatases extracelulares.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AE, N.; ARIHARA, J.; OKADA, K.; YOSHIHARA, T.; JOHANSEN, C. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent. *Science, Washington*, v.248, n.4954, p.477-480, Apr. 1990.
- AMER, F.; BOULDIN, D.R.; BLACK, C.A.; DUKE, F.R. Characterization of soil phosphorus by anion-exchange resin adsorption and ^{32}P equilibration. *Plant and Soil, The Hague*, v.4, p.391-408, 1955.
- ANDRADE, C.A. de B. Limitações de fertilidade e efeito do calcário para o feijoeiro em solos de várzea do sul de Minas Gerais. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 1997. 107p. (Tese - Doutorado em Fitotecnia).
- ANTIBUS, R.K.; LESICA, P. Root surface acid phosphatase activities of vascular epiphytes of a Costa Rican rain forest. *Plant and Soil, The Hague*, v.128, n.2, p.233-240, Nov. 1990.
- ASCENCIO, J. Acid phosphatase as a diagnostic tool. *Communication in Soil Science and Plant Nutrition, New York*, v.25, n.9/10, p.1553-1564, 1994.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A.C. Relações entre adsorção e componentes mineralógicos da fração argila de latossolos do Planalto Central. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, v.7, n.3, p.221-226, set./dez. 1983.
- 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.
- BERTON, R.S.; PRATT, P.F.; FRANKENBERGER, W.T.Jr. Phosphorus availability in soils amended with organic materials, estimated by three chemical methods and two enzyme activities. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa*, v.21, n.4, p.617-624, out./dez. 1997.

- BERTSCH, P.M.; BLOOM, P.R. Aluminum. In: **Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods.** Soil Science Society of America. Madison, 1996. p.517-550.
- BIELESKI, R.L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. **Annual Review of Plant Physiology, Palo Alto, v.24, p.225-252, 1973.**
- 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 American Journal, Madison, v.43, n.5, p.989-994, Sept./Oct. 1979.**
- 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.**
- CHANG, S.C.; JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science. Baltimore, v.84, n.3, p.133-144, Mar. 1957.**
- CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma, Amsterdam, v.64, n.4, p.197-214, Jan. 1995.**
- DUFF, S.M.G.; SARATH, G.; PLAXTON, W.C. The role of acid phosphatases in plant metabolism. **Physiology Plantarum, Copenhagen, v.90, n.4, p.791-800, Apr. 1994.**
- DUXBURY, J.; SMITH, S.; DORAN, J.; JORDAN, C.; SZOTT, L.; VANCE, E. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: COLEMAN, D.; OADES, J.; UEHARA, G. (ed). **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems.** Honolulu, Hawaii: NITAL Project, 1989. p.33-68.
- CORRÊA, F.S. Adubação nitrogenada e níveis críticos foliares de nitrogênio em feijoeiro cultivado em solos de várzea. Lavras: UFLA, 1999. 45p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).

- FABRES, A.S.; NOVAIS, R.F.; 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.1, p.51-57, jan./abr. 1987.
- FAQUIN, V.; ANDRADE, C.A.B.; FURTINI NETO, A.E.; ANDRADE, A.T.; CURI, N.** Resposta do feijoeiro à aplicação de calcário em solos de várzea do sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, n. 4, p.651-660, out./dez. 1998.
- FERNANDES, L.A.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; LIMA, J.M.; GUEDES, G.A.** Fósforo e atividade de fosfatase em dois solos sob diferentes condições de uso. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.33, p.1159-1170, jul. 1998.
- GARCIA, M; ASCENCIO, J.** Root morphology and acid phosphatase activity in tomato plants during development of recovery from phosphorus stress. *The Journal of Plant Nutrition*, New York, v.15, n.11, p.2491-2503, 1992.
- GERLOFF, G.C.; GABELMAN, W.H.** Genetic basics of inorganic plant nutrition. In: LAUCHLI, A.; BIELESKI, R.L., (eds.) *Inorganic Plant Nutrition*. Berlin: Spring Verlag, 1983.
- HARRISON, A.F.** Relationship between intensity of phosphatase activity and physico-chemical properties in woodland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, Elmsford, v.15, n.1, p.93-99, 1983.
- HERBIEN, S.A.; NEAL, J.L.** Soil pH and phosphatase activity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.21, p.436-456, 1990.
- 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 American Journal*, Madison, v.46, n.4, p.970-976, July/Aug. 1982.
- HOLFORD, I.C.R.; MATTINGLY, G.E.G.** Effects of phosphate buffering on the of labile phosphate by soil test. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, v.17, n.4, p.377-389, Dec. 1979.

- KAMPRATH, E.J.; WATSON, M.E.** Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soil. In: **KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J.** (ed.) *The role of phosphorus in agriculture*. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1980. p.433-470.
- MARIANO, E.D.** Resposta, níveis críticos e eficiência de extratores para boro em feijoeiro cultivados em solos de várzea. Lavras: UFLA, 1998. 82p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- MEHLICH, A.** A Mehlich 3 soil test extractant a modification of Mehlich 2 extractant. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.15, p.1409-1416, 1984.
- MEHLICH, A.** New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.9, p.477-492, 1978.
- MIRANDA, L.N.** Resposta da sucessão soja-trigo a doses e modo de aplicação de calcário em solo Glei Pouco Húmico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.17, n. 1, p.75-82, jan./abr. 1993.
- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.** Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade do fósforo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.9, n.3, p.237-244, set./dez. 1985.
- NAHAS, E.** Ciclo do fósforo: transformações microbianas. Jaboticabal, FUNEP, 1991. 67p.
- NAHAS, E.; CENTURION, J.F.; ASSIS, L.C.** Efeito das características dos solos sob os microrganismos solubilizadores de fosfatos e produtores de fosfatases. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.18, n.1, p.43-48, jan./abr. 1994.
- NAHAS, E.; TERENCE, H.F.; ROSSI, A.** effect of carbon source and pH on the production and secretion of acid phosphatase (EC 3.1.3.2.) and alkaline phosphatase (EC 3.1.3.1.) in *Neurospora crassa*. *Journal Genetics Microbiology*, Reading, v.128, n.9, p.2017-2021, Sept. 1982.

- OLSEN, R.G.; CURT, M.N.** Effect of wetting and drying of soils on phosphate adsorption and resin extraction of soil phosphate. *The Journal of Soil Science, Edinburgh*, v.33, n.4, p.709-717, Dec. 1982.
- OLSEN, S. R., WATANABE, F. S.** A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Science American Proceedings, Madison*, v.21, n.1, p.144-149, Jan./Feb. 1954.
- PONNAPERUMA, F.N.** The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy, New York*, v.24, p.28-96, 1972.
- PARFITT, R.L.** Optimum conditions for extraction of Al, Fe and Si from soils with acid oxalate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, Baltimore*, v.20, p.801-816, 1989.
- PAVAN, M.A.** Alumínio em solos ácidos do Paraná: relação entre o alumínio não-trocável, trocável e solúvel, com o pH, CTC, porcentagem de saturação de Al e matéria orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, v. 7, n.1, p.39-46, jan./abr. 1983.
- PIONKE, H.B.; COREY, R.B.** Relations between acidic aluminum and soil pH, clay, and organic matter. *Soil Science Society of American Proceedings, Madison*, v.31, n. 6, p.749-752, Nov./Dec. 1967.
- QUAGGIO, J.A.; ISHIMURA, I.; SAES, C.A.; YANAI, K.** Resposta da abobrinha-italiana a doses de calcários com diferentes teores de magnésio em solo orgânico do Vale do Ribeira (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, v.11, n.2, p.167-173, maio/ago. 1987.
- RAIJ, B. van., QUAGGIO, J. A.; SILVA, N.M.** Extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils by a ion-exchange resin procedure. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York*, v.17, n.5, p.547-566, 1986.
- REID, M.S.M.; BIELESKI, R.L.** Changes in phosphatase activity in phosphorus deficient Spirodela. *Planta, Berlin*, v.94, p.273-284, 1970.
- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S.** Effects of temperature and prior flooding on intensity and sorption of phosphate in soil. I. Effects on the kinetics of soluble P in soil. *Plant and Soil, The Hague*, v.95, n.2, p.1633-171, 1986a.

- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S.** Sorption and bioavailability of phosphorus during the drainage period of flooded-drained soils. *Plant and soil*, The Hague, v.92, n.3, p.265-278, 1986b.
- SAYAL, S.K.; DE DATTA, S.K.** Chemistry of phosphorus transformations in soil. *Advances in Soil Science*, New York, v.16, p.2-120, 1991.
- SHUMAN, L.M.** Comparison of exchangeable Al extractable Al and Al in soil fractions. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v.70, n.3, p.263-275, Aug. 1990.
- SILVA, F.C.; BASSO, L.C.** Avaliação da atividade in vivo da fosfatase ácida da folha na diagnose da nutrição fosfórica em cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.17, n.3, p.371-375, set./dez. 1993.
- 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.
- THIEN, S.J.; MYERS, R.** Determination of bioavailable phosphorus in soil. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.58, n.3, p.814-818, May/June 1992.
- THOMAS, G.W.; PEASLEE, D.E.** Testing soils for phosphorus. In: **WALSH, L.W.; BEATON, J.D.**, (ed.) *Soil testing and plant analysis*. Madison: SSSA, 1973. p.15-29.
- VAN DIEST, A.; BLACK, C.A.** Soil organic phosphorus and plant growth. II. Organic phosphorus mineralized during incubation. *Soil Science*, Baltimore, v.87, n.2, p.145-154, Feb. 1959.
- VILLA, M.R.** Potássio em solos de várzea e nutrição potássica do feijoeiro. Lavras: UFLA, 1999. 53p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- WANG, C.; McKEAGUE, J.A.; KODAMA, H.** Pedogenic imogolite and soil environments: Case study of Spodosols in Quebec, Canada. *Soil Science American Journal*, Madison, v.50, n.3, p.369-374, May/June 1993.

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

FRAÇÕES DE FÓSFORO E ATIVIDADE DA FOSFATASE ÁCIDA EM PLANTAS DE FEIJOEIRO CULTIVADAS EM SOLOS DE VÁRZEA

RESUMO

Conduziu-se um experimento em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, com o objetivo verificar a influência dos atributos de quatro solos de várzea sobre a distribuição de algumas frações de fósforo nas folhas de feijoeiro e determinar suas respectivas concentrações críticas e a relação dessas frações com a atividade da fosfatase ácida foliar. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial $4 \times 5 \times 2$, com quatro repetições, sendo quatro solos [Glei Húmico (GH), Orgânico (O), Aluvial (A) e Glei Pouco Húmico (GP)], cinco doses de P (75, 150, 300, 500 e 800 mg dm⁻³ de P) e dois níveis de calagem (sem e com). Cada parcela foi constituída por um vaso com três dm³, onde cultivaram-se três plantas de feijoeiro, sendo uma colhida no florescimento e nas folhas da qual avaliaram-se as concentrações de P total (Pt), P total solúvel em ácido (Pts), P orgânico (Po) e P inorgânico solúvel em ácido (Pi), nas demais, colhidas no final do ciclo, a produção de grãos. Os níveis críticos das frações de P no feijoeiro cultivado, respectivamente nos solos GH, O, A e GP, sem calagem, foram: Pt=2,3, 2,2, 2,0, e 1,3 mg g⁻¹; Pts=110, 67, 78 e 63; Po=32, 19, 20 e 21 e Pi=77, 47, 58 e 43 µg g⁻¹. Com calagem, os níveis críticos foram: Pt=2,8, 3,0, 3,5 e 4,2 mg g⁻¹; Pts=105, 96, 130 e 154; Po=47, 38, 42 e 52 e Pi=59, 58, 88 e 103 µg g⁻¹. A atividade da fosfatase ácida não foi um bom parâmetro de diagnose nutricional de fósforo em condições de severa deficiência desse elemento.

ABSTRACT

An experiment was conducted in greenhouse of the Soil Science Department of the Universidade Federal de Lavras, with the objective of verifying the influence of the features of four lowland soils upon the distribution of some fractions of phosphorus in the bean plant leaves and determining their respective critical concentrations and the relationship of those fractions with leaf acid phosphatase activity. The experimental design utilized was the completely randomized, in 4x5x2 factorial scheme, with four replications, being four soils [Humic Gley (GH), Bog Soil (O), Alluvial (A) and Low Humic Gley (GP)], five doses of P(75, 150, 300, 500 and 800 mg dm⁻³ of P) and two levels of liming (without and with). Each plot was constituted of a three dm³ pot where three bean plants were grown, one being harvested at flowering and in the leaves of which, the concentrations of total P (Pt), acid soluble total P (Pts), organic P (Po) and acid soluble inorganic P(Pi) were evaluated, in the others, harvested at the end of the cycle, grain yield. The critical levels of the P fractions in the bean plant cultivated, respectively, in the soils GH, O, A and GP without liming, were: Pt=2.3, 2.2, 2.0 and 1.3 mg g⁻¹; Pts=110, 67, 78 and 63; Po=32, 19, 20 and 21 and Pi=77, 47, 58 and 43 µg kg⁻¹. With liming, the critical levels were: Pt=2.8, 3.0, 3.5, and 4.2 mg g⁻¹; Pts=105, 96, 130 and 154; Po=47, 38, 42 and 52 and Pi=59, 58, 88 and 103 µg g⁻¹. Acid phosphatase activity was not a good parameter of nutritional diagnosis of phosphorus under conditions of severe deficiency of that element.

1 INTRODUÇÃO

As plantas absorvem o P na forma de ortofosfatos que se encontram na solução do solo, sendo a taxa de absorção relacionada à concentração do P em solução. Como a concentração de P em solução depende da capacidade de reabastecimento do solo (fator capacidade), o teor de P nos tecidos vegetais também depende do fator capacidade de P do solo. O fator capacidade de P ou poder tampão, pode ser entendido como a resistência do solo a mudanças da concentração do P em solução (fator intensidade - I) quando se adiciona ou retira P do solo (fator quantidade - Q) (Novais e Smith, 1999). Segundo esses autores, o fator capacidade de P (Q/I) é definido pelo equilíbrio entre a variação de Q e a variação de I .

A dependência da concentração de P nos tecidos vegetais do fator capacidade do solo é relatada em vários trabalhos com diferentes culturas e classes de solos (Muniz et al., 1985; Fabres et al., 1987; Fernandes et al., 1988), sendo que, as menores concentrações são verificadas em solos de maior fator capacidade de P. Por outro lado, em solos de menor fator capacidade, há um acúmulo de P pelas plantas que poderá ser importante para a manutenção de seu crescimento quando, por alguma razão, a disponibilidade de P do solo for baixa.

As alterações na absorção de P, em consequência dos atributos dos solos, que variam quanto à facilidade de ceder este elemento para as plantas, provocam mudanças nas formas de sua reserva na planta (Bielecki, 1973). Segundo esse autor, em condições de maior disponibilidade de P, ocorre seu acúmulo na forma inorgânica nos vacúolos, servindo como reserva. O nível de P inorgânico é mais sensível à disponibilidade do elemento no meio do que os níveis de várias frações orgânicas de P na planta.

Embora os mecanismos envolvidos não sejam ainda totalmente explicados, a dinâmica das frações fosfatadas na planta está relacionada com a

atividade de fosfatases, enzimas responsáveis pela defosforilação de moléculas orgânicas. À medida que diminui o suprimento de P para as plantas, ocorre um aumento da atividade dessas enzimas (Bielecki e Ferguson, 1983). Vários trabalhos têm relatado a relação entre deficiência de P e atividade de fosfatases (Silva e Basso, 1993; Ascencio, 1994; Fernandez e Ascencio, 1994; Fernandes et al., 1998).

Segundo Besford (1979), a determinação da atividade de fosfatases, para algumas espécies vegetais, pode ser utilizada como um ferramenta de diagnose nutricional, prevendo deficiência de P nas plantas antes do aparecimento dos sintomas visuais de deficiência. No entanto, para que a atividade das fosfatases seja utilizada como ferramenta de diagnose da nutrição fosfatada, é necessário o estabelecimento de padrões para as diversas espécies de plantas e a parte da planta a ser amostrada (Ascencio, 1994).

Assim, os objetivos deste trabalho foram verificar a influência dos atributos de quatro solos de várzea sobre a distribuição de algumas frações de fósforo nas folhas de feijoeiro e determinar suas respectivas concentrações críticas e a relação dessas frações com a atividade da fosfatase ácida foliar, na ausência e na presença de calagem.

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. Cultivou-se o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Carioca-MG) no período de agosto a novembro de 1997, em amostras de quatro solos de várzea não cultivados anteriormente: Glei Húmico (GH), Orgânico (O), Aluvial (A) e Glei Pouco Húmico (GP), tendo sido o solo Orgânico artificialmente drenado.

As amostras dos solos, coletadas na camada superficial (0-20cm) de uma várzea no município de Lavras - MG, foram destorroadas, secas ao ar e passadas em peneira de 5mm de abertura. Foram tomadas subamostras e passadas em peneira de 2mm de abertura, constituindo a terra fina seca ao ar para caracterizações química, física e mineralógica (Tabela 1).

O experimento foi arranjado em esquema fatorial $4 \times 5 \times 2$, com quatro repetições, sendo os fatores: quatro solos (GH, O, A, GP), cinco doses de P (75, 150, 300, 500, 800mg dm^{-3}) e dois níveis de calagem (com e sem calcário), em delineamento inteiramente casualizado, com rodízio semanal da posição dos vasos na casa de vegetação.

As doses de fósforo e calcário foram definidas com base em experimentos anteriores (Andrade, 1997). As doses de calcário para elevar a saturação por bases para em torno de 50%, corresponderam a 6,4; 4,6; 4,6 e 13,4 t ha^{-1} para os solos GH, O, A e GP, respectivamente. Utilizou-se um calcário dolomítico calcinado com 35% de CaO, 14% de MgO e Poder Relativo de Neutralização Total de 100%.

Os solos foram incubados nos vasos, com e sem as respectivas doses de calcário, por um período de 30 dias, mantendo-se a umidade em torno de 70% do volume total de poros (VTP) ocupados por água. Após esse período, o material de solo de cada vaso, foi seco e peneirado e recebeu a aplicação das respectivas doses de P e de uma adubação básica de semeadura, com macro e micronutrientes: 70 mg de N; 100 mg de K; 40 mg de S; 1,5 mg de Cu e 5,0 mg de Zn dm^{-3} de solo. As fontes utilizadas foram reagentes p.a.: NH_4NO_3 ; $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$; NaH_2PO_4 ; NH_4NO_3 ; KNO_3 ; H_3BO_3 ; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; $\text{CuCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ e ácido fosfórico (H_3PO_3). O material de solo foi novamente incubado por 150 dias, mantendo-se a umidade nos mesmos níveis anteriores.

TABELA 1. Principais atributos químicos, físicos e mineralógicos dos solos antes da aplicação dos tratamentos.

Químicos												
Solo	pH ⁽¹⁾	P ⁽¹⁾	K ⁽¹⁾	Ca ⁽¹⁾	Mg ⁽¹⁾	Al ⁽¹⁾	H+Al ⁽¹⁾	T	m	V	PR ⁽²⁾	CMAP ⁽²⁾
		mg dm ⁻³		mmol. dm ⁻³					%		mg dm ⁻³	mg L ⁻¹
GH	4,7	6,0	51	0,7	0,2	1,6	13,7	15	61	7	2404	1,77
O	4,6	8,0	76	1,6	1,2	0,9	9,8	13	23	23	1051	16,40
A	4,7	3,0	103	2,7	1,1	0,2	4,5	8,6	5	47	689	27,33
GP	4,5	3,0	36	0,6	0,2	1,1	6,3	7,2	55	12	648	28,00

Físicos								
	Areia grossa ⁽¹⁾	Areia fina ⁽¹⁾	Silte ⁽¹⁾	Argila ⁽¹⁾	Matéria orgânica ⁽¹⁾	Ds ⁽¹⁾	Dp ⁽¹⁾	Superfície específica ⁽¹⁾
	g kg ⁻¹					g cm ⁻³		m ² g ⁻¹
GH	0	230	391	370	245	0,40	1,81	335
O	9	120	570	310	45	0,64	2,15	181
A	30	179	471	350	41	0,76	2,78	137
GP	0	611	179	180	35	1,05	2,66	121

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⁾	Ct ⁽⁴⁾	Gb ⁽⁴⁾	Ki ⁽⁵⁾
	g kg ⁻¹									
GH	126,1	175,5	13,3	5,5	1,52	0,9	0,21	18	20	1,22
O	243,4	247,1	42,8	7,3	0,48	1,6	0,16	36	18	1,67
A	209,3	221,1	74,5	9,3	0,51	4,3	0,17	50	17	1,61
GP	84,2	112,2	13,0	6,2	0,10	0,3	0,11	12	3,4	1,28

(1) pH = pH em água; P = fósforo pelo Mehlich 1; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; H+Al = acidez potencial; T = cap. 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 = cap. máxima de adsorção de P (Alvarez V. e Fonseca, 1990);

(3) Óxidos do ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997);

(4) Fe_d = ferro ditonito; Fe_o = ferro oxalato; Ct = caulinita; Gb = gibbsita (Mehra e Jackson, 1960) determinados na fração argila e corrigidos para terra fina.

(5) Ki - relação molecular SiO₂/Al₂O₃.

Cultivaram-se três plantas de feijoeiro por vaso, colhendo-se a parte aérea de uma das plantas no florescimento (estádio R6) e das outras duas, na maturação fisiológica dos grãos (estádio R9). Durante o cultivo do feijoeiro, a umidade dos solos foi mantida em torno de 70% do VTP ocupados por água, por meio de pesagens diárias dos vasos e adição de água deionizada.

Foram realizadas adubações de cobertura com nitrogênio e potássio, diferenciadas em função do crescimento das plantas. Os tratamentos que proporcionaram, em cada solo, um crescimento normal das plantas, receberam 150 mg de N e 100 mg de K dm^{-3} , parcelados em cinco aplicações. Os tratamentos cujas plantas apresentaram um menor crescimento receberam coberturas proporcionalmente menores, evitando-se, assim, aplicações excessivas dos nutrientes.

Da planta colhida no florescimento (32 dias após a emergência), coletaram-se amostras dos folíolos do último trifólio fisiologicamente maduro para o estudo do fracionamento do fósforo e da atividade da fosfatase ácida *in vivo* e *in vitro* no tecido foliar. No restante das folhas determinaram-se os teores de fósforo através da digestão nítrico-perclórica - P total (Pt) (Malavolta, Vitti e Oliveira, 1997). Das plantas colhidas no final do ciclo, foi determinado o peso de matéria seca de grãos.

Para o fracionamento do fósforo, aproximadamente 0,5g das amostras dos folíolos foram colocadas em ácido perclórico 0,2 mol L^{-1} e armazenadas em freezer para posterior análise dos teores de fósforo total solúvel em ácido (Pts), fósforo inorgânico solúvel em ácido (Pi) e, por diferença, fósforo orgânico (Po). A metodologia do fracionamento utilizada foi a de Smille e Krotkov (1960) e Hogue, Wilcox e Cantliffe (1970), modificadas por Martinez (1992). Para a determinação da atividade da fosfatase ácida *in vitro*, coletou-se 1,0 g de material vegetal (folíolos), que depois de recortado em pedaços pequenos ($\pm 4 \text{ mm}^2$), foi macerado em presença de 0,2 g de polivinil pirrolidona insolúvel e

0,1g de ácido ascórbico. Ao material foram adicionados 10 mL de tampão citrato 0,1 mol L⁻¹ a pH 4,5, sendo a mistura recolhida em tubos de ensaio e centrifugado a 10.000 rpm por 15 minutos, a 4° C. O sobrenadante foi armazenado em freezer. O sedimento foi ressuspensão em 10 mL de tampão citrato 0,1 mol L⁻¹ a pH 4,5 e centrifugado novamente, e o sobrenadante, recolhido no mesmo frasco. A atividade da fosfatase ácida foi determinada em pH 5,0 (pH ótimo da enzima, determinada em ensaios preliminares), utilizando como substrato o para-nitrofenilfosfato a 16 mmol L⁻¹. Em cada determinação, a mistura de reação foi incubada a 30° C por quatro diferentes períodos de tempo (15, 30, 45 e 60 minutos). Controles sem enzima (branco de substrato) e sem substrato (branco de enzima) foram incubados do mesmo modo que os tubos experimentais (Santos, 1985). Para a determinação da atividade da fosfatase ácida *in vivo*, foram retirados discos de 0,5 cm dos folíolos do último trifólio fisiologicamente maduro, evitando-se as nervuras. O material foi imediatamente transferido para tubos de ensaio depositados em recipiente com gelo e mantidos no escuro. As amostras foram incubadas a 30° C, por 20 minutos, com 8 mL de para-nitrofenilfosfato 250 µmol L⁻¹, em tampão acetado de sódio 0,1 mol L⁻¹, com pH ajustado para 5,0 (Silva e Basso, 1993). Tanto para a atividade da fosfatase ácida determinada *in vitro* quanto para a *in vivo*, as leituras foram realizadas por colorimetria em comprimento de onda de 410 nm.

As variáveis estudadas foram submetidas à análise de variância e estudos de regressão, cujas equações foram ajustadas às médias de produção de matéria seca de grãos em função das doses de fósforo aplicadas. A partir das equações obtidas, estimaram-se as doses de fósforo para a produção máxima de grãos e 90% da máxima para cada solo (doses críticas). Para os tratamentos em que foram obtidas equações de regressão linear, adotou-se a maior dose de P aplicada como aquela necessária para a obtenção da produção máxima e, a partir dessa dose, estimou-se a dose para a obtenção de 90% da produção máxima.

Foram também ajustadas equações de regressão para o P total e demais frações de P (Pts, Pi e Po) determinadas na planta, na época do florescimento, como variáveis dependentes das doses de fósforo aplicadas. Pela substituição das doses críticas de fósforo nessas equações, obtiveram-se as concentrações críticas de diferentes frações de fósforo na parte aérea das plantas de feijoeiro, para cada solo e nível de calagem. Análises de correlações simples foram realizadas entre todas as variáveis estudadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produção de matéria seca de grãos

A produção de matéria seca de grãos (MSGR) foi influenciada ($P < 0,01$) pelos solos, calagem e doses de P, havendo interação entre os fatores (Tabela 1A).

Exceto para o solo Glei Húmico (GH) na ausência de calagem, com e sem aplicação de calcário, as equações quadráticas base raiz quadrada foram as que melhor se ajustaram à produção de grãos (Figura 1). Segundo esse modelo, ocorrem incrementos significativos na produção de MSGR com a aplicação das doses iniciais de P, passando por um ponto de máximo e decrescendo lentamente nas doses mais elevadas do nutriente. Para os solos GP e GH na ausência de calagem, independente da dose de P, a produção de MSGR foi bastante baixa, possivelmente devido aos seus elevados teores de Al e baixos de Ca e Mg (Tabela 1).

A partir das equações da Figura 1, estimaram-se as produções de MSGR e as doses de P correspondentes à produção máxima e 90% da máxima, que admite-se representar a máxima eficiência econômica (Alvarez V. et al., 1988).

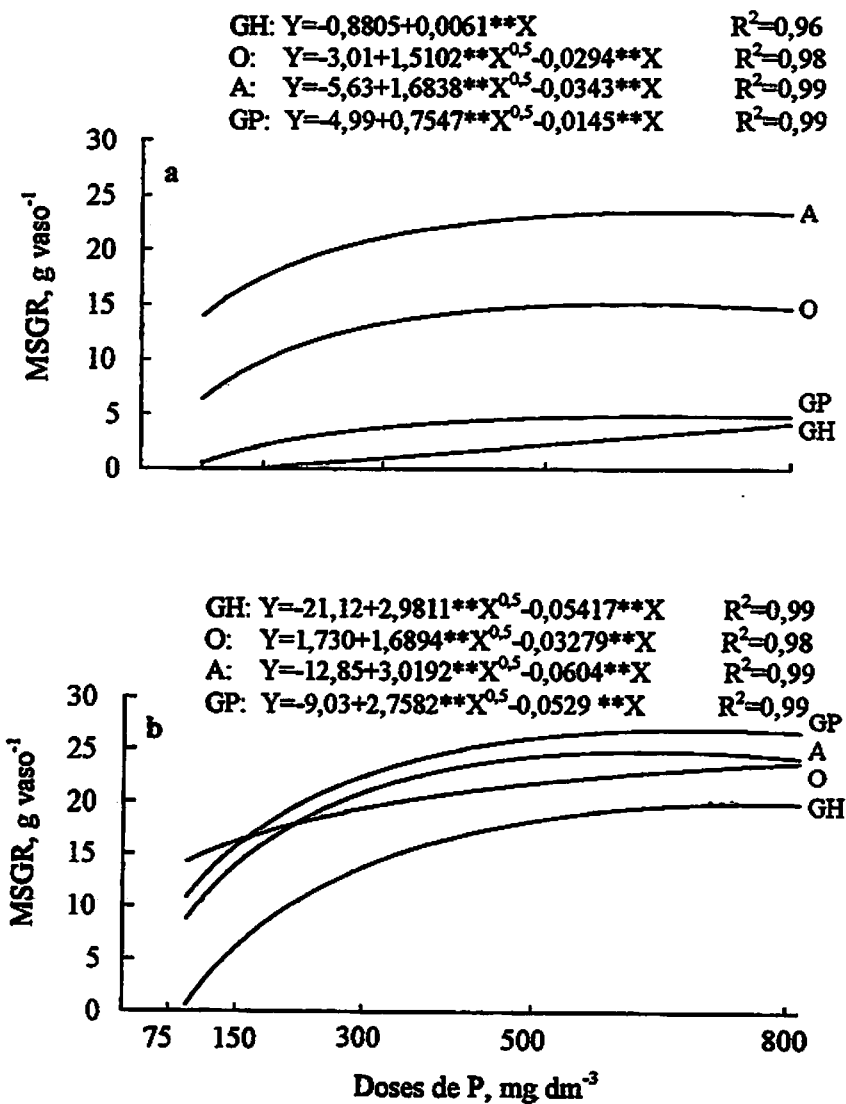


FIGURA 1. Produção de matéria seca de grãos (MSGR) pelo feijoeiro em função das doses de P aplicadas aos solos de várzea, na ausência (a) e presença (b) de calagem. (** significativo a 1% pelo teste de t).

As doses de P para a máxima produção de MSGR, independentemente da calagem, exceto para o solo GH, não apresentaram grandes variações entre os solos, oscilando de 604 a 680 mg dm⁻³ de P (Tabela 2), exceto para o solo GH na ausência de calagem, que, em função do ajuste linear no presente trabalho, considerou-se a maior dose testada, 800 mg dm⁻³ de P.

As doses de P correspondentes a 90% da máxima produção de MSGR, à exceção do solo GH sem calagem, corresponderam a 50 – 60% das doses para a máxima produção (Tabela 2), ou seja, a redução de apenas 10% na MSGR, correspondeu a uma grande economia na dose do nutriente. A produção de MSGR foi significativamente ($P < 0,01$) afetada pela aplicação de calcário, com um aumento de 39,4, 43, 63 e 454% para os solos GH, O, A e GP, respectivamente (Tabela 2). Certamente, a baixa produção de MSGR verificada nos solos sem calagem se deve à elevada acidez e altos teores de Al e, também, nos solos GH e GP, aos baixos teores de Ca e Mg (Tabela 1).

A calagem afetou, também, a taxa de benefício da adubação fosfatada para a produção de MSGR (mg MSGR / mg de P aplicado). No ponto de 90% da produção máxima, a calagem aumentou essa taxa em 7,9, 1,6, 1,5 e 6,4 vezes para os solos GH, O, A e GP, respectivamente (Tabela 2).

Um dos efeitos primários do alumínio sobre a absorção de P pelas plantas é a redução da disponibilidade deste nutriente, que pode se dar na solução externa às raízes (White et al., 1976). Entretanto, essa redução pode também ocorrer nas raízes, mais precisamente no espaço livre aparente, sendo, portanto, independente de processos metabólicos (Rorison, 1965). Alves et al. (1988) verificaram que o principal efeito do alumínio sobre a absorção de P, em duas cultivares de trigo, estava relacionado com a diminuição da capacidade do carregador de associar-se com o íon fosfato. O alumínio pode, ainda, influenciar a translocação do P para a parte aérea, como verificado por Lee (1971) em plantas de batata.

TABELA 2. Produção estimada de matéria seca de grãos (MSGR) correspondente à produção máxima e 90% da máxima, doses de P estimadas para promover essas produções e taxa de benefício da adubação fosfatada para a produção de MSGR (mg MSGR/mg P aplicado por vaso) no índice de 90%, para solos com e sem calagem.

Solo	MSGR (g vaso ⁻¹)		Dose de P (mg dm ⁻³)		Taxa de Benefício
	90%	máxima	90%	máxima	
Sem calagem					
GH	3,62	4,02	735	800	1,64
O	14,77	16,41	333	661	14,78
A	13,55	15,05	322	604	14,03
GP	4,37	4,85	412	682	3,54
Com calagem					
GH	17,89	19,88	460	735	12,96
O	21,14	23,49	299	664	23,57
A	22,38	24,87	345	625	21,62
GP	24,23	26,92	359	680	22,50

Faquim et al. (1998), avaliando a resposta do feijoeiro à aplicação de calcário nos mesmos solos do presente estudo, concluíram que a calagem nesses solos foi essencial para fornecer cálcio e magnésio para o feijoeiro e, com a elevação do pH, promover a neutralização da toxidez de Al e Mn.

3.2 Concentração e níveis críticos foliares de fósforo total

As concentrações de P nas folhas das plantas de feijoeiro na época do florescimento, determinadas pela digestão nítrico-perclórica, que representa o P total (Pt), aumentaram linearmente com as doses de P aplicadas, em todos os tratamentos (Tabela 3). Pelas equações ajustadas, verifica-se que a baixa produção de MSGR nos solos GH e GP na ausência de calagem pode ser atribuída às baixas concentrações de Pt nas plantas cultivadas nesses solos. No

entanto, quando se aplicou calcário, as plantas cultivadas no solo GP foram as que apresentaram as maiores concentrações de Pt, o que pode ser atribuído à menor capacidade de adsorção do P aplicado, expressa pelo menor valor de capacidade máxima de adsorção de P e maior valor de P remanescente desse solo (Tabela 1). Interessante notar, também, que as plantas cultivadas no solo GP foram aquelas que apresentaram a maior resposta em produção de grãos à aplicação de calcário, independente das doses de P aplicadas (Figura 1). Por outro lado, no GH, que apresenta o maior valor de capacidade máxima de adsorção de P e menor valor de P remanescente, as plantas apresentaram as menores concentrações de Pt.

A capacidade máxima de adsorção e P remanescente são características que refletem o poder tampão ou fator capacidade de P do solo (Muniz et al. (1985). A variação no fator capacidade entre solos normalmente está associada à adsorção de P e a algumas características ligadas ao fenômeno de adsorção, P remanescente, conteúdo e natureza da fração argila e conteúdo de matéria orgânica (Bahia Filho et al., 1983 e Muniz et al., 1985). Segundo os autores, as correlações significativas entre capacidade máxima de adsorção, energia de adsorção e P remanescente são esperadas, tendo em vista a participação desses parâmetros na obtenção do fator capacidade. Vários autores observaram relação inversa entre P absorvido pela planta e o fator capacidade de P do solo (Holford e Mattingly, 1976; Bahia Filho et al., 1983; Muniz et al., 1985; Fabres et al., 1987 e Fernandes et al., 1998).

Verifica-se ainda que os acréscimos estimados nos teores de P para cada unidade de P aplicada, mostrados pelos coeficientes angulares das equações (Tabela 3), foram maiores quando os solos receberam aplicação de calcário. Provavelmente, a calagem, além de reduzir a fixação do fósforo aplicado nos solos, reduziu ou eliminou os efeitos do Al sobre a absorção de P pelas plantas de feijoeiro.

TABELA 3. Equações de regressão lineares ajustadas entre fósforo total nas folhas de feijoeiro, em mg g^{-1} , como variável dependente (Y) das doses de fósforo aplicadas (X), em mg dm^{-3} , e níveis críticos foliares de fósforo para as plantas de feijoeiro.

Solo	Equação	R ²	Nível crítico (mg g^{-1})
	<i>P_t</i>		
			0 ^o) Sem calagem
GH	Y = 0,4551+0,0025**X	0,95	2,3
O	Y = 1,2990+0,0027**X	0,87	2,2
A	Y = 1,2703+0,0022**X	0,83	2,0
GP	Y = 0,7365+0,0014**X	0,94	1,3
			Com calagem
GH	Y = 0,4018+0,0052**X	0,98	2,8
O	Y = 1,8516+0,0035**X	0,85	3,0
A	Y = 1,6470+0,0052**X	0,94	3,5
GP	Y = 2,4711+0,0048**X	0,94	4,2

** significativo a 1% pelo teste de t.

Substituindo nas equações da Tabela 3, para cada solo, na ausência e presença de calagem, as doses correspondes a 90% da máxima produção de MSGR, estimaram-se os níveis críticos de Pt nas folhas das plantas de feijoeiro, na época do florescimento.

Na ausência de calagem, o solo GP apresentou o menor, e o GH o maior valor de nível crítico (Tabela 3). O maior valor observado no GH se deve à elevada dose de P estimada para 90% da produção máxima, duas vezes aquela para os demais solos, decorrente do ajuste linear para a produção de MSGR como variável dependente das doses de P aplicadas. Na presença de calagem, quando o único fator limitante à produção de MSGR foi o P, os solos supostamente de menor fator capacidade, A e GP, apresentaram os maiores valores de níveis críticos (Tabela 3).



→ Muniz et al. (1985) verificaram grande amplitude de variação entre os níveis críticos de Pt na parte aérea de plantas de soja, cultivadas em solos de diferentes fator capacidade, sendo que os menores valores foram observados para os solos de maior fator capacidade. Segundo Novais e Smith (1999), a maior ou menor competição entre planta e solo pelo P aplicado faz com que a planta se ajuste para utilizar o teor de P que lhe é colocado à disposição. Dessa forma, quando o P é o único fator limitante à produção, além das variações decorrentes entre espécies ou cultivares, idade do tecido vegetal, forma do nutriente, interação entre nutrientes e condições ambientais, atributos do solo que refletem o fator capacidade de P também devem ser considerados na interpretação dos níveis críticos de P em plantas (Muniz et a., 1985).

→ Quando se correlacionaram os níveis críticos de Pt obtidos nos quatro solos estudados, com e sem calagem, com alguns atributos dos solos que refletem seu fator capacidade de P (Tabela 4), verificaram-se correlações significativas apenas com o teor de argila, na ausência de calagem, e com o teor de gibbsita, capacidade máxima de adsorção e P remanescente, na presença de calagem. As correlações com os demais atributos dos solos (Tabela 1) não são apresentadas pelo fato de não se ter verificado uma tendência de comportamento entre tais atributos e os níveis críticos de P.

Embora o teor de argila seja considerado o atributo do solo de maior importância na determinação do fator capacidade (Miranda e Volkweiss, 1981), a ausência de correlação com os níveis críticos de Pt, na presença de calagem (Tabela 4), pode estar relacionada à natureza da fração argila dos solos estudados. No presente estudo verificou-se correlação significativa e negativa para os teores de gibbsita com os níveis críticos de Pt, possivelmente pela sua alta capacidade em adsorver fósforo.

TABELA 4. Coeficientes de correlação linear simples entre as concentrações críticas de fósforo total (Pt), total solúvel em ácido (Pts), orgânico (Po) e inorgânico (Pi) e atributos do solo que refletem o fator capacidade.

Atributos do solo	Pt	Pts	Po	Pi
Sem calagem				
Teores de argila	0,82*	0,36ns	0,01ns	0,46ns
Teores de gibbsita	0,98**	0,45ns	0,21ns	0,54ns
CMAP	0,64ns	0,92*	0,94*	0,87*
P-Re	-0,71ns	-0,83*	-0,84*	-0,78*
Matéria orgânica	0,55ns	0,95*	0,98**	0,90*
Com calagem				
Teores de argila	-0,68ns	-0,62ns	-0,80*	-0,53ns
Teores de gibbsita	-0,93**	-0,93**	-0,83*	-0,87*
CMAP	-0,75*	-0,59ns	0,07ns	-0,73*
P-Re	0,84*	0,74*	0,09ns	0,84*
Matéria orgânica	-0,65ns	-0,47ns	0,20ns	-0,59ns

CMAP = capacidade máxima de adsorção de P; P-Re = P remanescente.

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

→ As concentrações críticas de Pt nas folhas do feijoeiro, estimadas na época do florescimento, correlacionaram-se positiva e significativamente com a produção de MSGR, na ausência e presença de calagem (Tabela 5), indicando constituírem um bom parâmetro para prever a produção de grãos e a capacidade dos solos em fornecer P para as plantas.

TABELA 5. Coeficientes de correlação linear simples entre a produção de matéria seca de grãos (MSGR), fósforo total (Pt), total solúvel em ácido (Pts), orgânico (Po) e inorgânico (Pi) e, atividade da fosfatase ácida in vivo (Pase-vv) e in vitro (Pase-vt), para os solos estudados na ausência e presença de calagem.

	MSGR	Pt	Pts	Pi	Po	Pase-vv	Pase-vt
Sem calagem							
MSGR	1,00**	-	-	-	-	-	-
Pt	0,99**	1,00**	-	-	-	-	-
Pts	0,99**	0,99**	1,00**	-	-	-	-
Pi	0,97**	0,98**	0,99**	1,00**	-	-	-
Po	0,99**	0,99**	0,99**	0,99**	1,00**	-	-
Pase-vv	0,95**	0,92**	0,88*	0,85*	0,90*	1,00**	-
Pase-vt	0,97**	0,94**	0,92**	0,89*	0,93*	0,99**	1,00**
Com calagem							
MSGR	1,00**	-	-	-	-	-	-
Pt	0,95**	1,00**	-	-	-	-	-
Pts	0,97**	0,99**	1,00**	-	-	-	-
Pi	0,98**	0,99**	0,99**	1,00**	-	-	-
Po	0,97**	0,99**	0,99**	0,99**	1,00**	-	-
Pase-vv	-0,42ns	-0,64ns	-0,65ns	0,62ns	-0,67ns	1,00**	-
Pase-vt	-0,54ns	-0,68ns	-0,71°	-0,69°	-0,72°	0,98**	1,00**

** , * , ° e ns significativo a 1%, 5%, 10% e não significativo, respectivamente.

3.3 Concentrações e níveis críticos foliares de P total solúvel em ácido, orgânico e inorgânico solúvel em ácido

— As concentrações de P total solúvel em ácido (Pts), P inorgânico (Pi) e P orgânico (Po) nos tecidos foliares, na época do florescimento do feijoeiro, em função das doses de P aplicadas (Tabela 6), apresentaram comportamento semelhante ao verificado para a concentração de Pt nas folhas do feijoeiro.

— Comparando as equações ajustadas para Pi e Po em função das doses de P aplicadas (Tabela 6), observa-se que os coeficientes angulares, que representam o acréscimo dessas formas de P para cada unidade de P aplicada, foram sempre maiores para o Pi, indicando que a concentração de Pi é mais sensível as variações de P nos solos. Este comportamento também foi verificado por Fabres et al. (1987) em plantas de alface e Furtini Neto et al. (1998) em plantas de eucalipto. Chisholm et al. (1981), trabalhando com *Trifolium repens* e *Stylosanthes hamata*, sugeriram que, em vez do Pt, formas de P metabolicamente ativas, como P-lipídios, deveriam ser utilizadas na determinação de níveis críticos em plantas, uma vez que essas frações são as que menos variam com a idade da planta e com a disponibilidade do elemento no solo. No entanto, segundo Lee e Ratcliffe (1983), exatamente por este último aspecto, talvez as frações orgânicas não estimem bem os níveis críticos em plantas, já que essas frações variam muito pouco com o “status” do nutriente na planta.

Tabela 6. Equações de regressão lineares ajustadas entre fósforo total solúvel em ácido (Pts), orgânico (Po) e inorgânico (Pi) solúvel em ácido nas folhas de feijoeiro, em $\mu\text{g g}^{-1}$, como variável dependente (Y) das doses de fósforo aplicadas (X), em mg dm^{-3} , e níveis críticos das frações de fósforo.

Solo	Fração de P	Equação	R ²	Nível crítico ($\mu\text{g g}^{-1}$)
Sem calagem				
GH	Pts	$Y = 13,355 + 0,0135^{**}X$	0,93	110,0
	Po	$Y = 5,1898 + 0,0373^{**}X$	0,98	32,6
	Pi	$Y = 8,3645 + 0,0942^{**}X$	0,90	77,4
O	Pts	$Y = 21,482 + 0,1377^{**}X$	0,91	67,3
	Po	$Y = 5,9212 + 0,0405^{**}X$	0,91	19,4
	Pi	$Y = 15,561 + 0,09723^{**}X$	0,89	47,9
A	Pts	$Y = 25,322 + 0,1638^{**}x$	0,93	78,1
	Po	$Y = 7,5079 + 0,0386^{**}X$	0,95	19,9
	Pi	$Y = 17,815 + 0,1252^{**}X$	0,92	58,2
GP	Pts	$Y = 14,424 + 0,1197^{**}X$	0,94	63,7
	Po	$Y = 3,8218 + 0,0408^{**}X$	0,96	20,6
	Pi	$Y = 10,603 + 0,0789^{**}X$	0,91	43,1
Com calagem				
GH	Pts	$Y = 24,289 + 0,1768^{**}X$	0,93	105,6
	Po	$Y = 19,059 + 0,0609^{**}X$	0,86	47,1
	Pi	$Y = 5,2308 + 0,1159^{**}X$	0,95	58,5
O	Pts	$Y = 31,151 + 0,2175^{**}X$	0,91	96,2
	Po	$Y = 18,947 + 0,0644^{**}X$	0,91	38,2
	Pi	$Y = 12,20 + 0,1531^{**}X$	0,89	58,0
A	Pts	$Y = 51,641 + 0,2284^{**}X$	0,89	130,4
	Po	$Y = 25,862 + 0,0479^{**}x$	0,91	42,4
	Pi	$Y = 25,779 + 0,1805^{**}x$	0,87	88,1
GP	Pts	$Y = 63,443 + 0,2536^{**}X$	0,91	154,5
	Po	$Y = 10,739 + 0,0591^{**}X$	0,86	52,0
	Pi	$Y = 32,704 + 0,1945^{**}X$	0,91	102,5

** significativo a 1% pelo teste t.

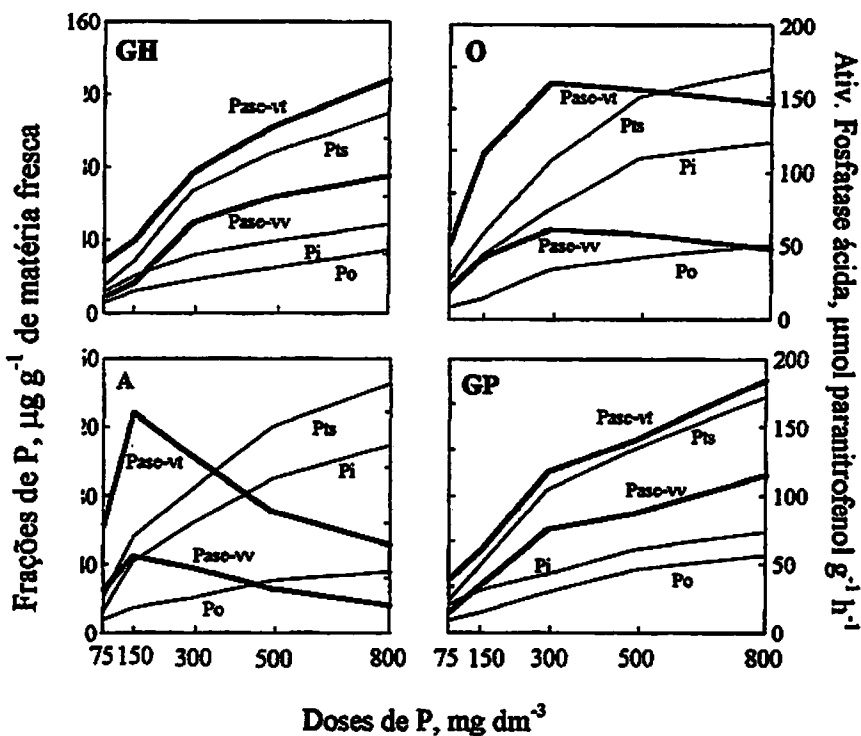


FIGURA 2. Fósforo total solúvel em ácido (Pts), P orgânico (Po), P inorgânico (Pi) e atividade de fosfatase ácida *in vivo* (Pase-vv) e *in vitro* (Pase-vt) nas folhas de feijoeiro cultivado nos solos Glei Húmico (GH), Orgânico, Aluvial (A) e Glei Pouco Húmico (GP), na ausência de calagem.

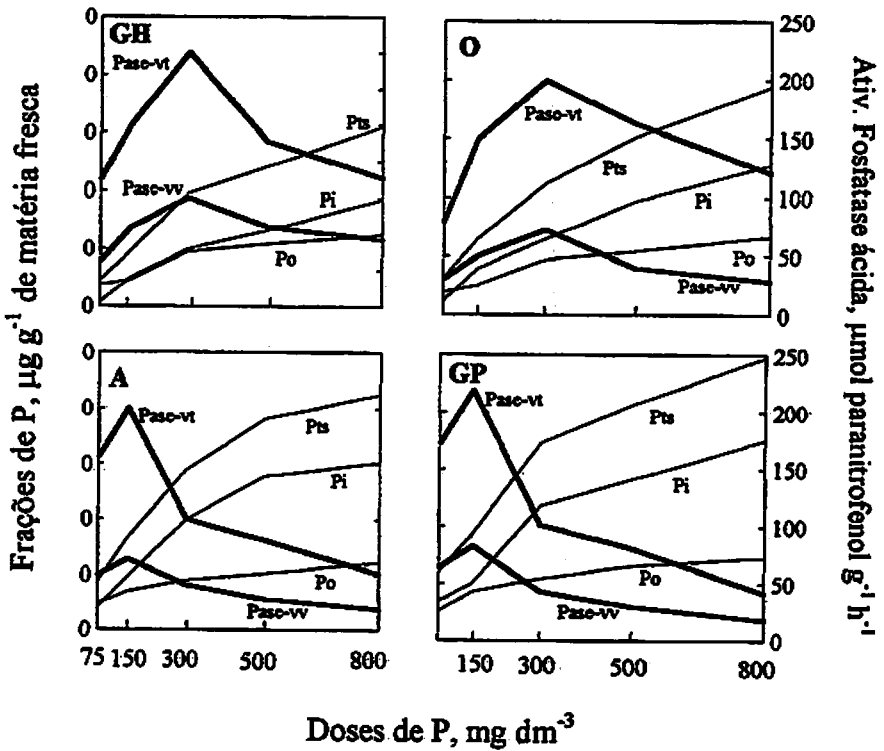


FIGURA 3. Fósforo total solúvel em ácido (Pts), P orgânico (Po), P inorgânico (Pi) e atividade de fosfatase ácida *in vivo* (Pase-vv) e *in vitro* (Pase-vt) nas folhas de feijoeiro cultivado nos solos Glei Húmico (GH), Orgânico, Aluvial (A) e Glei Pouco Húmico (GP), na presença de calagem.

(No presente estudo, verificou-se maior contribuição do Pi em relação ao Po, para o Pts (Figuras 2 e 3). Segundo Bielecki e Ferguson (1983), em termos quantitativos, em plantas bem supridas em P, o Pi é a fração que mais contribui, geralmente com mais de 50%) No entanto, na presença de calagem, maiores concentrações de Po em relação ao Pi foram verificadas para os solos GH, O e A na dose mais baixa de P (Figura 3), provavelmente devido à intensa

deficiência de fósforo observada para as plantas cultivadas nesses tratamentos. Este comportamento também foi observado por Hogue, Wilcox e Cantliffe (1970) em plantas de tomate deficientes em P.

→ (Pela substituição da dose de P estimada para 90% da máxima produção de MSGR nas equações da Tabela 6, estimaram-se os níveis críticos de Pts, Pi e Po) Na ausência de calagem, o solo GH apresentou os maiores níveis críticos de Pts, Pi e Po (Tabela 6). Esse comportamento se deve à dose elevada de P estimada para 90% da produção máxima, como verificado para o nível crítico de Pt, devido ao ajuste linear entre a MSGR e as doses de P. Na presença de calagem, verificaram-se maiores valores de níveis críticos de Pts, Pi e Po nos solos A e GP (Tabela 6), que apresentam menor fator capacidade de P. Fernandes et al. (1998) também verificaram maiores valores dessas frações de fósforo em plantas de feijoeiro cultivadas em solos de menor fator capacidade, quando corrigidos com calcário. Fabres et al. (1987) verificaram comportamento semelhante em plantas de alface cultivadas em dez latossolos de diferentes fator capacidade.

→ Os maiores valores de níveis críticos de Pi nos solos A e GP estão relacionados à menor capacidade de adsorção de P e, provavelmente, maiores concentrações de P lábil desses solos. Segundo Bielecki e Ferguson (1983), em condições de maior disponibilidade de P a planta acumula esse nutriente, na forma inorgânica, nos vacúolos. O Pi vacuolar tem a função de reserva e, se a quantidade de P absorvida for menor que a sua demanda pela célula, ele retorna ao citoplasma, atendendo à exigência metabólica da célula. Estudos com diversas espécies têm mostrado que a concentração de Pi no citoplasma é regulada pelo seu conteúdo no vacúolo, ocorrendo mudanças acentuadas no conteúdo de Pi das células, quase que exclusivamente no reservatório vacuolar, não havendo alterações significativas no reservatório citoplasmático (Po) (Bielecki, 1973; Lee e Ratcliffe, 1983).

No presente estudo, na ausência de calagem, os níveis críticos de Pts, Po e Pi apresentaram correlações significativas e positivas com a capacidade máxima de adsorção de P (Tabela 4), comportamento contrário ao esperado, possivelmente pelo efeito negativo do alumínio na absorção de P pelas plantas. Na presença de calagem, apenas o Pi correlacionou-se negativa e significativamente com a capacidade máxima de adsorção (Tabela 4), evidenciando, como discutido anteriormente, que essa fração é mais sensível a capacidade de adsorção de P pelos solos. Ainda na presença de calagem, as frações Pts e Pi correlacionaram-se positiva e significativamente com o P remanescente, indicando que este parâmetro pode ser utilizado no estabelecimento de unidades de solos para a interpretação de níveis críticos em plantas de feijoeiro.

As concentrações críticas das frações de P (Pts, Po e Pi) correlacionaram-se positiva e significativamente com a produção de MSGR, na ausência e presença de calagem (Tabela 5), indicando que essas frações podem ser utilizadas como indicativos da nutrição fosfatada, desde que, como comentado para o Pt, os atributos do solo, relacionados com o fator capacidade de P sejam considerados.

3.4 Atividade da fosfatase ácida

Para a atividade da fosfatase ácida, determinada *in vivo* e *in vitro*, a interação solo x calagem x fósforo foi significativa ($P < 0,01$) (Tabela 1A). Embora os valores tenham diferido em magnitude, as atividades da fosfatase ácida determinadas *in vivo* e *in vitro* apresentaram comportamentos semelhantes nas plantas de feijoeiro cultivadas nos solos estudados, na ausência e na presença de calagem (Tabela 5), em função das doses de P aplicadas (Figuras 2 e 3). Uma vez que a determinação da atividade da fosfatase ácida *in vivo* é mais simples e rápida do que a *in vitro*, a utilização daquela como parâmetro de

diagnóstico da nutrição das plantas de feijoeiro em P pode ser usada, a princípio, satisfatoriamente, necessitando de mais estudos.

Era esperada uma maior atividade da enzima nas doses mais baixas de P. No entanto, para os solos GH e GP, sem calagem, verificou-se um aumento da atividade da fosfatase ácida com o aumento das doses de P. Para os demais solos, na presença e ausência de calagem, a atividade aumentou da primeira para a segunda dose de P aplicada, exceto para o solo O, com calagem, em que a atividade aumentou até a terceira dose de P, para depois decrescer. Exceto para o solo GH, em que os teores das frações fosfatadas não foram suficientemente altos para inibir a atividade da fosfatase ácida (Figuras 2 e 3), com o aumento das frações de P houve um decréscimo da atividade. Segundo Reid e Bielecki (1970), o aumento da atividade da fosfatase ácida parece ocorrer em virtude de um incremento na "síntese de novo" da enzima, cuja formação é inibida pelo íon fosfato por um mecanismo de retroinibição.

A menor atividade verificada nas doses mais baixas de P aplicadas se devem, provavelmente, às alterações no metabolismo normal das plantas, decorrentes da nutrição fosfatada. Na época da determinação da atividade da fosfatase ácida, as plantas cultivadas nas doses mais baixas, 75 e 150 mg dm⁻³ de P, apresentavam sintomas visuais típicos de deficiência de P.

Ascencio (1994) verificou maior atividade da fosfatase ácida *in vivo* em plantas de feijoeiro aos 21 dias de idade quando foram cultivadas na ausência de P, porém aos 28 dias a atividade foi menor do que no tratamento com P. Comportamento semelhante foi verificado por Fernandez e Ascencio (1994) em raízes de feijoeiro. Esses últimos autores atribuíram a menor atividade da fosfatase ácida no tratamento sem P em relação ao tratamento com P, à menor concentração de proteínas ou ao tempo de resposta ao estresse de P no interior dos tecidos das plantas. Segundo Ascencio (1994), a idade, o estágio de crescimento, o número de dias sob estresse e o tempo após o início do estresse

metabólico de P devem ser considerados para que a atividade da fosfatase seja utilizada como uma ferramenta de diagnose da nutrição fosfatada.

Fernandes et al. (1998) não verificaram diferenças estatísticas entre a atividade da fosfatase ácida em folhas de feijoeiro cultivado com e sem P e atribuíram esse comportamento a alterações metabólicas decorrentes da deficiência de P nas plantas cultivadas sem aplicação desse nutriente.

É interessante destacar que na dose intermediária de P aplicada, 300 mg dm⁻³, as plantas ainda responderam à adubação fosfatada quanto à produção de MSGR, embora as plantas não apresentassem sintomas visuais de deficiência de P. Nesta dose, a atividade da fosfatase ácida foi elevada em relação à verificada nas doses de 500 e 800 mg dm⁻³. Neste caso, em que o P não está numa concentração tão baixa que prejudique os processos metabólicos normais da planta, a determinação da atividade da fosfatase ácida pode ser utilizada como uma ferramenta de diagnose da nutrição fosfatada. Para as doses mais baixas, para que a atividade da fosfatase seja utilizada como uma ferramenta de diagnose do estado nutricional das plantas, sua determinação deve ser realizada quando as plantas ainda não apresentem sintomas visuais de deficiência de P.

A atividade da fosfatase ácida *in vivo* e *in vitro*, na ausência de calagem, apresentou correlação positiva e significativa com a produção de MSGR e com as frações de P (Tabela 5), indicando que, nessa condição, o aumento da concentração de fósforo na planta aumenta a atividade da fosfatase ácida. Na presença de calagem, somente a atividade da fosfatase ácida *in vitro* apresentou correlação significativa, a 10%, e negativa com o Po e Pi. A baixa ou a ausência de correlação significativa entre a atividade da fosfatase ácida e a produção de MSGR e as frações de P, nesta condição em que o P era o único fator limitante, podem ser explicadas pelo aumento da atividade da enzima com o aumento das doses de P, até a segunda ou terceira dose (Figura 3), para depois decrescer, nas doses mais elevadas.

4 CONCLUSÕES

1. Na presença de calagem, as concentrações das frações de fósforo nos tecidos vegetais das plantas de feijoeiro foram influenciadas pelos atributos do solo que refletem a poder tampão de fósforo;
2. Os níveis críticos das frações de P no feijoeiro cultivado respectivamente nos solos Glei Húmico, Orgânico, Aluvial e Glei Pouco Húmico, sem calagem, foram: Pt=2,3, 2,2, 2,0, e 1,3 mg g⁻¹; Pts=110, 67, 78 e 63; Po=32, 19, 20 e 21 e Pi=77, 47, 58 e 43 µg g⁻¹. Com calagem, de maneira similar, os níveis críticos foram: Pt=2,8, 3,0, 3,5 e 4,2 mg g⁻¹; Pts=105, 96, 130 e 154; Po=47, 38, 42 e 52 e Pi=59, 58, 88 e 103 µg g⁻¹.
3. A atividade da fosfatase ácida determinada *in vivo* apresentou comportamento semelhante à *in vitro*. Na presença de calagem não houve correlação significativa para a atividade dessa enzima com a produção de matéria seca de grãos e frações de fósforo nas folhas de feijoeiro.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.; BRAGA, J.M.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; RIBEIRO, A.C.; DEFELIPO, B.V. Associação de fertilidade do solo: metodologia. In. SIMPÓSIO DA PESQUISA NA UFV, 1, 1988. Viçosa. Resumo... Viçosa: UFV, 1988. p.68-69.

- ALVES, V.M.C.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.** Efeito do alumínio sobre a absorção de fósforo e sobre a composição mineral de duas cultivares de trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.23, n.6, p.563-573, jun. 1988.
- ANDRADE, C.A. de B.** Limitações de fertilidade e efeito do calcário para o feijoeiro em solos de várzea do sul de Minas Gerais. Lavras:UFLA, 1997. 107p. (Tese - Doutorado em Fitotecnia).
- ASCENCIO, J.** Acid phosphatase as a diagnostic tool. *Communication in Soil Science and Plant Nutrition*, New York, v.25, n.9/10, p.1553-1564, 1994.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A.C.** Relações entre adsorção e componentes mineralógicos da fração argila de latossolos do Planalto Central. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.7, n.3, p.221-226, set./dez. 1983.
- BESFORD, R.T.** Phosphorus nutrition and acid phosphatase activity in the leaves of seven plant species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, London, v.30, n.3, p.281-285, Mar. 1979.
- BIELESKI, R.L.** Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. *Annual Review of Plant Physiology*, Palo Alto, v.24, p.225-252, 1973.
- BIELESKI, R.L.; FERGUNSON, J.B.** Physiology and metabolism of phosphate and its compounds. In: **PIRSON, A.; ZIMMERMANN, M.H.** *Encyclopedia of plant physiology: inorganic plant nutrition*. Berlin: Springer Verlag, 1983. p.422-4490. (New series, V.15A).
- CHISHOLM, R.H.; BLAIR, G.J.; BOWDEN, J.W.; BOFINGER, V.J.** improved of "critical" phosphorus concentration from considerations of plant phosphorus chemistry. *Communication in Soil Science and plant Analysis*, New York, v.12, p.1059-1065, 1981.
- DAY, P. R.** Particle fractionation and particle-size analysis. In: **BLACK, C. A.** (ed.) *Methods of soil analysis*. Madison: ASA, 1965. v.1, p.545-566.
- 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 fósforo 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.

FAQUIN, V.; ANDRADE, C.A.B.; FURTINI NETO, A.E.; ANDRADE, A. T.; CURI, N. Resposta do feijoeiro à aplicação de calcário em solos de várzea do Sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, n.2, p.651-660, maio/ago. 1998.

FERNANDES, L.A.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; GUEDES, G.A.A.; LIMA, J.M. Fósforo e atividade da fosfatase ácida em plantas de feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.33, n.5, p.769-778, maio 1998.

FERNANDEZ, D.S.; ASCENCIO, J. Acid phosphatase activity in bean and cowpea plants grown under phosphorus stress. *The Journal of Plant Nutrition*, New York, v.17, n.2/3, p.229-241, 1994.

FURTINI NETO, A.E.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; OLIVEIRA, M.F.G. Frações de fosfatadas em mudas de *Eucalyptus*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, n.2, p.267-274, abr./jun.1998.

HEILMAN, M.D.; CARTER, D.L.; GONZALES, C. L. The ethylene glycol monoethyl ether (EMEG) technique for determining soil surface area. *Soil Science*, Baltimore, v.100, p.409-413, 1965.

▷ HOGUE, E.; WILCOX, G.E.; CANTLIFFE, D.J. Effect of soil phosphorus levels on phosphate fractions in tomato leaves. *The Journal of America Society of Horticulture Science*, New York, v.95, p.174-176, mar. 1970.

HOLFORD, I.C.R.; MATTINGLY, G.E.G. Effects of phosphate buffering on the of labile phosphate by soil test. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, v.17, n.4, p.377-389, Dec. 1979.

LEE, C.R. influence of aluminum on plant growth and mineral nutrition of potatoes. *Agronomy Journal*, Madison, v.63, n.4, p.604-608, Sept./Oct. 1971.

LEE, R.B.; RATCLIFFE, R.G. Phosphorus nutrition and the intracellular distribution of inorganic phosphate in pea root tips: a quantitative study using ^{31}P -RMN. *Journal of Experimental Botany*, London, v.34, n.146, p.1222-1244, Sept. 1983.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de Avaliação do estado nutricional das plantas - princípios e aplicações. Piracicaba: Potafos, 1997. 289p.

▷ MARTINEZ, H.E.P. Cinética da absorção e das frações fosfatadas em sete variedades de soja [*Glycine max* L. (Merrill)]. Viçosa: UFV, 1992. n.p. (Relatório Final de Pós-Doutoramento).

MEHRA, O. P.; JACKSON, N. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clays Minerals*, Clarkson, v.3, p.317-327, 1960.

MIRANDA, L.N.; VOLKWEISS, S.J. Relações entre a resposta da soja a adubação fosfatada e alguns parâmetros do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.5, n.1, p.58-63, jan./abr. 1981.

MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade do fósforo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.9, n.3, p.237-244, set./dez. 1985.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: UFV/DPS, 1999. 399p.

REID, M.S.M.; BIELESKI, R.L. Changes in phosphatase activity in phosphorus deficient Spirodela. *Planta*, Berlin, v.94, p.273-284, 1970.

RORISON, I.H. the effect of aluminum on the uptake and incorporation of phosphate by excised sainfoin roots. *The New Physiology*, v.64, n.1, p.23-27, jan. 1965.

SANTOS, C.D. Fisiologia e bioquímica da digestão em *Erinniy ello* (Lepidoptera: Sphingidae). São Paulo:USP, 1985. 178p. (Tese - Doutorado em Bioquímica).

SILVA, F.C.; BASSO, L.C. Avaliação da atividade in vivo da fosfatase ácida da folha na diagnose da nutrição fosfórica em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.17, n.3, p.371-375, set/dez 1993.**

✓ **SMILLE, R.M.; KROTKOV, G.** The estimation of nucleic acids in some algae and higher plants. **Canadian Journal of Botany, Ottawa, v.38, n.1, p.31-49, Jan. 1960.**

WHITE, R.E.; TIFFIN, L.O.; TAYLOR, A.W. The existence of polymeric complexes in dilute solutions of aluminum and orthophosphate. **Plant and Soil, The Hague, v.45, n.3, p.521-529, 1976.**

CAPÍTULO 3

FORMAS DE ALUMÍNIO, DE FÓSFORO E FOSFATASE ÁCIDA EM SOLOS DE VÁRZEA CULTIVADOS COM FEIJOEIRO

RESUMO

Conduziu-se um experimento em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, com os objetivos verificar a influência da aplicação de calcário e de fósforo em algumas formas de alumínio e de fósforo e na atividade da fosfatase ácida em quatro solos de várzea, e estimar a capacidade de diferentes extratores de fósforo em prever a disponibilidade desse nutriente para o feijoeiro. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial $4 \times 5 \times 2$, com quatro repetições, sendo quatro solos [Glei Húmico (GH), Glei Pouco Húmico (GP), Aluvial (A) e Orgânico (O)], cinco doses de P (75, 150, 300, 500 e 800 mg dm⁻³ de P) e dois níveis de calagem (sem e com). Cada parcela foi constituída por um vaso com três dm³, onde cultivaram-se três plantas, sendo uma planta colhida no florescimento e as duas restantes no final do ciclo. Pelos resultados obtidos, verificou-se que a aplicação de calcário e de P alterou as formas de Al e de P dos solos, sendo que, na ausência de calagem, o fator limitante à produção do feijoeiro foi a toxidez por Al e não a disponibilidade de P. Os extratores Resina e Olsen foram eficientes em prever a disponibilidade de P às plantas de feijoeiro, enquanto a atividade da fosfatase ácida foi mais relacionada com o teor de matéria orgânica dos solos do que com a disponibilidade de fósforo.

ABSTRACT

An experiment was conducted in greenhouse of the Soil Science Department of the Universidade Federal de Lavras, with the objectives of verifying the influence of the application of limestone and phosphorus on some forms of aluminium and phosphorus and acid phosphatase activity in four lowland soils and estimating the capacity of different extractors of phosphorus in predicting the availability of that nutrient for bean plant. The experimental design utilized was the completely randomized in 4x5x2 factorial scheme, with four replications, being four soils [Gley Humic (GH), Bog Soil (O), Aluvial (A) and Low Humic Gley (GP)], five doses of P (75, 150, 300, 500 and 800 mg dm⁻³ of P) and two levels of liming (without and with). Each plot was made up of a three dm³ pot, where three plants were cultivated, one plant being harvested at flowering and the two remaining others at the end of the cycle. By the results obtained, it was verified that the application of limestone and P changed the forms of Al and P in the soils, and in the absence of liming, the factor limiting to bean plant production was Al toxicity and not P availability. The extractors Resin and Olsen were efficient in estimating the P availability to bean plants, whereas acid phosphatase activity was more related with the content of organic matter of the soils than with phosphorus availability .

1 INTRODUÇÃO

O cultivo do feijoeiro em solos de várzea apresenta-se como uma alternativa para maximizar a exploração desses solos na entressafra do arroz cultivado sob inundação. Andrade (1997) verificou que os elevados teores de alumínio trocável e a baixa disponibilidade de fósforo são os principais fatores limitantes ao cultivo do feijoeiro em quatro classes de solo de várzea representativas do Sul de Minas Gerais.

Embora seja evidente o efeito da matéria orgânica do solo sobre o alumínio trocável tóxico às plantas, alguns autores têm verificado efeito positivo da aplicação de calcário em solos de várzea, com elevados teores de matéria orgânica, quando são cultivados em condições de drenagem (Quaggio et al., 1985; Faquin et al., 1998).

O alumínio trocável do solo é constituído principalmente pelas formas monoméricas deste elemento, enquanto os polímeros inorgânicos e o alumínio complexado pela matéria orgânica constituem o alumínio não trocável (MacLean, 1973). Tanto as formas trocáveis quanto as não trocáveis têm sido igualmente referidas como alumínio ácido (Pionke e Corey, 1967) ou alumínio reativo (Juo e Kamprath, 1979), as quais, segundo os últimos autores, incluem, além do Al solúvel e do efetivamente trocável, os polímeros hidroxialumínio inorgânicos, positivamente carregados, adsorvidos aos colóides ou situados nas entrecamadas de vermiculita e montmorilonita, os íons Al^{3+} e íons hidroxialumínio associados à matéria orgânica, em formas de complexos orgânicos, e as formas amorfas, mais solúveis, de $Al(OH)_3$. As formas de alumínio não trocáveis, embora não exerçam efeitos fitotóxicos diretos, atuam no tamponamento do pH do solo e afetam a atividade do Al^{3+} na solução do solo

(Bloom, McBride e Weaver, 1979). Entretanto, não existe uma linha divisória nítida entre as formas trocável e não trocável, sendo essas normalmente diferenciadas em função do método usado na determinação (Pionke e Corey, 1967; Figueiredo e Almeida, 1991).

Além do alumínio, o fósforo é outro importante fator limitante ao cultivo dos solos de várzea em condições de drenagem, como verificado por Andrade (1997). Quando um solo sob inundação é drenado, ocorre a reoxidação dos constituintes reduzidos do solo com mudanças no Eh, pH e concentração de Fe^{+2} , diminuindo a solubilidade tanto do fósforo nativo do solo quanto do fósforo aplicado (Sayal e De Datta, 1991). Segundo Willet (1979), o decréscimo da disponibilidade de P no solo com a drenagem de solos inundados está associada ao aumento na adsorção de P, ocasionado pelo aumento da atividade dos óxidos de ferro em adsorver fósforo. Desse modo, deficiência de fósforo tem sido verificada em culturas de sequeiro em rotação com o arroz sob inundação (Willett, 1979; Sah e Mikkelsen, 1986a, 1986b).

Além das formas inorgânicas de fósforo, as formas orgânicas podem sofrer transformações com os ciclos de umedecimento e secagem do solo. O fósforo orgânico pode se constituir em uma importante fonte desse nutriente às plantas através de sua mineralização. Essa mineralização é mediada pelas fosfatases, enzimas que catalizam a hidrólise de ésteres de fosfatos, liberando fosfato solúvel. Essas enzimas são produzidas pelas plantas e microrganismos do solo e suas atividade podem ser influenciadas pelos diferentes atributos dos solos (Nahas, Centurion e Assis, 1994).

Neste contexto, e diante do potencial que representam os solos de várzea para o cultivo do feijoeiro e da carência de informações sobre o manejo da fertilidade desses solos em condições de drenagem, o presente estudo teve como objetivos verificar a influência da aplicação de calcário e de fósforo em algumas formas de alumínio e de fósforo e na atividade da fosfatase ácida em quatro

solos de várzea e estimar a capacidade de diferentes extratores de fósforo em prever a disponibilidade desse nutriente para o feijoeiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Esse experimento foi conduzido em subamostras dos solos dos vasos do experimento do capítulo 2, utilizando-se, portanto, o mesmo delineamento experimental inteiramente casualizado, arranjado em esquema fatorial (4x5x2) constando de quatro solos [Glei Húmico (GH), Orgânico (O), Aluvial (A) e Glei Pouco húmico (GP)], cinco doses de P (75, 150, 300, 500 e 800 mg.dm⁻³), com e sem calagem, com quatro repetições.

Após o período de incubação dos solos com os tratamentos, foram coletadas amostras de cada unidade experimental (vasos) para as determinações analíticas. Para a determinação da atividade da fosfatase ácida, foram utilizadas amostras úmidas, que após a coleta foram imediatamente submetidas ao processo analítico. Duplicatas de cada amostra foram coletadas para a determinação do grau de umidade dos solos. Para as demais determinações analíticas, as amostras foram secas ao ar e armazenadas para posterior análise.

2.1 Determinações analíticas

2.1.1 Carbono orgânico do solo e pH em água

O carbono orgânico foi determinado pelo método Walkley-Black, conforme descrito em EMBRAPA (1997), através da oxidação por dicromato de potássio em meio sulfúrico e o excesso de dicromato após a oxidação, titulado com sulfato ferroso. O pH em água também foi determinado segundo EMBRAPA (1997), na relação solo:água de 1:2,5.

2.1.2 Formas de alumínio do solo

As formas de alumínio no solo foram determinadas conforme metodologia descrita por Mendonça (1995). O alumínio solúvel foi extraído em água (Al-sol) por meio da lixiviação de 23 g de solo com 115 ml de água deionizada-destilada, por uma hora. Após a extração do Al-sol, as amostras de solo foram secas e o Al foi extraído com KCl 1 mol L⁻¹, LaCl₃ 0,33 mol L⁻¹, CuCl₂ 0,5 mol L⁻¹, Na₂P₂O₇ 0,025 mol L⁻¹ e oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ pH 3,0.

O alumínio extraído com a solução de KCl corresponde ao Al trocável (Al-troc). A diferença entre o teor de Al extraído com LaCl₃ e KCl corresponde ao Al reativo fracamente associado à matéria orgânica (Al-mo); a diferença entre o Al extraído com CuCl₂ e LaCl₃ às formas reativas fortemente associadas às formas orgânica e mineral (Al-reat); a diferença entre Al extraído com Na₄P₂O₇ e LaCl₃ corresponde ao Al não reativo fortemente complexado à matéria orgânica (Al-ñreat); e a diferença entre o teor de Al extraído com oxalato de amônio e pirofosfato de sódio, ao Al amorfo inorgânico (Al-amorfo).

Em todos os extratos, o alumínio foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica.

2.1.3 Fracionamento de fósforo no solo

O fracionamento das formas orgânicas e inorgânicas de fósforo no solo foi realizado conforme metodologia de Hedley, Steward e Chauhan (1982), adaptado por Pavan e Chaves (1996).

Por esse esquema de fracionamento sequencial, as formas de fósforo lábeis foram extraídas pela resina de troca aniônica (P-resina) saturada com bicarbonato; o P inorgânico (Pi-bicarb) e orgânico (Po-bicarb) adsorvido nas superfícies dos colóides foi extraído com NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ pH 8,5, e o P orgânico na biomassa microbiana (Po-microbial) com NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ pH

8,5, após tratamento com clorofórmio. As formas de fósforo pouco lábil, correspondentes às formas inorgânicas ligadas a Fe e Al (Pi-NaOH) e orgânicas (Po-NaOH), associadas com compostos húmicos, foram extraídas com NaOH 0,1 mol L⁻¹. As formas de P inorgânicas (Pi-sonif) e orgânicas (Po-sonif), localizadas na superfície interna dos agregados do solo, foram extraídas por ultra-sonificação residuo do extrato de NaOH 0,1 mol L⁻¹. As formas relativamente insolúveis (fósforo não lábil), associadas com cálcio, foram extraídas com HCl mol L⁻¹ (Pi-HCl) e o P residual (P-residual), contendo as formas mais estáveis de Po e insolúveis de Pi, foi extraído por digestão com H₂SO₄ concentrado e H₂O₂. Em todos os extratos de solo, o fósforo foi determinado por colorimetria, conforme Murphy e Riley (1962).

2.1.4 Fósforo pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1, Resina e Olsen

Para os extratores Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ e H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹) (EMBRAPA, 1997), Mehlich-3 (CH₃COOH 0,2 mol L⁻¹; NH₄NO₃ 0,025 mol L⁻¹; NH₄F 0,015 mol L⁻¹; HNO₃ 0,013 mol L⁻¹ e EDTA 0,001 mol L⁻¹) (Mehlich, 1984), Bray-1 (HCl 0,025 mol L⁻¹ e NH₄F 0,03 mol L⁻¹) (Bray e Kurtz, 1945) e Olsen (NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ pH 8,5) (Olsen et al., 1954), foram utilizados 10 cm³ de solo (TFSA) e 100 mL da solução extratora correspondente à cada extrator, sendo o tempo de contato solo/solução extratora de cinco minutos.

O fósforo extraído pela extrator Resina de troca iônica foi determinado conforme Rajj, Quaggio e Silva (1986).

2.1.5 Atividade da fosfatase ácida do solo

A atividade da fosfatase ácida foi determinada a partir de amostras de solo de 0,2 cm³ (grau de umidade da época de amostragem), com base no procedimento de Tabatabai e Bremner (1969), modificado por Nahas, Centurion e Assis (1994).

2.2 Avaliação do experimento

Todas as variáveis foram submetidas à análise de variância e equações de regressão foram ajustadas entre essas variáveis (dependentes) e as doses de fósforo aplicadas (variável independente). Substituindo, nessas equações, as doses de P para 90% da produção máxima de matéria seca de grãos do feijoeiro (Tabela 2, Capítulo 2), estimou-se o valor de cada variável correspondente a esse nível de produção, dentro de cada solo e nível de calagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Formas de Alumínio no solo

Para as formas de alumínio, Al trocável (Al-troc), Al em solução (Al-sol), Al reativo fracamente associado à matéria orgânica (Al-mo), Al reativo fortemente associado à matéria orgânica (Al-reat), Al não reativo associado à matéria orgânica (Al-ñreat) e Al amorfo (Al-amorfo); e pH em água (pH) e matéria orgânica do solo (MOS), a interação solo x calagem x fósforo foi significativa ($P < 0,01$) (Tabelas 2A e 3A).

Equações de regressão foram ajustadas para as formas de Al, pH e MOS como variáveis dependentes das doses de P aplicadas, para cada solo e nível de calagem. Substituindo-se, nessas equações, as doses de P para 90% da produção máxima de matéria seca de grãos do feijoeiro (Tabela 2, Capítulo 2), estimaram-se os valores das formas de Al, matéria orgânica e pH, correspondentes a esse nível de produção. Para aquelas variáveis em que não houve efeito significativo entre as doses de P aplicadas, para estimar esses valores, considerou-se a média dos valores obtidos nas doses de P aplicadas, para cada solo e nível de calagem.

Com a calagem, em todos os solos, não se obteve Al na forma trocável (Tabela 1). Com a remoção de íons H da solução do solo, o valor de pH

aumenta, enquanto o Al-troc vai sendo hidrolisado, resultando em $(Al(H_2O)_5OH)^{2+}$ e $(Al(H_2O)_4(OH)_2)^+$. Esses monômeros de Al, não estando sujeitos à quelação pela matéria orgânica do solo, são polimerizados nas superfícies dos minerais de argila, não mais fazendo parte da acidez trocável do solo (McLean, 1973). Dependendo do pH, poderá ocorrer a hidrólise completa do Al na forma de $Al(OH)_3 \cdot 3H_2O$.

Pelas equações ajustadas (Tabela 1), verifica-se que, na ausência de calagem, os valores de Al-troc para os solos decresceram na seguinte ordem: GH > GP > O > A. Os maiores valores observados nos solos GH e GP foram, provavelmente, responsáveis pela reduzida produção de matéria seca de grãos do feijoeiro em relação aos solos O e A (Tabela 2, Capítulo 2). Verifica-se que, na dose de P correspondente a 90% da produção máxima de matéria seca de grãos do feijoeiro, o valor de Al-troc no solo GH foi 90, 463 e 29% superior àqueles estimados para os solos O, A e GP, respectivamente (Tabela 1), ao passo que, para o solo GP, esse valor foi 47 e 337% superior àqueles verificados para os solos O e A, respectivamente (Tabela 1).

Quanto ao solo O, embora tenha apresentado valores considerados médios de Al-troc (Comissão..., 1989), a produção de matéria seca de grãos foi significativamente maior do que aquelas obtidas nos solos GH e GP (Tabela 2, Capítulo 2).

No presente estudo, verificou-se correlação negativa e significativa entre os valores de Al-troc e a produção de matéria seca de grãos (MSGR), produção de matéria seca total da parte aérea (MSTO) e P acumulado na MSTO (P-MSTO), obtidos na dose de P correspondente a 90% da produção máxima de MSGR (Tabela 2), evidenciando o efeito negativo do Al no crescimento e nutrição do feijoeiro. Também Alves et al. (1988) verificaram, em cultivares de trigo, que o Al influenciou de modo negativo a absorção e translocação de fósforo.

ABELA 1. Equações de regressão ajustadas para alumínio trocável (Al-troc) (Y), cmol_c dm⁻³, como variável dependente das doses de P aplicadas (X), mg dm⁻³, sem e com aplicação de calcário e os respectivos valores de Al-troc, cmol_c dm⁻³, correspondentes as doses de P para 90% da produção máxima.

Solo	Equação	R ²	Al-troc
Sem calagem			
GH	Y=1,69	-	1,69
O	Y=0,89	-	0,89
A	Y=0,4828-0,0079**X ^{0,5} -0,00014**X	0,99	0,30
GP	Y=1,31	-	1,31
Com calagem			
GH	Y=0,0	-	0,00
O	Y=0,0	-	0,00
A	Y=0,0	-	0,00
GP	Y=0,0	-	0,00

** significativo a 1% pelo teste de t.

TABELA 2. Coeficientes de correlação entre os valores das formas de Al, pH e matéria orgânica do solo (MOS) com a produção de matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca total da parte aérea (MSTO) e acúmulo de P na MSTO (P-MSTO) na dose de P correspondente a 90% da produção máxima do feijoeiro, em quatro solos de várzea.

	Al-troc	Al-sol	Al-mo	Al-reat	Al-fireat	Al-amorfo	MOS	pH
MSGR	-0,93**	-0,94**	-0,15ns	-0,27ns	-0,06ns	0,10ns	-0,42ns	0,90**
MSTO	-0,94**	-0,97**	-0,02ns	-0,14ns	-0,11ns	0,21ns	0,92**	-0,31ns
P-MSTO	-0,88**	-0,89**	-0,21ns	-0,37ns	-0,24ns	-0,03ns	0,91**	-0,39ns
Al-troc	1,00**	0,90**	0,03ns	0,18ns	0,19ns	-0,17ns	-0,84**	0,39ns
Al-sol	-	1,00**	-0,06ns	-0,30ns	0,06ns	-0,37ns	-0,88**	0,13ns
Al-mo	-	-	1,00**	0,80**	-0,37ns	0,56ns	-0,06ns	0,36*
Al-reat	-	-	-	1,00**	-0,04ns	0,79**	-0,19ns	0,87**
Al-fireat	-	-	-	-	1,00**	0,02ns	-0,32ns	-0,28ns
Al-amorfo	-	-	-	-	-	1,00**	0,73ns	0,61*
MOS	-	-	-	-	-	-	1,00**	-0,23ns

** , * e ns significativo ao nível de 1 e 5% e não significativo, respectivamente pelo teste de t.

Com o aumento das doses de P, verificou-se apenas para o solo A, na ausência de calagem, uma redução significativa nos valores de Al-troc (Tabela 1). Para esse solo, devido a sua menor capacidade máxima de adsorção de P em relação aos solos GH e O (Tabela 1, Capítulo 2), o P neutralizou parte dessa forma de Al, possivelmente pela maior concentração de íons fosfatos em solução.

Os maiores valores de Al-troc obtidos no solo GH (Tabela 1), com elevado teor de matéria orgânica em relação aos demais solos estudados (Tabela 1, Capítulo 2), não concorda com a observação de Hargrove e Thomas (1981), segundo a qual, solos com elevados teores de matéria orgânica possuem menores teores de Al-troc. Também Evans e Kamprath (1970) e Clark e Nichol (1966) encontraram menores teores de Al-troc em solos com maiores teores de matéria orgânica, mesmo quando os valores de pH desses solos eram significativamente inferiores aos dos solos com os menores teores. Por outro lado, Pavan (1983) encontrou maiores teores de Al-troc em solos Orgânicos do que em solos minerais.

De maneira semelhante ao observado para o Al-troc, não se detectou o Al-sol nos tratamentos que receberam aplicação de calcário, provavelmente pela sua neutralização pela elevação do pH dos solos (Tabela 3). Pelas equações ajustadas, na ausência de calagem os valores de Al-sol para os solos decresceram na seguinte ordem: GP > GH > O > A (Tabela 3). Segundo a teoria de Hargrove e Thomas (1981), seria esperado um menor teor de Al-sol nos solos GH e O, que apresentam maiores teores de matéria orgânica. Segundo esses autores, a qualquer valor de pH, pequenos aumentos nos teores de matéria orgânica do solo causam uma redução significativa da quantidade do Al em solução, diminuindo o efeito tóxico dessa forma de Al para as plantas. No entanto, pelas equações ajustadas para o solo GH, os valores de Al-sol foram superiores àqueles verificados para os solos O e A (Tabela 3).

TABELA 3. Equações de regressão ajustadas para alumínio em solução (Al-sol) (Y), $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, como variável dependente das doses de P aplicadas (X), mg dm^{-3} , sem e com aplicação de calcário e os respectivos valores de Al-sol, $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, correspondentes a dose de P para 90% da produção máxima.

Solo	Equação	R ²	Al-sol
Sem calagem			
GH	$Y=4,0717-0,0004**X+0,0000002**X^2$	0,99	0,33
O	$Y=0,02348-0,00019**X$	0,97	0,17
A	$Y=0,1624-0,00017**X$	0,99	0,11
GP	$Y=0,6447-0,0004**X$	0,96	0,48
Com calagem			
GH	Y=0,0	-	0,00
O	Y=0,0	-	0,00
A	Y=0,0	-	0,00
GP	Y=0,0	-	0,00

** significativo a 1% pelo teste de t.

Com o aumento das doses de P, verificou-se uma redução significativa do Al-sol em todos os solos (Tabela 3), provavelmente pela precipitação do Al com os íons fosfatos, como verificado, também, para o Al-troc no solo A (Tabela 1). Verificaram-se, também, correlações negativas e significativas entre os valores de Al-sol e a MSGR, MSTO e P-MSTO estimados na dose de P correspondente a 90% da produção máxima de grãos e, ainda, correlação positiva e significativa com os valores de Al-troc, devido a uma estreita relação entre essas formas de Al (Tabela 2).

Khalid e Silva (1979), trabalhando com milho e trevo branco, e Shuman et al. (1990), com sorgo, verificaram que o Al-sol foi a forma de Al que melhor se correlacionou com a produção das plantas, embora esses autores tenham utilizado uma solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ para extrair o Al-sol.

Para as formas de Al associadas à matéria orgânica na ausência de calagem, verifica-se, pelas equações ajustadas, que os valores de Al-mo para os

solos decresceram na seguinte ordem: GP > O > GH > Al (Tabela 4), enquanto que, para o Al-reat foram: GH > O > A > GP (Tabela 5). Com o aumento das doses de P aplicadas, independente da calagem, ocorreu uma elevação dos valores de Al-mo e Al-reat no solo GH, enquanto, para os demais solos, não houve efeito significativo das doses de P sobre essas formas de Al (Tabelas 4 e 5). Esse fato pode ser explicado pelo favorecimento da adubação fosfatada na mineralização da MOS durante o período de incubação dos solos. Para o solo GH, foi verificada uma redução significativa nos valores de MOS (Tabela 6) e uma diminuição dos valores de pH (Tabela 7) com o aumento das doses de P aplicadas. A aplicação de P provavelmente estimulou a atividade dos microrganismos do solo responsáveis pela mineralização da MOS. Guerra et al. (1995) e Fernandes et al. (1998) verificaram que, com a aplicação de P aumentava o P imobilizado na biomassa microbiana do solo, indicando um aumento da atividade dos microrganismos do solo em condições de maior disponibilidade de P.

O aumento dos valores de Al-mo e Al-reat com a mineralização da MOS, segundo Mendonça (1995), pode ser atribuído à passagem do Al não reativo associado à MOS para formas mais reativas. Esse autor, estudando a oxidação da matéria orgânica do solo e sua relação com diferentes formas de Al em Latossolos, verificou que, com a oxidação da matéria orgânica, parte do Al não reativo fortemente complexado à matéria orgânica passou para formas reativas associadas à matéria orgânica.

TABELA 4. Equações de regressão ajustadas para alumínio reativo fracamente associado à matéria orgânica (Al-mo) (Y), cmol_c dm⁻³, como variável dependente das doses de P aplicadas (X), mg dm⁻³, sem e com aplicação de calcário e os respectivos valores de Al-mo, cmol_c dm⁻³, correspondentes a dose de P para 90% da produção máxima.

Solo	Equação	R ²	Al-mo
Sem calagem			
GH	Y=4,0717+0,0111**X-0,000006**X ²	0,99	4,17
O	Y=4,30	-	4,30
A	Y=3,30	-	3,30
GP	Y=4,29	-	4,29
Com calagem			
GH	Y=3,2919+0,0012**X	0,94	7,91
O	Y=2,55	-	2,55
A	Y=2,55	-	2,23
GP	Y=4,05	-	4,05

** significativo a 1% pelo teste de t.

TABELA 5. Equações de regressão ajustadas para alumínio reativo fortemente associado a matéria orgânica (Al-reat) (Y), cmol_c dm⁻³, como variável dependente das doses de P aplicadas (X), mg dm⁻³, sem e com aplicação de calcário e os respectivos valores de Al-reat, cmol_c dm⁻³, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima.

Solo	Equação	R ²	Al-reat
Sem calagem			
GH	Y=20,9718+0,03119**X	0,99	43,89
O	Y=29,44	-	29,44
A	Y=18,13	-	18,13
GP	Y=9,00	-	9,00
Com calagem			
GH	Y=7,3705+3,6953**X ^{0,5} -0,0511**X	0,98	63,12
O	Y=16,08	-	16,08
A	Y=6,46	-	6,46
GP	Y=5,09	-	5,09

** significativo a 1% pelo teste de t.

TABELA 6. Equações de regressão ajustadas para matéria orgânica do solo (MOS) (Y), g kg⁻¹, como variável dependente das doses de P aplicadas (X), mg dm⁻³, sem e com aplicação de calcário e os respectivos valores de MOS, g kg⁻¹, correspondentes a dose de P para 90% da produção máxima.

Solo	Equação	R ²	MOS
Sem calagem			
GH	Y=241,274-0,1307**X+0,00007**X ²	0,99	183,03
O	Y=43,15	-	43,15
A	Y=34,00	-	34,00
GP	Y=35,40	-	35,40
Com calagem			
GH	Y=190,204-0,0761**X	0,95	155,20
O	Y=46,2233-1,1296**X ^{0,5} +0,0183**X	0,99	32,16
A	Y=34,30	-	34,30
GP	Y=34,90	-	34,90

** a 1% e não significativo pelo teste de t, respectivamente.

TABELA 7. Equações de regressão ajustadas para pH em água (pH) (Y), como variável dependente das doses de P aplicadas (X), mg dm⁻³, sem e com aplicação de calcário e os respectivos valores de pH, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima.

Solo	Equação	R ²	pH
Sem calagem			
GH	Y=4,4619-0,00025**X	0,95	4,28
O	Y=4,65	-	4,65
A	Y=4,45	-	4,45
GP	Y=4,44	-	4,44
Com calagem			
GH	Y=5,8669-0,0005**X	0,99	5,60
O	Y=5,76	-	5,76
A	Y=5,96	-	5,96
GP	Y=5,84	-	5,84

** significativo a 1% pelo teste de t

Com a calagem, verifica-se, pelas equações ajustadas, que os valores de Al-mo para os solos decresceram na seguinte ordem: GH > GP > O > A (Tabela 4), enquanto que, para o Al-reat foram: GH > O > A > GP (Tabela 5). Na dose correspondente a 90% da produção máxima de grãos do feijoeiro, o valor do Al-mo no solo GH foi 3,1, 3,6 e 2,0 vezes superior aos valores estimados para os solos O, A e GP, respectivamente (Tabelas 4).

Pelas equações ajustadas para o solo GH, verifica-se que ocorreu um aumento dos valores de Al-mo e Al-reat com a calagem, enquanto, para os demais solos houve uma redução (Tabelas 4 e 5). Além da calagem, os valores de Al-mo e Al-reat também aumentaram com as doses crescentes de P (Tabelas 4 e 5). Como para solo GH a aplicação de calagem e de doses crescentes de P favoreceram a oxidação da matéria orgânica (Tabela 6), a passagem do Al não reativo associado à MOS para formas mais reativas deve ter ocorrido. Para o solo O, embora tenha sido verificada uma redução significativa nos teores de MOS com a calagem (Tabela 6), houve uma redução dos valores de Al-mo e Al-reat (Tabelas 4 e 5). Também Mendonça (1995), trabalhando com dois Latossolos, verificou que no Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa, o aumento da intensidade de oxidação da matéria orgânica acarretou aumento nos teores das formas de Al reativas fraca e fortemente associadas à matéria orgânica, enquanto, para o Latossolo Vermelho-Escuro textura média, ocorreu o contrário. Interessante ressaltar que no presente estudo, o solo GH possui textura argilosa e o O, média, indicando uma possível relação entre essas formas de alumínio e a textura do solo.


Considerando que durante o cultivo do feijoeiro, provavelmente ocorreu uma continuação do processo de oxidação da matéria orgânica e certamente uma diminuição do pH do solo, uma vez que as leguminosas têm grande potencial de acidificação da solo (Rao et al., 1997), parte do Al-mo pode ter passado para formas tóxicas às plantas, como sugerido por Mendonça (1995). Nesse caso, o

maior valor dessa forma de Al no solo GH pode ter sido o responsável pela menor produção do feijoeiro nesse solo na presença de calagem, em relação aos demais solos estudados (Tabela 2, Capítulo 2), uma vez que, nessa condição, houve uma neutralização completa do Al-troc e Al-sol (Tabelas 1 e 3), como já discutido.

Bloom, McBride e Weaver (1979) e Walker, Cronan e Bloom (1990) verificaram que o Al associado à matéria orgânica teve um importante papel no controle do Al na solução do solo em horizontes superficiais de solos minerais e em horizontes orgânicos de solos florestais, respectivamente. Segundo os autores, esta forma de Al está ligada aos grupos carboxílicos dos compostos orgânicos e, embora seja menos reativa que o Al das argilas, é mais reativa que o Al não cristalino e cristalino dos hidróxidos de Al e aluminossilicatos. No entanto, Clark e Nichol (1966) e Hargrove e Thomas (1981) verificaram que plantas de cevada e de milho, respectivamente, cresceram satisfatoriamente em solos Orgânicos ácidos em relação aos solos minerais, mesmo com valores de pH inferiores aos dos solos minerais. Segundo Clark e Nichol (1966), com o aumento da matéria orgânica ocorre uma remoção do alumínio em solução, dispensando, inclusive, a aplicação de calcário nesses solos.

No presente estudo, verificou-se correlação positiva e significativa entre os valores de Al-mo e Al-reat, porém, não foi verificada correlação significativa entre os valores dessas formas de Al com a MSGR, MSTO e P-MSGR, estimados na dose de P correspondente a 90% da produção máxima de grãos (Tabela 2).

Pelas equações ajustadas para o Al-ñreat, verifica-se que, na ausência de calagem, os valores dessa forma de Al para os solos decresceram na seguinte ordem: O > A > GH > GP (Tabela 8). Com a calagem, ocorreu uma diminuição dos valores de Al-ñreat, sendo os valores, em ordem decrescente para os solos:



O > A > GH > GP (Tabela 8). Para o solo GH verificou-se, também, na presença de calagem, uma redução dos valores de Al-ñreat com o aumento das doses de P aplicadas.

Os menores valores de Al-ñreat obtidos quando da aplicação de calcário e de P para o solo GH em relação ao solo A, se devem, provavelmente, a uma intensificação do processo de oxidação da matéria orgânica (Tabela 6), resultando na passagem do Al não reativo para formas mais reativas (Mendonça, 1995). Para o solo O, embora tenha sido observada uma redução significativa dos valores de matéria orgânica com a aplicação de calcário e P (Tabela 6), os valores de Al-ñreat ainda foram maiores do que aqueles observados para os demais solos estudados pelo fato do solo O apresentar teores mais elevados dessa forma de Al na ausência de calagem (Tabela 8). Embora no presente trabalho, os valores de Al-ñreat não terem apresentado correlações significativas com a MSGR, MSTO e P-MSTO, estimados na dose de P correspondente a 90% da produção máxima de grãos (Tabela 2), Jersak e McColl (1989) verificaram que esta forma de Al contribuiu para as formas lábeis desse elemento em horizontes superficiais de solos sob floresta.

Na ausência de calagem, pelas equações ajustadas, verifica-se que os valores de Al-amorfo para os solos decresceram na seguinte ordem: GH > O > A > GP (Tabela 9). Na dose de P, correspondente a 90% da produção máxima de matéria seca de grãos de feijoeiro, o valor de Al-amorfo para o solo GH foi 32, 192 e 329% superior àqueles estimados para os solos O, A e GP, respectivamente, enquanto, para o solo Orgânico, esse valor foi, respectivamente, 122 e 217% superior àqueles estimados para os solos A e GP (Tabela 9). Os maiores valores de Al-amorfo verificados nos solos GP e O podem contribuir para os maiores valores de capacidade máxima de adsorção de P desses solos em relação aos solos A e GP (Tabela 1, Capítulo 2). Kawai (1980) e Alvarado e Buol (1985) verificaram uma correlação positiva e

significativa entre o Al-amorfo, extraído pelo oxalato de amônio, e o P adsorvido.

Vários ânions podem interferir na cristalização do $\text{Al}(\text{OH})_3$, sendo a intensidade dessa interferência governada por inúmeros fatores (Hsu, 1989). Segundo o autor, o mecanismo básico é atribuído a competição de ânions com o OH^- pelo Al^{+3} e, dependendo do ânion e do pH da solução, a cristalização do $\text{Al}(\text{OH})_3$ pode ser completamente inibida formando precipitados amorfos. Os ânions fosfatos (Hsu, 1979) e carbonatos (Senna, White e Hen, 1977) possuem alta afinidade pelo Al^{+3} , podendo substituir o grupo HOH e ou OH^- da primeira esfera de coordenação do Al^{+3} e, assim, interferir na cristalização do $\text{Al}(\text{OH})_3$. O efeito de ânions orgânicos na cristalização do $\text{Al}(\text{OH})_3$, embora mais complexo, é similar ao dos ânions inorgânicos (Hsu, 1989). Os ânions orgânicos do solo como tartárico, cítrico, tanínico, oxálico e fúlvico, podem inibir a cristalização do $\text{Al}(\text{OH})_3$ mesmo quando presentes em pequenas quantidades (kwong e Huang, 1977, 1979 e 1981; Kodama e Schnitzer, 1980; Violante e Violante, 1980; Violante e Huang, 1985; Goh e Huang, 1985).

Pelas equações ajustadas, verifica-se que a aplicação de doses crescentes de P apresentou, apenas para os solos GH e O, efeito significativo sobre o Al-amorfo (Tabela 9), provavelmente pelo fato do oxalato de amônio pH 3,0 extrair parte dos fosfatos de alumínio formados durante o período de incubação desse solo.

TABELA 8. Equações de regressão ajustadas para alumínio não reativo associado à matéria orgânica (Al-ñreat) (Y), $\text{cmol}_e \text{dm}^{-3}$, como variável dependente das doses de P aplicadas (X), mg dm^{-3} , sem e com aplicação de calcário e os respectivos valores de Al-ñreat, $\text{cmol}_e \text{dm}^{-3}$, correspondentes a dose de P para 90% da produção máxima.

Solo	Equação	R ²	Al-ñreat
Sem calagem			
GH	Y=68,40	-	68,40
O	Y=145,62	-	145,62
A	Y=84,23	-	84,23
GP	Y=49,42	-	49,42
Com calagem			
GH	Y=86,6096-3,1704**X ^{0,5} +0,0359**X	0,99	35,15
O	Y=35,15	-	91,23
A	Y=70,15	-	70,15
GP	Y=31,42	-	31,42

** significativo a 1% pelo teste de t.

TABELA 9. Equações de regressão ajustadas para alumínio amorfo (Al-amorfo) (Y), $\text{cmol}_e \text{dm}^{-3}$, como variável dependente das doses de P aplicadas (X), mg dm^{-3} , sem e com aplicação de calcário e os respectivos valores de Al-amorfo, $\text{cmol}_e \text{dm}^{-3}$, correspondentes a dose de P para 90% da produção máxima.

Solo	Equação	R ²	Al-amorfo
Sem calagem			
GH	Y=20,19	-	20,19
O	Y=15,34	-	15,34
A	Y=6,91	-	6,91
GP	Y=4,94	-	4,94
Com calagem			
GH	Y=24,7388+0,023**X	0,97	35,32
O	Y=20,3871+0,0320**X-0,00002**X ²	0,99	28,17
A	Y=7,40	-	7,40
GP	Y=6,60	-	6,60

** significativo a 1% pelo teste de t.

Com a aplicação de calcário, observa-se, pelas equações ajustadas, que ocorreu um aumento dos valores de Al-amorfo em todos os solos (Tabela 9). Em ordem decrescente, os valores de Al-amorfo foram, para os solos: GH > O > A > GP (Tabela 9). O aumento dos valores de Al-amorfo nos tratamentos que receberam aplicação de calcário podem ser explicados pela interferência do carbonato na cristalização do $Al(OH)_3$, como discutido anteriormente. Também para o solo GH, os valores de Al-amorfo aumentaram com as doses crescentes de P (Tabela 9).

Os valores de Al-amorfo correlacionaram positiva e significativamente com os de Al-reat e de matéria orgânica do solo (Tabela 2), estimados na dose de P correspondente a 90% da máxima. Mendonça (1995), estudando a relação entre a oxidação da matéria orgânica e formas de Al de Latossolos, através do uso de peróxido de hidrogênio a 30%, verificou um aumento do Al-amorfo com as primeiras doses de peróxido de hidrogênio, com uma tendência de estabilização do Al-amorfo nas doses maiores.

3.2 Formas de fósforo no solo

Para as formas de fósforo do solo, obtidas pelo fracionamento seqüencial, a interação solo x calagem x fósforo foi significativa ($P < 0,01$), exceto para as formas de fósforo inorgânico (P_i -sonif) e orgânico (P_o -sonif) obtidas por sonificação, P-residual e P não lábil total, em que ocorreram diferenças significativas ($P < 0,01$) somente entre os solos estudados (Tabelas 3A, 4A e 5A).

Pela substituição das doses de P correspondentes a 90% da produção máxima de matéria seca de grãos de feijoeiro (Tabela 2, Capítulo 2) nas equações de regressão que relacionam as formas de P como variáveis dependentes das doses de P aplicadas, para cada solo e nível de calagem, estimaram-se os valores das formas de P correspondentes a esse nível de

produção. Para as formas Pi-sonif, Po-sonif, P-residual e P não lábil, considerou-se, para estimar esses valores, a média dos respectivos valores obtidos em cada dose de P aplicada, em cada solo e nível de calagem.

Pelas equações de regressão apresentadas na Tabela 10, verifica-se que, na ausência de calagem, os valores de P lábil total (P-resina + Po-microb + Pi-bicarb + Po-bicarb), para os solos, decresceram na seguinte ordem: GP > GH > A > O. Embora, para os solos GH e GP, os valores de P lábil total tenham sido superiores, a MSGR, na dose de P correspondente a 90% da produção máxima, foi significativamente menor em relação às estimadas para os solos O e A (Tabela 2, Capítulo 2). Provavelmente, os maiores teores de Al trocável dos solos GH e GP, como discutido anteriormente (Tabela 1), foram os responsáveis pela menor produção de MSGR nesses solos. Nesse caso, o fator limitante à produção do feijoeiro foi a toxidez por Al e não a disponibilidade de P.

Pelas equações ajustadas, com a aplicação de calcário, os valores de P lábil total para os solos decresceram na seguinte ordem: GP > A > O > GH; sendo esses valores maiores que aqueles observados na ausência de calagem. (Tabela 10). Com a neutralização do Al trocável e em solução pela calagem (Tabelas 1 e 3), o valor de P lábil total, na dose de P correspondente a 90% da produção máxima, reduziu em 25% e 12% para os solos GH e GP, respectivamente, enquanto, nesta mesma dose de P, a produção de MSGR aumentou em 395 e 455%, respectivamente (Tabela 2, Capítulo 2). Para os solos O e A, na dose de P correspondente a 90% da máxima produção, os valores de P lábil aumentaram em 7 e 10%, respectivamente, em relação ao obtido na ausência de calagem, enquanto, a produção de MSGR aumentou em 43 e 65%, respectivamente, evidenciando o efeito tóxico do Al para a produção do feijoeiro.

Para todos os solos, independentemente da calagem, houve um aumento do P lábil total com o incremento das doses de P, sendo as formas de P

inorgânico (P-resina e Pi-bicarb) as que mais contribuíram para o P lábil total. Pavan e Chaves (1996), em Latossolo, e Ivanoff, Reddy e Robison (1998), em Histosols, também verificaram uma pequena contribuição do Po-microb para o P lábil total. Segundo Hedley, Steward e Chauham (1982), as formas de Pi lábil são as que mais contribuem para o P lábil total em solos que receberam adubações com fertilizantes minerais.

Beck (1991), estudando as transformações do Pi e Po após 18 anos de cultivo de um Ultisol da região amazônica, verificou aumento significativo do P lábil nas parcelas que receberam aplicação de fertilizantes fosfatados.

Na ausência de calagem, os valores de Pi-bicarb, Po-bicarb e P lábil total correlacionaram-se significativa e negativamente com as produções de matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca total da parte aérea (MSTO) e P acumulado na MSTO (P-MSTO), correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima (Tabela 11). Esse comportamento se justifica pela provável fixação do P do solo pelo alumínio e ainda pelo fato de ser o Al trocável o fator limitante à produção do feijoeiro. Por outro lado, quando o Al trocável foi neutralizado pela calagem, as produções de MSGR, MSTO e P-MSTO correlacionaram-se significativa e positivamente com os valores de P-resina, Po-bicarb e P lábil total, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima (Tabela 12). Ao contrário do que sugerem Brooke, Powlson e Jenkinson (1984), o Po-microb não constituiu a principal forma de P disponível às plantas.

TABELA 10. Equações de regressão ajustadas para as formas de P lábeis (Y), mg dm⁻³, como variáveis dependentes das doses de P aplicadas (X), mg dm⁻³, e valores das formas de P lábeis correspondentes a 90% da produção máxima.

Solo	Extrator	Equação	R ²	Formas de P lábil	
GH	----- Sem calagem -----				
	P-resina	Y=0,6182+0,0596**X	0,98	43,21	
	Po-microbial	Y=2,3087+0,0047**X	0,88	5,76	
	Pi-bicarb	Y=-0,0398+0,0549**X	0,98	40,31	
	Po-bicarb	Y=2,7198+0,0009**X	0,89	3,38	
	P lábil total	Y=4,3706+0,1202**X	0,99	92,70	
	----- Com calagem -----				
	P-resina	Y=7,4326+0,060**X	0,94	35,05	
	Po-microbial	Y=-2,3007+0,0031**X	0,90	3,71	
	Pi-bicarb	Y=-0,9098+0,0636**X	0,99	28,36	
	Po-bicarb	Y=2,6774+0,0006**X	0,96	2,97	
	P lábil total	Y=12,035+0,1258**X	0,99	69,96	
	O	----- Sem calagem -----			
		P-resina	Y=1,2284+0,1169**X	0,99	40,16
Po-microbial		Y=21274+0,0011**X	0,91	2,49	
Pi-bicarb		Y=-3,9484+0,0798**X	0,99	22,36	
Po-bicarb		Y=1,1471+0,0036**X	0,99	2,35	
P lábil total		Y=2,2582+0,1955**X	0,99	67,36	
----- Com calagem -----					
P-resina		Y=-1,4750+0,1482**X	0,99	42,84	
Po-microbial		Y=2,2397+0,0097**X	0,99	5,14	
Pi-bicarb		Y=-1,8190+0,0761**X	0,99	20,93	
Po-bicarb		Y=2,9013+0,0008**X	0,95	3,14	
P lábil total		Y=2,2984+0,2333**X	0,99	72,05	
A		----- Sem calagem -----			
		P-resina	Y=0,8319+0,1473**X	0,99	48,26
	Po-microbial	Y=2,2937+0,0079**X	0,99	4,84	
	Pi-bicarb	Y=1,8158+0,0563**X	0,99	19,94	
	Po-bicarb	Y=2,3582+0,0026**X	0,97	3,20	
	P lábil total	Y=7,2975+0,1998**X	0,99	76,24	
	----- Com calagem -----				
	P-resina	Y=7,3782+0,1257**X	0,99	50,74	
	Po-microbial	Y=2,8500+0,0072**X	0,99	5,37	
	Pi-bicarb	Y=2,5988+0,0619**X	0,98	23,95	
	Po-bicarb	Y=2,2804+0,0043**X	0,99	3,76	
	P lábil total	Y=15,1073+0,1991**X	0,99	83,82	
	GP	----- Sem calagem -----			
		P-resina	Y=0,9689+0,1520**X	0,99	63,59
Po-microbial		Y=2,1361+0,0046**X	0,89	4,03	
Pi-bicarb		Y=0,0005+0,0808**X	0,99	33,29	
Po-bicarb		Y=0,0415+0,0049**X	0,99	2,06	
P lábil total		Y=3,1471+0,2424**X	0,99	107,97	
----- Com calagem -----					
P-resina		Y=3,3255+0,1560**X	0,99	59,33	
Po-microbial		Y=2,3293+0,0046**X	0,95	3,98	
Pi-bicarb		Y=-0,9079+0,0846**X	0,99	29,46	
Po-bicarb		Y=0,3016+0,0057**X	0,99	2,35	
P lábil total		Y=5,0486+0,2510**X	0,99	95,12	

** significativo a 5% pelo teste de t.

TABELA 11. Coeficientes de correlação entre os valores das formas de fósforo com a produção de matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca total da parte aérea (MSTO) e fósforo acumulado na MSTO (P-MSTO), nas doses de P correspondentes a 90% da máxima produção máxima, para os solos estudados, na ausência de calagem.

	P-resina	P-microb	Pi-bicarb	Po-bicarb	P lábil	Pi-NaOH	Po-NaOH
MSGR	-0,49ns	-0,19ns	-0,95**	-0,80*	-0,91**	-0,49ns	-0,11ns
MSTO	-0,54ns	-0,13ns	-0,93**	-0,83*	-0,93**	-0,43ns	-0,04ns
P-MSTO	-0,49ns	-0,01ns	-0,94**	-0,72*	-0,89**	-0,40ns	-0,04ns
	Pi-sonif	Po-sonif	P p. lábil	Pi-HCl	P-residual	P n lábil	P total
MSGR	-0,04ns	-0,61ns	-0,46ns	-0,54ns	-0,37ns	-0,37ns	-0,43ns
MSTO	0,02ns	-0,55ns	-0,40ns	-0,55ns	-0,31ns	-0,31ns	-0,37ns
P-MSTO	0,13ns	-0,54ns	-0,36ns	-0,48ns	-0,28ns	-0,28ns	-0,34ns

* e ** significativo ao nível de 1% e 5% pelo teste de t, respectivamente.

TABELA 12. Coeficientes de correlação entre os valores das formas de fósforo com a produção de matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca total da parte aérea (MSTO) e fósforo acumulado na MSTO (P-MSTO), nas doses de P correspondentes a 90% da máxima produção máxima, para os solos estudados, na presença de calagem.

	P-resina	P-microb	Pi-bicarb	Po-bicarb	P lábil	Pi-NaOH	Po-NaOH
MSGR	0,98**	-0,23ns	0,03ns	0,92**	0,90**	-0,97**	-0,98**
MSTO	0,95**	-0,64ns	0,49ns	0,92**	0,98**	-0,74*	-0,82*
P-MSTO	0,99**	-0,40ns	0,24ns	0,97**	0,97**	-0,89**	-0,95**
	Pi-sonif	Po-sonif	P p. lábil	Pi-HCl	P-residual	P n lábil	P total
MSGR	-0,90**	-0,89**	-0,98**	-0,92**	-0,97**	-0,97**	-0,97**
MSTO	-0,79*	-0,57 ns	-0,76*	-0,67 ns	-0,76*	-0,76*	-0,75*
P-MSTO	-0,85*	-0,77*	-0,91**	-0,82*	-0,90**	-0,89**	-0,90**

* e ** significativo ao nível de 1% e 5% pelo teste de t, respectivamente.

O P-resina (Amer et al., 1955; Sibbesen, 1977) e o Pi-bicarb (Browman e Cole, 1978; Tiessen, Salcedo e Sampaio, 1992) são considerados as formas mais disponíveis de P às plantas. O Po-bicarb, segundo Stewart e Tiessen (1987), tem

um importante papel na ciclagem do P, através dos processos de mineralização e imobilização, sendo uma fonte de P disponível a curto prazo para as plantas.

Na presença de calagem, os valores das formas de Pi-bicarb, Po-bicarb e P lábil total, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima, correlacionaram-se significativamente e negativamente com os valores de Al-amorfo (Tabela 14), indicando que quanto maior o valor dessa forma de Al, menor a disponibilidade de P para as plantas. Kawai (1980) e Alvarado e Buol (1985) verificaram uma correlação positiva e significativa entre o Al-amorfo, extraído pelo oxalato de amônio, e o P adsorvido.

Pelas equações ajustadas, na ausência de calagem, verifica-se que os valores de P pouco lábil total para os solos decresceram na seguinte ordem: GH > A > O > GP (Tabela 15). Com a aplicação de calcário, foram, para os solos: GH > O > A > GP (Tabela 15). Verificou-se, também, que os valores de P pouco lábil total aumentaram com a aplicação de calcário nos solos GH e O, enquanto, para os solos A e GP, ocorreu uma redução (Tabela 15).

Os valores de P pouco lábil total correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima, para os solos GH e O com calagem, foram 34 e 37%, respectivamente, superiores àqueles estimados na ausência de calagem. Da mesma maneira, para Os solos A e GP com calagem, foram 22 e 44%, respectivamente, inferiores àqueles estimados na ausência de calagem, comportamento esperado em solos ácidos que receberam calagem.

TABELA 13. Coeficientes de correlação entre os valores das formas de fósforo com os das formas de alumínio, matéria orgânica e pH, correspondentes a 90% da produção máxima, para os solos estudados, na ausência de calagem.

	Al-troc	Al-sol	Al-mo	Al-reat	Al-freat	Al-amorfo	MOS	pH
P-resina	0,82*	0,67ns	0,27ns	0,39ns	-0,74*	0,34ns	-0,39ns	-0,20ns
Po-micro	0,08ns	-0,23ns	-0,49ns	0,62ns	-0,26ns	0,46ns	0,71*	-0,73*
Pi-bicarb	0,95**	0,72*	0,54ns	0,41ns	-0,62ns	0,42ns	0,78*	-0,76*
Po-bicarb	0,39ns	0,91**	0,03ns	-0,45ns	-0,96**	-0,49ns	0,07ns	-0,63ns
P lábil	0,86*	0,73*	0,34ns	0,34ns	-0,75*	0,31ns	-0,62ns	0,21ns
Pi-NaOH	0,61ns	0,02ns	0,14ns	0,89**	0,19ns	0,87*	0,99**	-0,72*
Po-NaOH	0,16ns	-0,36ns	-0,30ns	0,82*	-0,02ns	0,70*	0,80*	-0,59ns
Pi-sonif	0,06ns	-0,41ns	-0,41ns	0,76*	-0,02ns	0,62ns	0,73*	-0,57ns
Po-sonif	0,72*	0,16ns	0,24ns	0,84*	-0,27ns	0,79*	0,99**	-0,75*
P p lábil	0,59ns	-0,05ns	0,10ns	0,89**	-0,18ns	0,82*	0,98**	-0,71*
Pi-HCl	0,64ns	0,08ns	0,14ns	0,86*	-0,25ns	0,78*	0,99**	-0,76*
P-residual	0,52ns	-0,11ns	0,08ns	0,93**	-0,08ns	0,86*	0,96**	-0,65ns
P fi lábil	0,52ns	-0,12ns	0,08ns	0,93**	-0,09ns	0,85*	0,96**	-0,65ns
P total	0,57ns	-0,04ns	0,10ns	0,90*	-0,14ns	0,83*	0,98**	-0,69ns

* e ** significativo ao nível de 1% e 5% pelo teste de t, respectivamente.

TABELA 14. Coeficientes de correlação entre os valores das formas de fósforo com os das formas de alumínio, matéria orgânica e pH, correspondentes a 90% da produção máxima, para os solos estudados, na presença de calagem.

	Al-mo	Al-reat	Al-freat	Al-amorfo	MOS	pH
P-resina	0,86*	0,61ns	-0,95**	0,12ns	-0,75*	0,77*
Po-micro	-0,49ns	-0,11ns	0,87*	0,16ns	0,27ns	-0,22ns
Pi-bicarb	-0,77*	-0,96**	0,12ns	-0,88**	0,47ns	-0,26ns
Po-bicarb	-0,51ns	-0,79*	-0,23ns	-0,99**	-0,66ns	0,82*
P lábil	0,08ns	-0,35ns	-0,75*	-0,72*	0,67ns	-0,57ns
Pi-NaOH	0,86*	0,99**	-0,28ns	0,85*	0,97**	-0,86*
Po-NaOH	0,78*	0,96**	-0,12ns	0,95**	0,89**	-0,90**
Pi-sonif	0,65ns	0,85*	-0,11ns	0,65ns	0,84*	-0,55ns
Po-sonif	0,95**	0,99**	-0,50ns	0,74*	0,99**	-0,85*
P p lábil	0,85*	0,99**	-0,25ns	0,87*	0,96**	-0,87*
Pi-HCl	0,88*	0,97**	-0,38ns	0,73*	0,98**	-0,77*
P-residual	0,83*	0,97**	-0,26ns	0,80*	0,96**	-0,79*
P fi lábil	0,83*	0,97**	-0,26ns	0,75*	0,96**	-0,78*
P total	0,85*	0,99**	-0,27ns	0,83*	0,96**	-0,83*

* e ** significativo ao nível de 1% e 5% pelo teste de t, respectivamente.

TABELA 15. Equações de regressão ajustadas para as formas de P pouco lábeis (Y), mg dm⁻³, como variáveis dependentes das doses de P aplicadas (X), mg dm⁻³, e valores das formas de P pouco lábeis correspondentes a 90% da produção máxima.

Solo	Extrator	Equação	R ²	formas de P pouco lábil	
GH	Sem calagem				
	Pi-NaOH	$Y=408,094+0,3200^{**}X$	0,99	640,38	
	Po-NaOH	$Y=71,8659+0,0363^{**}X$	0,99	98,57	
	Pi-sonificação	Y=15,00	-	15,00	
	Po-sonificação	Y=12,83	-	12,83	
	P pouco lábil total	$Y=508+0,3514^{**}X$	0,99	766,78	
	Com calagem				
	Pi-NaOH	$Y=599,58+0,4000^{**}X$	0,95	783,58	
	Po-NaOH	$Y=168,001+0,0831^{**}X$	0,95	206,23	
	Pi-sonificação	Y=18,85	-	18,85	
	Po-sonificação	Y=16,38	-	16,38	
	P pouco lábil total	$Y=801,9854+0,4855^{**}X$	0,97	1025,04	
	O	Sem calagem			
		Pi-NaOH	$Y=87,3292+0,3439^{**}X$	0,99	201,85
Po-NaOH		$Y=44,65,75+0,069^{**}X$	0,98	67,63	
Pi-sonificação		Y=5,68	-	5,68	
Po-sonificação		Y=0,49	-	0,49	
P pouco lábil total		$Y=138,076+0,4131^{**}X$	0,99	275,65	
Com calagem					
Pi-NaOH		$Y=124,276+0,4427^{**}X$	0,99	256,64	
Po-NaOH		$Y=73,3480+0,1336^{**}X$	0,99	113,29	
Pi-sonificação		Y=6,50	-	6,50	
Po-sonificação		Y=0,49	-	0,49	
P pouco lábil total		$Y=204,832+0,5756^{**}X$	0,99	376,92	
A		Sem calagem			
		Pi-NaOH	$Y=89,4987+0,3797^{**}X$	0,99	211,76
	Po-NaOH	$Y=46,0708+0,1093^{**}X$	0,99	81,27	
	Pi-sonificação	Y=11,28	-	11,28	
	Po-sonificação	Y=0,15	-	0,15	
	P pouco lábil total	$Y=146,3962+0,4582^{**}X$	0,99	304,46	
	Com calagem				
	Pi-NaOH	$Y=78,5663+0,2683^{**}X$	0,99	171,13	
	Po-NaOH	$Y=33,2463+0,0649^{**}X$	0,99	55,64	
	Pi-sonificação	Y=10,95	-	10,95	
	Po-sonificação	Y=0,13	-	0,13	
	P pouco lábil total	$Y=123,42+0,3318^{**}X$	0,99	237,85	
	GP	Sem calagem			
		Pi-NaOH	$Y=4,3286+0,3038^{**}X$	0,99	129,49
Po-NaOH		$Y=9,393+0,1047^{**}X$	0,99	52,53	
Pi-sonificação		Y=1,14	-	1,14	
Po-sonificação		Y=0,17	-	0,17	
P pouco lábil total		$Y=15,1230+0,4082^{**}X$	0,99	183,33	
Com calagem					
Pi-NaOH		$Y=3,9344+0,1747^{**}X$	0,99	66,65	
Po-NaOH		$Y=9,8304+0,0713^{**}X$	0,99	35,43	
Pi-sonificação		Y=1,16	-	1,16	
Po-sonificação		Y=0,18	-	0,18	
P pouco lábil total		$Y=15,1468+0,2459^{**}X$	0,99	103,42	

** e NS significativo a 1% e não significativo pelo teste de t, respectivamente.

O aumento nos teores de Pi-NaOH e Po-NaOH foi o responsável pelo aumento do P pouco lábil verificado para os solos GH e O com a aplicação de calcário, uma vez que, tanto na ausência quanto na presença de calagem, foram as formas que mais contribuíram para o P pouco lábil total. O hidróxido de sódio extrai formas de P consideradas de baixa disponibilidade para as plantas associadas a fosfatos amorfos e cristalinos de Fe e Al (Williams, Mayer e Nriagu, 1980). Por outro lado, Wang (1977) verificou que a forma Pi-NaOH foi a que mais se alterou com o cultivo da cana-de-açúcar. Segundo Tiessen, Salcedo e Sampaio (1992), em solos tropicais, o Pi-NaOH é uma forma relativamente dinâmica. No presente estudo, na presença de calagem, foi verificada correlação significativa e negativa entre as produções de MSGR, MSTO e P-MSTO com os valores das formas de P pouco lábil correspondentes a 90% da produção máxima (Tabela 12), indicando que essas formas não contribuíram para a nutrição das plantas de feijoeiro. De acordo com Lindsay e Moreno (1960), a solubilidade de compostos fosfatados depende do pH do solo. Em pH acima de 7,0, a solubilidade é controlada por fosfatos de cálcio, e em pH abaixo desse valor, por fosfatos de ferro e alumínio. Segundo Swenson, Cole e Sieling (1949), para que uma quantidade significativa de P seja liberada dos compostos de Fe e Al, o pH do solo deve ser elevado para valores acima de 7,0.

O aumento das formas Pi-NaOH e Po-NaOH nos solos GH e O com aplicação de calcário se deve, provavelmente, à oxidação da matéria orgânica e aumento dos valores de Al amorfo nesses solos durante o período de incubação, uma vez que, segundo Farmer e Mitchell (1963), durante a oxidação da matéria orgânica do solo ocorre a formação de Fe e Al amorfo.

Fernandes et al. (1998), utilizando o fracionamento de Chang e Jackson (1957), também verificaram um aumento nos teores de P extraído pelo NaOH quando se aplicou calcário. Segundo os autores, com a aplicação de calcário, ocorre uma dispersão dos vários compostos presentes no solo pela elevação do

pH, expondo cargas elétricas positivas que adsorvem P, e que podem ser extraídos pelos métodos utilizados na determinação dessas formas de fósforo. Além disso, com a calagem pode haver formação de precipitados de Al que podem adsorver P, como discutido anteriormente.

Para todos os solos, tanto na ausência quanto na presença de calagem, houve um aumento das formas de Pi-NaOH e Po-NaOH com o incremento das doses de P (Tabela 15). Araújo, salcedo e Sampaio (1993) também verificaram variações nas formas de P extraídas pelo hidróxido de sódio, em solos fertilizados com P e cultivados com cana-de-açúcar, sendo a forma de Po-NaOH maior na área de cultivo do que na área sob vegetação nativa. Para as formas Pi-sonif e Po-sonif, ocorreram diferenças significativas somente entre os solos estudados (Tabela 15).

Pelas equações ajustadas, verifica-se que os valores de P não lábil (Pi-HCl + P-residual) para os solos decresceram na seguinte ordem: GH > O \cong A > GP (Tabela 16). Para essa forma de P, ocorreram diferenças significativas apenas entre os solos estudados, sendo a forma P-residual, para os quatro solos estudados, a que mais contribuiu para o P não lábil total. Segundo Araújo, salcedo e Sampaio (1996) e Pavan e Chaves (1994), este comportamento é esperado em solos ácidos.

A forma Pi-HCl corresponde às formas de P ligadas a Ca (Walker e Syers, 1976) e, em solos não fertilizados de regiões temperadas, está associada à apatitas, sendo considerada disponível a longo prazo através do intemperismo do solo (Smeck, 1985). Segundo Araújo, Salcedo e Sampaio (1993), em solos ácidos dos trópicos, esta a forma de P ligada a cálcio não é tão estável, sendo disponível às plantas. Esses autores verificaram, também, que a forma P-residual apresentou pequenas variações após 25 anos de cultivo do solo com cana-de-açúcar, indicando, que muito pouco do fertilizante acumulou-se nessa forma de

P. A forma P-residual representa o P ocluso, retido pela hematita, goetita e gibbsita (Smeck et al., 1985).

Na presença de calagem, foram verificadas correlações significativas e negativas entre os valores de MSGR, MSTO e P-MSTO com os das formas de P não lábil, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima (Tabela 12). Por outro lado, correlações significativas e positivas foram obtidas entre os valores dessas formas de P com os de Al amorfo e matéria orgânica, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima (Tabelas 13 e 14).

Pelas equações ajustadas, verifica-se que, na ausência de calagem, os valores de P total (P lábil + P pouco lábil + P não lábil) para os solos decresceram na seguinte ordem: $GH > A > O > GP$, e na presença de calcário, os valores foram: $GH > O > A > GP$ (Tabela 16). Os maiores valores de P total para o solo O em relação ao A, na presença de calagem, se devem a um aumento do P pouco lábil com a aplicação de calcário para esse solo e a uma redução dessa forma para o A.

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 16). Também Perrott e Mansel (1989) verificaram um rearranjo das formas de P com a aplicação de calcário e de P em solos sob pastagens.

Na dose de P correspondente a 90% da produção máxima, o P lábil total (Tabela 10) correspondeu a 5,2, 11,2, 11,7 e 32,8% do P total (Tabela 16), respectivamente, para os solos GH, O, A e GP, sem calagem. Na presença de calagem esta forma de P, correspondeu a 3,5, 10,2, 14,4 e 40,1% do P total, respectivamente para GH, O, A e GP. Verifica-se, exceto para o solo GP, uma pequena participação do P lábil total no P total. Ivanoff, Reddy e Robinson (1998) também verificaram uma pequena participação do P lábil no P total em Histosols de Everglades, Sul da Florida, EUA.

TABELA 16. Equações de regressão ajustadas para as formas de P não lábeis (Y), mg dm⁻³, como variáveis dependentes das doses de P aplicadas (X), mg dm⁻³, e valores das formas de P não lábeis correspondentes a 90% da produção máxima.

Solo	Extrator	Equação	R ²	formas de P não lábil
GH	Sem calagem			
	Pi-HCl	Y=6,3387+0,0044**X	0,99	9,57
	P-residual	Y=898,06	-	898,06
	P-não lábil total	Y=907,63	-	907,63
	P-total	Y=1421,87+0,4700**X	0,98	1767,11
	Com calagem			
	Pi-HCl	Y=7,5997+0,0031**X	0,98	9,03
	P-residual	Y=893,01	-	893,01
	P-não lábil total	Y=902,04	-	902,04
	P-total	Y=1741,17+0,5625**X	0,98	2000,00
O	Sem calagem			
	Pi-HCl	Y=0,5787+0,0009**X	0,99	0,88
	P-residual	Y=257,30	-	257,30
	P-não lábil total	Y=258,18	-	258,18
	P-total	Y=399,598+0,6054**X	0,99	601,19
	Com calagem			
	Pi-HCl	Y=0,8940+0,0019**X	0,99	1,46
	P-residual	Y=256,15	-	256,15
	P-não lábil total	Y=257,61	-	257,61
	P-total	Y=465,721+0,8065**X	0,99	706,58
A	Sem calagem			
	Pi-HCl	Y=0,9258+0,0015**X	0,99	1,41
	P-residual	Y=267,21	-	267,21
	P-não lábil total	Y=268,62	-	268,62
	P-total	Y=422,25+0,6582**X	0,99	649,32
	Com calagem			
	Pi-HCl	Y=1,4236+0,0023**X	0,99	2,22
	P-residual	Y=259,66	-	259,66
	P-não lábil total	Y=261,88	-	261,88
	P-total	Y=403,595+0,5222**X	0,99	583,55
GP	Sem calagem			
	Pi-HCl	Y=0,2305+0,00004**X	0,93	0,25
	P-residual	Y=37,56	-	37,56
	P-não lábil total	Y=37,81	-	37,81
	P-total	Y=403,595+0,5222	0,99	329,11
	Com calagem			
	Pi-HCl	Y=0,3778+0,00006**X	0,98	0,40
	P-residual	Y=38,36	-	38,36
	P-não lábil total	Y=38,76	-	38,76
	P-total	Y=58,0475+0,4993**X	0,99	237,30

** significativo a 1% pelo teste de t.

Os valores de P pouco lábil total (Tabela 15) correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima, nos quatro solos estudados, independente da calagem, variaram de 40 a 50% do P total (Tabela 16). Para o P não lábil total, os valores correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima, tanto na ausência quanto na presença de calagem, variaram de 35 a 50% do P total para os solos GH, O e A, enquanto, para o solo GP, esse valor correspondeu a 11,5 e 16,3% do P total, na ausência e presença de calagem, respectivamente (Tabela 16).

Na presença de calagem, os valores de P total correlacionaram-se significativa e negativamente com a MSGR, MSTO e P-MSTO, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima (Tabelas 11 e 12), indicando que essa forma de P não é um bom parâmetro para prever a disponibilidade de P para as plantas.

3.3 Extratores de fósforo do solo

Para o P recuperado pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray, Resina e Olsen, a interação solo x calagem x fósforo foi significativa ($P < 0,01$) (Tabela 5A e 6A). Equações de regressão foram ajustadas para o P recuperado pelos extratores como variável dependente das doses de P, para cada solo e nível de calagem. Substituindo, nessas equações, as doses de P correspondentes a 90% da produção máxima de matéria seca de grãos de feijoeiro (Tabela 2, Capítulo 2), estimaram-se os níveis críticos de P para cada extrator.

Pelas equações ajustadas, independentemente da calagem, os valores de P pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e Bray, para os solos, decresceram na seguinte ordem: $GH > O > A > GP$ (Tabela 17). Os maiores valores obtidos nos solos GH e O provavelmente estão relacionados à capacidade desses extratores em extrair formas orgânicas de P, como sugerido por Grande, Curi e Quaggio (1986). Esses autores, estudando a disponibilidade de P pelos extratores

Mehlich-1 e Resina em solos de várzea do sul de Minas Gerais, verificaram que o extrator Mehlich-1 recuperou mais P do que a Resina nos solos da classe Glei Húmico. No presente estudo, os níveis críticos de P pelos extratores Mehlich-1 e Bray correlacionaram-se significativa e positivamente com os valores de Po-NaOH, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima, na ausência de calagem (Tabela 18) e na presença (Tabela 19), respectivamente, evidenciando a estreita relação entre o P recuperado por estes extratores e as formas orgânicas de P do solo.

Os níveis críticos de P pelos extratores ácidos (Mehlich-1, Mehlich-3 e Bray) correlacionaram-se significativa e positivamente com os valores de Pi-NaOH, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima, na ausência de calagem (Tabela 18). O íon fluoreto presente nos extratores Mehlich-3 e Bray, que proporciona a complexação de íons Fe, torna suas ações mais eficientes sobre as formas de P ligadas a Fe e Al (Moura Filho, 1990). O extrator Mehlich-1, devido à sua elevada acidez, atua mais intensamente sobre as formas de P ligadas a Ca e ao Al (Thomas e Peaslee, 1973). Os níveis críticos de P obtidos por esses extratores, na ausência de calagem (Tabela 18), correlacionaram-se, também, significativa e positivamente com os valores de P pouco lábil total e não lábil total, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima, sugerindo que esses extratores recuperam P de formas pouco ou não disponíveis às plantas.

Para o extrator Resina, verifica-se pelas equações ajustadas que, independentemente da calagem, os valores para os solos decresceram na seguinte ordem: GP>A>O>GH (Tabela 17). No caso desse extrator, não são utilizados reagentes que poderiam solubilizar fosfatos não lábeis e, o pH da suspensão é um pouco menor que 7,0, coincidindo com a faixa de maior disponibilidade de P para as plantas (Raij, Feitosa e Silva, 1984; Raij, Quaggio e Silva, 1986).

Solo	Extratores	Equação	R ²	Nível crítico(mg dm ⁻³)
GH	Mehlich-1	Y=11,5009+0,1869**X	0,99	125,56
	Mehlich-3	Y=3,2725+0,1709**X	0,99	128,88
	Bray	Y=6,5396+0,1721**X	0,99	120,31
	Resina	Y=6,1283+0,1186**X	0,99	93,30
	Olsen	Y=9,6966+0,1701**X	0,99	134,72
	Mehlich-1	Y=24,0631+0,1868**X	0,99	109,98
	Mehlich-3	Y=4,3688+0,1888**X	0,98	111,71
	Bray	Y=5,3337+0,1395**X	0,93	110,21
	Resina	Y=2,4569+0,1823**X	0,99	86,31
	Olsen	Y=6,2730+0,1549**X	0,99	77,51
	Mehlich-1	Y=13,3977+0,2816**X	0,99	78,38
	Mehlich-3	Y=7,4269+0,2388**X	0,98	86,95
Bray	Y=9,0673+0,2371**X	0,99	88,02	
Resina	Y=2,3224+0,1882**X	0,96	64,99	
Olsen	Y=1,6480+0,2399**X	0,99	81,52	
A	Mehlich-1	Y=28,9975+0,2852**X	0,99	114,28
	Mehlich-3	Y=38,8041+0,2729**X	0,98	120,40
	Bray	Y=37,9616+0,2719**X	0,97	119,26
	Resina	Y=38,8404+0,2466**X	0,99	112,57
	Olsen	Y=37,2759+0,2869**X	0,99	68,84
	Mehlich-1	Y=5,5066+0,1729**X	0,99	50,17
	Mehlich-3	Y=5,6539+0,1760**X	0,99	51,02
	Bray	Y=13,7793+0,2816**X	0,99	76,89
	Resina	Y=4,4890+0,1948**X	0,99	67,21
	Olsen	Y=0,0471+0,2757**X	0,99	88,73
	Mehlich-1	Y=37,0390+0,2596**X	0,99	126,60
	Mehlich-3	Y=30,4382+0,2755**X	0,99	125,49
Bray	Y=33,5091+0,2676**X	0,99	125,83	
Resina	Y=33,1301+0,2961**X	0,99	135,28	
Olsen	Y=4,4463+0,2886**X	0,99	104,03	
GP	Mehlich-1	Y=14,1557+0,2585**X	0,99	92,36
	Mehlich-3	Y=14,1425+0,2727**X	0,99	98,21
	Bray	Y=5,6294+0,1869**X	0,99	71,37
	Resina	Y=2,2203+0,2465**X	0,99	103,78
	Olsen	Y=3,4068+0,2740**X	0,99	109,48
	Mehlich-1	Y=12,3794+0,1831**X	0,99	78,11
	Mehlich-3	Y=11,0904+0,1983**X	0,98	82,28
	Bray	Y=8,0015+0,2060**X	0,93	81,96
	Resina	Y=46,6765+0,3373**X	0,99	167,77
	Olsen	Y=0,7428+0,2762**X	0,99	99,94

** significativo a 5% pelo teste de t

Tabela 17. Equações de regressão e níveis críticos de fósforo para os solos de extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray, Resina e Olsen para os solos Giel Húmico (GH), Orgânico (O), Aluvial (A) e Giel Pouco Húmico (GP), sem e com aplicação de calcário.

Assim, admite-se que o extrator Resina recuperou apenas as formas lábeis de P, não atuando sobre as formas de P pouco lábeis e não lábeis.

Correlações significativas e positivas foram obtidas entre os níveis críticos de P pelo extrator Resina e os valores de P lábil total correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima, tanto na ausência (Tabela 18) quanto na presença (Tabela 19) de calagem. Por outro lado, na presença de calagem, correlações significativas e negativas foram obtidas com os valores de P pouco lábil total e P não lábil total, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima (Tabela 19).

Para o extrator Olsen, verifica-se, pelas equações ajustadas, que os valores de P para os solos decresceram na seguinte ordem: $A > GP > O > GH$, independente da calagem (Tabela 17). Verificou-se, ainda, que com a calagem, a quantidade de P extraída diminuiu para os solos GH e O, enquanto, para os solos A e GP, ocorreu um aumento (Tabela 17). Provavelmente, esse comportamento seja explicado pelo fato dos fosfatos de alumínio formados nos solos GH e O durante o período de incubação terem passados para formas de P não recuperáveis pelo extrator Olsen, mesmo nos tratamentos com calcário. Volkweiss (1973) verificou redução do P em solução após duas semanas da aplicação de calcário, devido, segundo o autor, à precipitação do alumínio como complexos amorfos polinucleares com elevada superfície específica e alta afinidade por P. No entanto, quando o solo foi incubado por cinco meses com o calcário, não ocorreu redução do P em solução devido à cristalização dos complexos de Al formados.

Os níveis críticos de P pelo extrator Olsen, independentemente da calagem, correlacionaram-se significativamente e positivamente com os valores de P_i -bicarb, P_o -bicarb e P lábil total correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima (Tabelas 18 e 19). Na ausência de calagem, os níveis críticos de P pelo extrator Olsen correlacionaram-se também significativamente e

positivamente com os valores de Pi-NaOH correspondentes a dose de P para 90% da produção máxima (Tabela 18), indicando a estreita relação existente entre essa forma de P e as formas preferencialmente extraídas pelo Olsen, uma vez que, o princípio desse extrator é a liberação do P ligado a Fe e Al em pH elevado (Silva e Raij, 1999).

Na ausência de calagem, à exceção do Bray, quando se correlacionaram os níveis críticos de P pelos extratores com a MSGR, MSTO e P-MSTO, na dose de P correspondente a 90% da produção máxima, foram obtidas correlações significativas e negativas e, em alguns casos, não se obtiveram correlações significativas (Tabela 18). A falta de correlações ou correlações negativas estão relacionadas ao efeito do Al tóxico às plantas de feijoeiro, como discutido anteriormente. No entanto, para se obter produções mais elevadas nesses solos, a calagem é extremamente necessária para a neutralização do Al tóxico (Faquin et al., 1998).

Com a neutralização do Al tóxico pela calagem, ou seja, quando o P foi o único fator limitante, apenas os níveis críticos de P pelos extratores Resina e Olsen correlacionaram-se significativa e positivamente com a MSGR, MSTO e P-MSTO, na dose de P correspondente a 90% da produção máxima (Tabela 19), sendo os maiores coeficientes obtidos para o extrator Resina. A ausência de correlações ou correlações negativas entre os níveis críticos de P, pelos demais extratores estudados, evidencia que esses extratores recuperam P de formas não disponíveis para o feijoeiro.

TABELA 18. Coeficientes de correlação entre os níveis críticos de P recuperados pelos extratores e os valores das formas de P, matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca total da parte aérea (MSTO) e P acumulado na MSTO (P-MSTO) correspondentes a dose de P para 90% da produção máxima, na ausência de calagem.

	Mehlich-1	Mehlich-3	Bray	Resina	Olsen
P-resina	0,84*	0,79*	0,63+	0,81*	0,99**
P-microb	0,23ns	0,15ns	0,67+	-0,07ns	0,51ns
Pi-bicarb	0,95**	0,92**	0,64+	0,85*	0,98**
Po-bicarb	0,30ns	0,26ns	-0,20ns	0,87*	0,65+
P labil total	0,86*	0,82*	0,58ns	0,86*	0,99**
Pi-NaOH	0,75*	0,70*	0,97**	0,23ns	0,78*
Po-NaOH	0,35ns	0,27ns	0,83*	-0,17ns	0,48ns
Pi-sonif	0,23ns	0,16ns	0,75*	-0,23ns	0,41ns
Po-sonif	0,83*	0,78*	0,96**	0,37ns	0,86*
P p lábil	0,72*	0,67+	0,97**	0,21ns	0,77*
Pi-HCl	0,76*	0,71*	0,96**	0,29ns	0,82*
P-residual	0,67+	0,65+	0,97**	0,10ns	0,70*
P fi lábil	0,67+	0,63+	0,98**	0,10ns	0,70*
P total	0,71*	0,65+	0,97**	0,18ns	0,75*
MSGR	-0,81*	-0,78*	-0,38ns	-0,96**	-0,92**
MSTO	-0,78*	-0,75*	-0,32ns	-0,98**	-0,89**
P-MSTO	-0,85*	-0,84*	-0,35ns	-0,96**	-0,84*
Mehlich-1	1,00**	-	-	-	-
Mehlich-3	0,99**	1,00**	-	-	-
Bray	0,76*	0,73*	1,00**	-	-
Resina	0,69+	0,67+	0,13ns	1,00**	-
Olsen	0,87*	0,83*	0,68+	0,78*	1,00**

** , * , + , ns significativo a 1%, 5%, 10% e não significativo pelo teste de t, respectivamente.

TABELA 19. Coeficientes de correlação entre os níveis críticos de P recuperados pelos extratores e os valores das formas de P, matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca total da parte aérea (MSTO) e P acumulado na MSTO (P-MSTO) correspondentes a dose de P para 90% da produção máxima, na presença de calagem.

	Mehlich-1	Mehlich-3	Bray	Resina	Olsen
P-resina	-0,43ns	-0,51ns	-0,53ns	-0,10ns	0,21ns
P-microb	0,94**	0,96**	0,97**	-0,41ns	-0,22ns
Pi-bicarb	-0,41ns	-0,41ns	-0,38ns	0,95**	0,65+
Po-bicarb	0,27ns	-0,50ns	-0,46ns	0,96**	0,90**
P lábil total	-0,71*	-0,80*	-0,77ns	0,77*	0,80*
Pi-NaOH	0,30ns	0,29ns	0,23ns	-0,89**	-0,55ns
Po-NaOH	0,65+	0,32ns	0,28ns	-0,95**	-0,73*
Pi-sonif	0,09ns	0,55ns	0,53ns	-0,86*	-0,30ns
Po-sonif	0,27ns	0,07ns	0,04ns	-0,76*	-0,56ns
P p lábil	0,28ns	0,28ns	0,24ns	-0,90**	-0,41ns
Pi-HCl	0,27ns	0,23ns	0,21ns	-0,82*	-0,38ns
P-residual	0,35ns	0,34ns	0,30ns	-0,84*	-0,47ns
P fi lábil	0,35ns	0,33ns	0,27ns	-0,89**	-0,52ns
P total	0,30ns	0,30ns	0,30ns	-0,90**	-0,51ns
MSGR	-0,45ns	-0,46ns	-0,43ns	0,97**	0,67+
MSTO	-0,75*	-0,78*	-0,76*	0,96**	0,73*
P-MSTO	-0,57ns	-0,59ns	-0,57ns	0,99**	0,76*
Mehlich-1	1,00**	-	-	-	-
Mehlich-3	0,99**	1,00**	-	-	-
Bray	0,99**	0,99**	1,00**	-	-
Resina	-0,58ns	-0,59ns	-0,52ns	1,00**	-
Olsen	-0,18ns	-0,30ns	-0,27ns	0,75*	1,00**

** , * , + , ns significativo a 1%, 5%, 10% e não significativo pelo teste de t, respectivamente.

3.4 Atividade da fosfatase ácida no solo

Para a atividade da fosfatase ácida (Pase) no solo, a interação solo x calagem x fósforo foi significativa ($P < 0,01$) (Tabela 6A). Equações de regressão foram ajustadas para a Pase como variável dependente das doses de P, para cada solo e nível de calagem. Substituindo, nessas equações, as doses de P correspondente a 90% da produção máxima de matéria seca de grãos de feijoeiro, estimaram-se os valores de atividade da Pase correspondentes a esse nível de produção.

Pelas equações de regressão ajustadas, verifica-se, independente da calagem, que os valores da atividade da Pase para os solos decresceram na seguinte ordem: GH > O > GP > A (Figura 1), sendo que as diferenças entre solos foram mais acentuadas nas menores doses de P e bastante semelhantes nas doses mais elevadas, principalmente na dose 800 mg dm⁻³ de P.

A maior atividade da Pase nos solos GH e O em relação aos solos GP e A, está relacionada, provavelmente, aos maiores teores de matéria orgânica verificados nos primeiros. Halsted (1964) e Nahas, Centurion e Assis (1994) também encontraram maior atividade da Pase em solos com teores mais altos de matéria orgânica. Segundo Ladd e Butler (1975) e McLaren (1975), além do favorecimento da atividade dos microrganismos produtores de fosfatases, a matéria orgânica do solo protege a enzima da decomposição pela formação de complexos húmus – proteína.

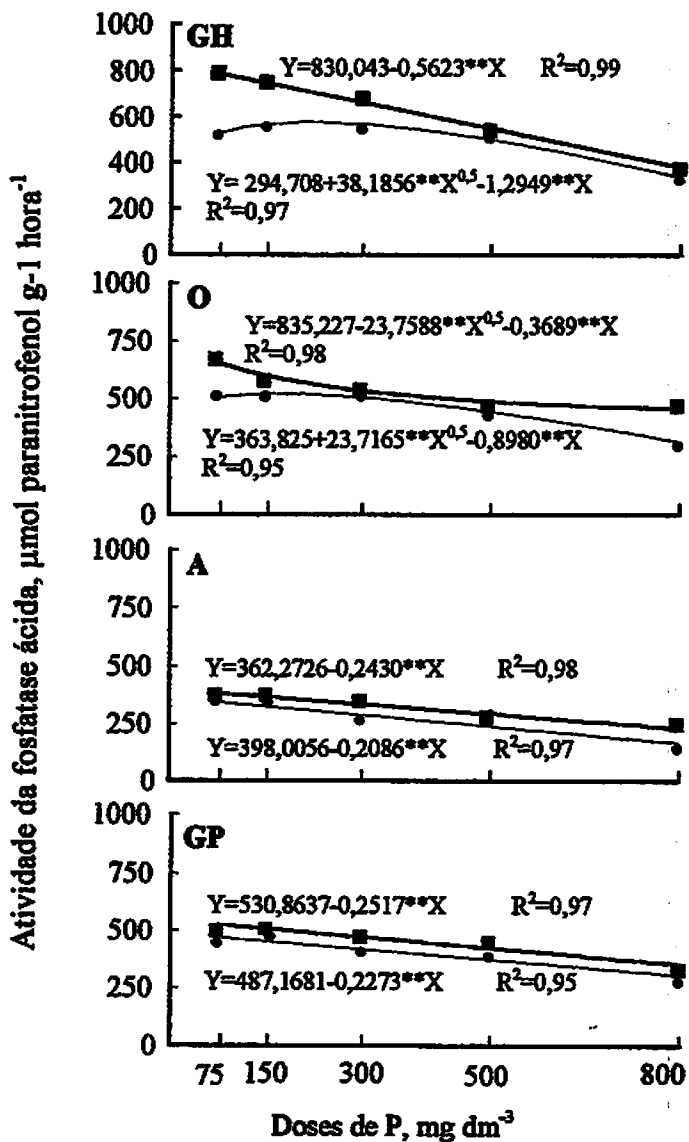


FIGURA 1. Atividade da fosfatase ácida nos solos Glei Húmico (GH), Orgânico (O), Aluvial (A) e Glei Pouco Húmico (GP), na ausência (—●—) e presença (—■—) de calagem, em função das doses de P aplicadas. ** significativo a 1% pelo teste de t.

Nos quatro solos estudados, com aplicação de calcário ocorreu um aumento da atividade da Pase (Figura 1). Fernandes et al. (1998) também verificaram aumento na atividade da Pase com a aplicação de calcário e , atribuíram esse aumento à elevação do pH do solo para uma faixa mais adequada à atividade dos microrganismos do solo. Halsted (1964), estudando o efeito do pH do solo sobre a atividade da fosfatase ácida, observou que a atividade da enzima aumentou gradativamente até pH 7,0, diminuindo rapidamente a partir desse valor. No presente estudo, o pH dos solos após a calagem foi inferior a 6,0 (Tabela 7), e tanto na ausência quanto na presença de calagem, obteve-se correlação positiva e significativa entre os valores de pH e de atividade da fosfatase ácida, estimados na dose de P correspondente a 90% da produção máxima do feijoeiro (Tabela 20).

Nahas, Centurion e Assis (1994), estudando o efeito de algumas características químicas do solo sobre os microrganismos solubilizadores de fosfatos e produtores de fosfatases, verificaram que o número de bactérias totais correlacionou-se com os teores de P total, P disponível, matéria orgânica e pH. Esses autores observaram, também, que o número de bactérias produtoras de fosfatases aumentou com a elevação do P disponível e de pH dos solos. Segundo os autores, o aumento da atividade enzimática deve resultar do crescimento bacteriano, como verificado também por Dick, Juma e Tabatabai (1983).

Independentemente da calagem, o aumento das doses de P promoveu uma redução da atividade da Pase, exceto para os solos GH e O, sem calagem, onde se observou um aumento na atividade da enzima até as doses de 150 e 300 mg dm⁻³ de P, respectivamente, com um posterior decréscimo (Figura 1). Vários trabalhos têm verificado inibição da atividade da Pase pela adição de P (Nannipieri, Johnson e Paul, 1978; Speir e Ross, 1978; Dalal, 1982; Nahas, Terenzi e Rossi, 1982; Haynes e Swift, 1988; Fernandes et al., 1998). Segundo Speir e Ross (1978), o aumento do P em solução pode inibir tanto a Pase quanto

também reprimir a síntese de fosfatos pelos microrganismos. Segundo Nahas, Centurion e Assis (1994), as fosfatases são enzimas que podem ser inibidas por elevadas concentrações de fosfato solúvel, não significando, no entanto, que a população microbiana seja inibida.

No presente estudo, independente da calagem, embora os valores de atividade da Pase tenham sido maiores nos solos com teores de matéria orgânica mais elevados, não se obteve correlação positiva e significativa entre os valores de Pase e de matéria orgânica correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima (Tabela 21). Essa ausência de correlação era esperada, uma vez que, com o incremento das doses de P, a atividade da Pase foi praticamente semelhante em todos os solos (Figura 1).

Os valores de atividade da Pase, na ausência de calagem, correlacionaram-se significativamente e negativamente com os de P-resina, Pi-bicarb, Po-bicarb e Pi-HCl, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima (Tabela 21). Na presença de calagem, correlações significativas e positivas foram observadas com o Pi-bicarb e Po-bicarb, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima, enquanto, para as demais formas de P, foram verificadas correlações negativas (Tabela 21).

A ausência de correlação entre a atividade da Pase e características do solo, principalmente com aquelas relacionadas à mineralização do P orgânico, como a atividade de algumas enzimas, reflete a complexidade do processo de mineralização da matéria orgânica do solo (Halsted, 1964). Harrison (1983) não encontrou correlação significativa entre a Pase e P orgânico, segundo o autor, pelo fato dessa forma de P ser relativamente lábil. Segundo Harrison e Pearce (1979), o uso da atividade da Pase como um indicador da disponibilidade de P é difícil, uma vez que, a atividade dessa enzima é influenciada por vários fatores, inclusive pela época de amostragem do solo. Esses autores verificaram que em condições de maior temperatura e umidade, 70% da variação na atividade da

Pase foi explicada pelos teores de P disponível, enquanto, em condições de baixa temperatura e umidade, apenas 13% da variação na atividade da Pase foi explicada pelos teores de P disponível do solo.

Correlações significativas e positivas, tanto na ausência quanto na presença de calagem, foram obtidas entre os valores de Pase e de matéria seca total da parte aérea (MSTO) e P acumulado na MSTO (P-MSTO), na dose de P correspondente a 90% da produção máxima (Tabela 20). Na ausência de calagem, foi verificada também correlação significativa e negativa entre os valores de Pase e de produção de matéria seca de grãos de feijoeiro, na dose de P correspondente a 90% da produção máxima (Tabela 20).

Apesar da complexidade dos fatores envolvidos na atividade da Pase, na presença de calagem, a atividade da Pase foi um indicador da disponibilidade de P lábil quando o pH do solo se encontrava, provavelmente, próximo do ótimo para os microrganismos produtores dessa enzima, como pode ser verificado pelas correlações significativas e negativas com os extratores Resina e Olsen, que foram eficientes em prever a disponibilidade de P para o feijoeiro (Tabela 20).

TABELA 20. Coeficientes de correlação entre os valores de atividade da fosfatase ácida no solo com os valores de produção de matéria seca de grãos (MSGR), matéria seca total da parte aérea (MSTO), P acumulado na MSTO (P-MSTO), matéria orgânica (MOS), pH, formas de P e fósforo pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray, Resina e Olsen, correspondentes à dose de P para 90% da produção máxima.

Calagem	MSPA	MSTO	P-MSTO	MOS	pH	P-resina	Po-microb	Pi-bicarb
Sem	-0,82*	0,99**	0,99**	-0,53ns	0,72*	-0,85*	0,01ns	-0,94**
Com	-0,471ns	0,99**	0,99**	-0,39ns	0,91**	-0,10ns	-0,40ns	0,95**
	Po-bicarb	P lábil	Pi-NaOH	Po-NaOH	Pi-sonif	Po-sonif	P p lábil	Pi-HCl
Sem	-0,72*	-0,40ns	0,04ns	0,13ns	-0,54ns	-0,45ns	-0,28ns	-0,90**
Com	0,97**	-0,89**	-0,95**	-0,85*	-0,76*	-0,82*	-0,89**	0,77*
	P-residual	P ã lábil	P total	Mehlich-1	Mehlich-3	Bray	Resina	Olsen
Sem	-0,38ns	-0,28ns	-0,35ns	-0,06ns	0,10ns	-0,08ns	0,07ns	-0,15ns
Com	-0,91**	-0,89**	-0,89**	0,49ns	0,61ns	0,59ns	-0,76*	-0,77*

** , * e ns significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste de t, respectivamente.

4 CONCLUSÕES

1. Para o solo Glei Húmico, com a aplicação de calcário e de doses crescentes de fósforo, ocorreu um aumento das formas de alumínio reativas associadas à matéria orgânica. Para os demais solos houve uma redução com a calagem, enquanto, as doses crescentes de fósforo não tiveram efeito significativo. Os maiores teores dessas formas de Al podem ter sido responsáveis pela menor produção do feijoeiro no solo Glei Húmico na presença de calagem;
2. Com a neutralização das formas de alumínio trocável e em solução pela calagem, o fósforo lábil foi a forma de fósforo preferencialmente recuperada pelas plantas de feijoeiro e pelos extratores Resina e Olsen;
3. Embora os extratores Resina e Olsen tenham sido eficientes em prever a disponibilidade de fósforo para as plantas de feijoeiro, os coeficientes de determinação foram maiores para o extrator Resina;

4. A elevação do pH do solos pela calagem aumentou a atividade da fosfatase ácida nos solos , enquanto as doses crescentes de fósforo reduziram a atividade dessa enzima nos solos estudados.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARADO, A.; BUOL, S.W. Field estimation of phosphate retention by Andepts. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.49, n.4, p.911-914, July/Aug. 1985.
- ALVES, V.M.C.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Efeito do alumínio sobre a absorção e translocação de fósforo e sobre a composição mineral de duas cultivares de trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.23, n.6, p.563-573, jun. 1988.
- AMER, G.; BOULDIN, D.R.; BLACK, C.A.; DUKE, F.R. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and ³²P equilibration. *Plant and Soil*, The Hague, v.6, p.391-408, 1955.
- ANDRADE, C.A. de B. Limitações de fertilidade e efeito do calcário para o feijoeiro em solos de várzea do sul de Minas Gerais. Lavras: UFLA, 1997. 107p. (Tese - Doutorado em Fitotecnia).
- 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./out. 1993.
- BECK, M.A. Inorganic and organic phosphorus transformations during 18 years of cultivation in the amazon basin. Raleigh: North Caroline State University, 1991. 145p. (Tese - Mestrado).
- BLOOM, P.R.; McBRIDE, M.B.; WEAVER, R.M. Aluminum organic matter in acid soils: salt extractable aluminum, *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.43, n.4, p.813-815, July/Aug. 1979.

- 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.
- BRAY, R. P.; KURTZ, L. T.** Determination of total organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*, Baltimore, v.59, n.1, p.39-45, Jan. 1945.
- BROOKE, P.C.; POWSON, D.S.; JENKINSON, D.S.** Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, Great Britain, v.16, n.2, p.169-175, 1984.
- CHANG, S.C.; JACKSON, M.L.** Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, Baltimore, v.84, p.133-144, 1957.
- CLARK, J.S.; NICHOL, W.E.** The lime potential - percent base saturation relations acid surface horizons of mineral and organic soils. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v.46, p.281-285, 1966.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS.** *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 4ª Aproximação.* Lavras, 1989. 159p.
- DALAL, R.C.** Effect of plant growth and addition of plant residues on the phosphatase activity in soil. *Plant and Soil*, The Hague, v.66, n.1/3, p.265-369, 1982.
- DICK, W.A.; JUMA, N.G.; TABATABAI, M.A.** Effects of soils on acid phosphatase and inorganic pyrophosphatase of corn roots. *Soil Science*, Baltimore, v.136, n.1, p.19-25, Sept. 1983.
- EMBRAPA.** Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. *Manual de métodos de análise de solo.* Rio de Janeiro: Ministério da agricultura, 1997. 212p.
- EVANS, C.E.; KAMPRATH, E.J.** Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and organic matter content. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, v.34, n.6, p.893-896, Nov./Dec. 1970.

- FAQUIN, V.; ANDRADE, C.A.B.; FURTINI NETO, A.E.; ANDRADE, A.T.; CURI, N. Resposta do feijoeiro à aplicação de calcário em solos de várzea do sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, n. 4, p.651-660, out./dez. 1998.
- FARMER, V.C.; MITCHELL, B.D. Occurrence of oxalates in soil clays following hydrogen peroxide treatment, *Soil Science*, Baltimore, v.96, , n.3, p.221-229, Mar. 1963.
- FERNANDES, L.A.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; LIMA, J.M.; GUEDES, G.A.A. Fósforo e atividade de fosfatase em dois solos sob diferentes de condições de uso. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.33, n.7, p.1159-1170, jul. 1998.
- FIGUEIREDO, O.A.R.; ALMEIDA, J.A. Quantificação das formas trocáveis e não trocáveis de alumínio em solos ácidos do estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.15, n.2, p.151-156, mar./abr. 1991.
- GOH, T.B.; HUANG, P.M. Changes in thermal stability and acidic characteristics of hydroxy – Al – montmorillonite complexes formed in the presence of citric acid. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v.65, n.3, p.519-522, Aug. 1985.
- 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.
- GUERRA, J.G.M.; FONSECA, M.C.; ALMEIDA, D.L.; De-POLLI, H.; FERNANDES, M.S. Conteúdo de fósforo da biomassa microbiana de um solo cultivado com *Brachiaria decumbens* Stapf. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.30, n.6, p.543-551, jun. 1995.
- HALSTED, R.L. Phosphatase activity of soils as influenced by lime and other treatments. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v.44, n.1, p.137-144, Fev. 1964.
- HARGROVE, W.L.; THOMAS, G.W. Effect of organic matter on exchangeable aluminum and plant growth in acid soils. In: STELLY, M. (ed.) *Chemistry in the soil environment*. Madison: American Society of American, 1981. p.151-166.

HARRISON, A.F. Relationship between intensity of phosphatase activity and physico-chemical properties in woodland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, Elmsford, v.15, n.1, p.93-99, 1983.

HARRISON, A.F.; PEARCE, T. Seasonal variation of phosphatase activity in woodland soils. *Soil biology and Biochemistry*, Elmsford, v.11, n.4, p.405-410, 1979.

HAYNES, R.J.; SWIFT, R.S. Effects of lime and phosphate additions on changes in enzyme activities, microbial biomass and levels of extractable nitrogen, sulphur and phosphorus in a acid soil. *Biology and Fertility of Soil*, Elmsford, v.6, p.153-158, 1988.

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 American Journal*, Madison, v.46, n.4, p.970-976, July/Aug. 1982.

HSU, P.H. Aluminum hydroxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (eds.) *Mineral in soil environments*. Madison: Soil Science Society America, 1989. p.331-378.

HSU, P.H. Effect of phosphate and silicate on the crystallization of gibbsite from OH-Al solutions. *Soil Science*, Madison, v.127, n.4, p.219-226, Apr. 1979.


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

JERSAK, J.M.; McCOLL, J.G. Aluminum release from solid-phase components of forest soils with citric acid. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.53, n.2, p.550-555, Mar./Apr. 1989.

JUO, A.S.R.; KAMPRATH, E. Copper chloride as extractant for estimating the potentially reactive aluminum pool in acid soils. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.43, n.1, p.35-38, Jan./Fev. 1979.

KAWAI, K. The relationship of phosphorus adsorption to amorphous aluminium for characterizing Andisols. *Soil Science*, Baltimore, v.126, n.3, p.186-189, Mar. 1980.

- KHALID, R.A.; SILVA, J.A.** A study of soils aluminium extraction methods in relation to plant aluminium and yield in tropical soils. *Tropical Agriculture, Sunney*, v.56, n.1, p.53-63, Jan. 1979.
- KODAMA, H.; SCHNITZER, M.** Effect of fulvic acid on the crystallization of aluminum hydroxide. *Geoderma, Amsterdam*, v.24, p.195-205, Oct 1980.
- KWONG, K.F.; HUANG, P.M.** Comparison of the influence of tannic acid and selected low-molecular weight organic acids on precipitation products of aluminum. *Geoderma, Amsterdam*, v.26, n.2, p.179-193, Sept. 1981.
- KWONG, K.F.; HUANG, P.M.** Influence of citric acid on the hydrolytic reactions of aluminum. *Soil Science Society of American Journal, Madison*, v.41, n.4, p.692-697, July/Aug. 1977.
- KWONG, K.F.; HUANG, P.M.** The relative influence of low molecular weight, complexing organic acids on the hydrolysis and precipitation of aluminum. *Soil Science, Baltimore*, v.128, n.6, p.337-342, Dec. 1979.
- LADD, J.N.; BUTLER, J.H.A.** Humus-enzyme systems and synthetic organic polymer-enzyme analogs. In: **PAUL, E.A.; McLAREN, A.D.** eds. *Soil biochemistry*. New York: Marcel Dekker, 1975. v.4, p. 143-194.
- LINDSAY, W.L.; MORENO, E.C.** Phosphate phase equilibria in soils. *Soil Science society of American Proceedings, Madison*, v.24, n.1, p.177-182, Jan./Fev. 1960.
- McLAREN, A.D.** Soil as a system of humus and clay immobilised enzymes. *Chemical Scripta*, v.8, p.97-99, 1975.
- McLEAN, E.O.** Testing soils for pH and lime requirement. In: **WALSH, L.M.; BEATON, J.D.** (eds.) *Soil testing and plant analysis*. Madison: American Society Agronomy, 1973. P.78-83.
- MEHLICH, A.** A Mehlich-3 soil test extractant a modification of Mehlich 2 extractant. *Communications of Soil Science of Plant Analalys, New York*, v.15, p.1409-1416, 1984.
- MENDONÇA, E.S.** Oxidação da matéria orgânica e sua relação com diferentes formas de alumínio de latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, v.19, n.1, p.25-30, jan./fev. 1995.

- 
- MOURA FILHO, G. Disponibilidade de fósforo em amostras de solos de várzea. Viçosa, UFV, 1990.76p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analitical Chemistry Acta*, Amsterdam, v.27, p.31-36, 1962.
- NAHAS, E.; CENTURION, J.F.; ASSIS, L.C. Efeito das características dos solos sob os microrganismos solubilizadores de fosfatos e produtores de fosfatases. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.18, n.1, p.43-48, jan./abr. 1994.
- NAHAS, E.; TERENCEI, H.F.; ROSSI, A. effect of carbon source and pH on the production and secretion of acid phosphatase (EC 3.1.3.2.) and alkaline phosphatase (EC 3.1.3.1.) in *Neurospora crassa*. *Journal Genetics Microbiology*, Reading, v.128, n.9, p.2017-2021, Sept. 1982.
- NANNIPIERI, P.; JOHSON, R.L.; PAUL, E.A.B. Criteria for measurements of microbial growth and activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, Elmsford, v.10, n.4, p.223-228, 1978.
- OLSEN, S. R.; WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Science American Proceedings*, Madison, v.21, n.1, p.144-149, Jan./Feb. 1954.
- PAVAN, M.A. Alumínio em solos ácidos do Paraná; relação entre o alumínio não-trocável, trocável e solúvel, com o pH, CTC, porcentagem de saturação de Al e matéria orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.7, n.1, p.39-46, jan./abr. 1983.
- 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*, Viçosa, v.20, n.2, p.251-256, maio/ago. 1996.
- PERROTT, K.W.; MANSELL, G.P. Effect of fertiliser phosphorus and liming on inorganic and organic soil phosphorus fractions. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, New York, v.32, n.1, p.63-70, Fev. 1989.

- PIONKE, H.B.; COREY, R.B. Relations between acidic aluminum and acid soil pH, clay, and organic matter. **Soil Science Society of American Proceedings**, Madison, v.31, n.6, p.749-752, Nov./Dez. 1967.
- QUAGGIO, J.A.; SAKAI, M.; ISHIMURA, L.; SAES, L.A.; BATAGLIA, O.C. Calagem para a rotação feijão-milho verde em solo orgânico do vale do Rio Ribeira do Iguape (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, n.3, p.256-261, set./dez. 1985.
- RAIJ, B. van; FEITOSA, C.T.; SILVA, N.M. da. Comparação de quatro extratores de fósforo de solos. **Bragantia**, Campinas, v.43, n.1, p.17-29, 1984.
- RAIJ, B. van., QUAGGIO, J. A. Métodos de análise de solos para fins de fertilidade. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 31p. (Boletim, 81).
- 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.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; SILVA, N.M. da. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.17, n.5, p.547-566, 1986.
- RAO, I.M.; BORRERO, V.; RICAURTE, J.; GARCIA, R.; AYARZA, M.A. Adaptive attributes of tropical forage species to acid soils. III. Differences in phosphorus acquisition and utilization as influenced by varying phosphorus supply and soil type. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.20, n.1/2, p.155-180, 1997.
- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S. Effects of temperature and prior flooding on intensity and sorption of phosphate in soil. **Plant and Soil**, The Hague, v.95, n.2, p.163-171, 1986a.
- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S. Sorption and bioavailability of phosphorus during the drainage period of flooded-drained soils. **Plant and Soil**, The Hague, v.92, n.2, p.265-278, 1986b.
- SAYAL, S; De DATTA, S. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science**, New York, v.16, n.5, p.2-120, 1991.

- SENNA, C.J.; WHITE, J.L.; HEN, S.L. Anion - aluminum hydroxide gel interactions. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.41, p.1009-1013, Sept./Oct. 1977.
- SIBBESEN, G.E. A simple ion-exchange resin procedure for extracting plant-available elements from soil. *Plant and Soil*, The Hague, v.46, n.3, p.665-669, Apr. 1977.
- SHUMA, L.M. Comparison of exchangeable Al, extractable Al, and Al in soil fractions. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v.70, n.3, p.263-275, Aug. 1990.
- 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.
- SMECK, N.E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. *Geoderma*, Amsterdam, v.36, n.2, p.185-199, Nov. 1985.
- SPEIR, T.W.; ROSS, D.J. Soil phosphatase and sulphatase. In: BURNS, R.G. (ed) *Soil enzymes*. London: Academic Press, 1978. p.197-250.
- STEWART, J.W.B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry*, Baltimore, v.4, p.41-60, 1987.
- SWENSON, R.M.; COLE, C.V.; SIELING, D.H. Fixation of phosphorus by Fe and Al and replacement by organic and inorganic ions. *Soil Science*, Baltimore, v.67, n.1, p.3-32, Jan./June 1949..
- TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. Use of p-nitrofenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology & Biochemistry*, Elmsford, v.1, n.5, p.301-307, 1969.
- THOMAS, G.W.; PEASLEE, D.E. Testing soils for phosphorus. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D. (eds.) *Soil testing and plant analysis*. Madison: Soil Science Society of America, 1973. p.115-129.
- WALKER, W.J.; CRONAN, C.S.; BLOOM, P.R. Aluminum solubility in organic soil horizons from northern and southern forested watersheds. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v.54, n.2, p.369-374, Mar./Apr. 1990.

- TIESSESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V.** Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.48, n.4, p.853-858, July/Aug. 1984.
- TIESSESSEN, H.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B.** Nutrients and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. *Agricultural Ecosystems and Enviroments*, Amsterdam, v.38, p.139-159, 1992.
- VIOLANTE, A.; HUANG, P.M.** Influence of inorganic and organic ligants on the formation of aluminum hydroxides and oxyhydroxides. *Clays and Clay minerals*, Clarkson, v.33, p.191-192, 1985.
- VIOLANTE, A.; VIOLANTE, P.** Influence of pH concentration and chelating power of organic anions on the syntesis of aluminum hydroxide and oxyhydroxides. *Clays and Clay Minerals*, Clarkson, v.28, p.425-434, 1980.
- VOLKWEISS, S.J.** Factors affecting phosphate sorption by soils and minerals. Wisconsin: University of Wisconsin, 1973. 138p. (Tese - Doutorado).
- WALKER, T.W.; SYERS, J.K.** The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, Amsterdam, v.15, n.1, p.1-19, jan. 1976.
- WANG, C.; FANG, I.; ROBERTSON, L.S.** Forms of phosphorus in soils and their availability to sugarcane. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 16. 1977, São Paulo. *Proceedings...* São Paulo, 1977. p.1489-1507.
- 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.
- WILLIAMS, J.D.H.; MAYER, T.; NRIAGU, J.O.** Extractability of phosphate minerals common in soils and sediments. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.44, n.3, p.462-465, May/June 1980.

ANEXO

ANEXO A	Página
TABELA 1A Quadrados médios da produção de matéria seca de grãos (MSGR); P total (Pt), P total solúvel em ácido (Pts), P orgânico (Po), P inorgânico (Pi), atividade da fosfatase ácida <i>in vivo</i> (Pase-vv) e <i>in vitro</i> (Pase-vt).....	105
TABELA 2A Quadrados médios de resíduo do Al trocável (Al-troc), Al solúvel (Al-sol), Al reativo fracamente (Al-mo) e fortemente associado a matéria orgânica (P-reat), Al não reativo associado a matéria orgânica (Al-ñreat), Al amorfo e matéria orgânica do solo (MOS).....	106
TABELA 3A Quadrados médios de resíduo do pH em água (pH), P resina (P-resina), P microbial (P-micro), P inorgânico (Pi-bic) e orgânico (Po-bic) extraído com bicarbonato de sódio e P inorgânico (Pi-NaOH) e orgânico (Po-NaOH) extraídos com hidróxido de sódio.....	107
TABELA 4A Quadrados médios de resíduo do P inorgânico (Pi-sonif) e orgânico (Po-sonif) extraído por ultrasonificação, P extraído com ácido clorídrico, P residual e P lábil.....	108
TABELA 5A Quadrados médios de resíduo do P pouco lábil, P não lábil, P total, Mehlich 1e Mehlich 3.....	109
TABELA 6A Quadrados médios de resíduo do P pelos extratores Bray, Resina e Olsen e para a atividade da fosfatase ácida.....	110

	Página
Tabela 7A Formas de alumínio no solo antes da aplicação do calcário e do fósforo.....	111
Tabela 8A Formas de fósforo nos solos antes da aplicação do calcário e do fósforo.....	111

TABELA 1A. Quadrados médios da produção de matéria seca de grãos (MSGR); P total (Pt), P total solúvel em ácido (Pts), P orgânico (Po), P inorgânico (Pi), atividade da fostase ácida *in vivo* (Pase-vv) e *in vitro* (Pase-vt).

Fontes variação	Quadrado médio						
	MSGR	Pt	Pts	Po	Pi	Pase-vv	Pase-vt
Dose (D)	649,16**	0,3466**	94356**	6978**	50020**	2246**	13570**
Calagem (C)	4392,8**	0,9750**	114383**	24552**	32947**	223,25**	11,556ns
Solo (S)	759,41**	0,0825**	10341**	217,04**	8175,1**	57,089**	5606**
DxC	114,94**	0,0434**	4943**	329,56*	2788,5**	3640**	30647**
DxS	4,9444**	0,0024**	352,36**	28,104**	433,49**	1314**	10928**
CxS	255,85**	0,0939**	9622**	348,8**	6543,9**	129,78**	3945**
DxCxS	14,530**	0,0024**	354,24**	32,556**	409,31**	796,27**	6171**
Resíduo	0,2702	0,0002	26,3998	12,4918	32,1583	13,8354	35,9851
CV	16,33	16,67	14,85	10,93	14,99	26,55	28,01

** e ns significativo a 1% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 2A. Quadrados médios de resíduo do Al trocável (Al-troc), Al solúvel (Al-sol), Al reativo fracamente (Al-mo) e fortemente associado a matéria orgânica (P-reat), Al não reativo associado a matéria orgânica (Al-ñreat), Al amorfo e matéria orgânica do solo (MOS).

Fontes	Quadrado médio						
	Al-troc	Al-sol	Al-mo	Al-reat	Al-ñreat	Al-amorfo	MOS
Dose (D)	1,6760**	0,1673**	2,1384**	289,58**	245,33**	82,463**	1075,7**
Calagem (C)	0,0063**	0,0429**	96,003**	117,58**	39851**	2092,8**	8872,2**
Solo (S)	43,721**	4,2514**	47,391**	10321**	37526**	4496,0**	22788**
DxC	3,5784**	0,3132**	0,9402**	15,944**	331,80**	76,273**	51,689ns
DxS	0,0063**	0,0429**	2,1128**	273,33**	269,41**	27,568**	834,23**
CxS	3,5784**	0,0019**	14,922**	2681,6**	3241,9**	509,76**	4371,0**
DxCxS	0,0050**	0,0020**	0,9166**	18,507**	254,94**	25,723**	32,572**
Resíduo	0,0019	0,0004	0,0262	1,36013	17,304	1,4133	2,8212
CV	8,30	12,19	4,13	17,27	17,58	7,70	8,31

** e ns significativo a 1% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 3A. Quadrados médios de resíduo do pH em água (pH), P resina (P-resina), P microbial (P-micro), P inorgânico (Pi-bic) e orgânico (Po-bic) extraído com bicarbonato de sódio e P inorgânico (Pi-NaOH) e orgânico (Po-NaOH) extraídos com hidróxido de sódio.

Fontes	Quadrado médio						
	pH	P-resina	P-micro	Pi-bic	Po-bic	Pi-NaOH	Po-NaOH
Dose (D)	0,0288**	51987**	101,71**	12944**	13,6**	299121**	19409**
Calagem (C)	70,90**	1110,8**	145,54**	47,125**	3,54**	93219**	38657**
Solo (S)	0,2857**	1255,8**	116,19**	528,34**	9,61**	2245208**	71820**
DxC	0,0097**	165,15**	8,274**	5,6183**	3,63**	252,10**	72,1031ns
DxS	0,0271**	135,25**	1,7015**	157,61**	1,17**	3888,03**	253,82**
CxS	0,2979**	264,76**	31,519**	12,132**	0,35**	163248**	41928,3**
DxCxS	0,0032**	211,57**	4,322**	21,025**	0,12**	2749,54**	541,95**
Resíduo	0,0017**	33,1799	0,7685	4,6433	0,12	92,27	39,0938
CV	8,04	6,57	19,57	18,60	20,51	13,25	17,12

** e ns significativo a 1% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 4A. Quadrados médios de resíduo do P inorgânico (Pi-sonif) e orgânico (Po-sonif) extraído por ultrasonificação, P extraído com ácido clorídrico, P residual e P lábil.

Fontes		Quadrado médio				
Variação	Pi-sonif	Po-sonif	P-HCl	P-resid	P lábil	
Dose (D)	0,6658ns	0,2329ns	8,2671**	84,162ns	12336**	
Calagem (C)	8,7891ns	0,0002ns	13,252**	419,26ns	3263,9**	
Solo (S)	1575,4**	1581,3**	537,32**	5472933**	2404,6**	
DxC	1,0554ns	0,2179ns	0,0663ns	206,41ns	262,55**	
DxS	1,9335ns	0,2092ns	1,7075**	138,35ns	500,55**	
CxS	5,7417ns	0,0035ns	0,9293**	137,35ns	411,28**	
DxCxS	3,9743ns	0,2833ns	0,1856**	181,004ns	234,03**	
Resíduo	2,3799	0,8370	0,0851	366,9428	18,2753	
CV	18,37	26,87	19,96	15,27	15,06	

** e ns significativo a 1% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 5A. Quadrados médios de resíduo do P pouco lábil, P não lábil, P total, Mehlich 1e Mehlich 3.

Fontes	Quadrado médio				
	P pouco lábil	P não lábil	P total	Mehlich 1	Mehlich 3
Dose (D)	469796,0**	41,35858ns	1069960,0**	702198,6**	742034,9**
Calagem (C)	254933,5**	283,2875ns	297253,7**	18318,4**	20862,1**
Solo (S)	3347967,1**	5580773,0**	17165350,0**	81243,4**	71319,2**
DxC	172,4489**	210,4212ns	638,4419ns	813,54**	1748,85**
DxS	4358,52**	121,9892ns	4087,801**	4311,19**	5239,16**
CxS	372104,6**	118,6951ns	395720,0**	672,97**	270,439**
DxCxS	5576,508**	182,573ns	7645,614**	153,128**	240,778**
Resíduo	137,393	368,8457	608,6761	79,0598	26,8882
CV	12,97	15,24	12,93	15,02	5,78

** significativo a 1% pelo teste de F.

** significativo a 1% pelo teste de F.

Fontes	Quadrado médio			
Variação	Bray	Resina	Olsen	Fosfatase ácida
Dose (D)	694025,4**	811490,8**	859010,8**	392173,7**
Calagem (C)	20340,1**	4807,06**	10840,6**	0,7662ns
Solo (S)	66361,5**	5545,91**	18383,2**	804276,2**
DxC	2209,41**	127,665**	532,759**	455,8656**
DxS	6509,38**	1910,34**	1213,91**	11944,94**
CxS	69,2833ns	227,239**	289,622**	--61237,36**
DxCxS	581,387**	236,161**	170,576**	3461,03**
Resíduo	111,0564	28,5258	33,1799	120,7321
CV	5,68	8,60	12,79	13,04

TABELA 6A. Quadrados médios de resíduo do F pelos extratores Bray, Resina e Olsen e para a atividade da fosfatase ácida.

Tabela 7A. Formas de alumínio no solo antes da aplicação do calcário e do fósforo

Formas de Al	Solo			
	GH	O	A	GP
	cmol _c dm ⁻³			
Al-trocável	1,52	0,85	0,35	1,35
Al-solução	0,41	0,22	0,12	0,53
Al-mo	4,21	4,25	3,43	4,58
Al-reativo	44,15	30,14	17,28	11,14
Al-não reativo	70,02	148,83	82,93	41,52
Al-amorfo	18,48	16,34	6,98	5,03

Tabela 8A. Formas de fósforo nos solos antes da aplicação do calcário e do fósforo.

Formas de P	Solo			
	GH	O	A	GP
	mg dm ⁻³			
P-resina	4,11	7,95	10,48	10,74
P-microbial	2,71	1,12	2,83	0,45
Pi-bicarbonato	2,31	3,18	6,15	5,73
Po-bicarbonato	2,68	0,98	2,34	0,40
Pi-NaOH	415,35	105,58	110,34	26,08
Po-NaOH	78,53	48,28	48,24	19,12
Pi-sonificação	13,84	4,56	12,35	1,24
Po-sonificação	12,46	0,48	0,15	0,16
Pi-HCl	6,84	0,56	1,08	0,25
P-residual	856,34	275,86	268,45	37,86