

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos



Tese

**Fósforo em Planossolo cultivado com culturas de sequeiro e sua disponibilidade para o arroz subsequente em Plantio Direto**

**Magali de Ávila Fortes**

Pelotas, 2009

**MAGALI DE ÁVILA FORTES**

**Fósforo em Planossolo cultivado com culturas de sequeiro e sua disponibilidade para o arroz subsequente em Plantio Direto**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências (área do conhecimento: Solos).

Orientador: Rogério Oliveira de Sousa

Co-orientadores: Ledemar Carlos Vahl  
Walkyria Bueno Scivittaro

Pelotas, 2009

**Dados de catalogação na fonte:**  
(Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744)

F788f Fortes, Magali de Ávila

Fósforo em planossolo cultivado com culturas de sequeiro e sua disponibilidade para o arroz subsequente em plantio direto/Magali de Ávila Fortes - Pelotas, 2009.130f.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas - Pelotas, 2009, Rogério Oliveira de Sousa, Orientador.

1. Frações de fósforo 2. Adubação fosfatada 3.Efeito residual de fósforo I Sousa, Rogério Oliveira de (orientador) II .Título.

CDD 631.42

**Banca examinadora:**

Professor, Dr. Rogério Oliveira de Sousa – UFPel – (Presidente).

Professora, Dr<sup>a</sup>. Ana Cláudia Rodrigues de Lima – UFPel.

Professor, Dr. Leandro Souza da Silva – UFSM.

Professora, Dr<sup>a</sup>. Rosa Maria Vargas Castilhos – UFPel.

**A Deus***Dedico*

*“Bendito o homem que confia no Senhor e cuja esperança é o Senhor. Porque ele é como a árvore plantada junto às águas, que estende as suas raízes para o ribeiro e não receia quando vem o calor, mas a sua folha fica verde; e no ano de sequidão, não se perturba, nem deixa de dar fruto” (Jeremias 17.7-8).*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela sua fidelidade e por ter me sustentado nas horas de desânimo.

Ao professor Rogério Oliveira de Sousa pela contribuição na minha formação, como orientador durante seis anos.

Ao professor Ledemar Carlos Vahl e à pesquisadora Walkyria Bueno Scivittaro pela co-orientação e ensinamentos transmitidos.

Aos demais professores do Departamento de Solos pela amizade, carinho, respeito e ensinamentos transmitidos.

Ao pesquisador Algenor da Silva Gomes, Luis Henrique Gularte Ferreira e demais estagiários e funcionários da Embrapa Clima Temperado que investiram e trabalharam constantemente na área experimental que foi concedida para a realização deste trabalho.

Ao professor Leandro Souza da Silva da UFSM, professoras Rosa Maria Vargas Castilhos e Ana Cláudia Rodrigues de Lima da UFPel por contribuírem na minha formação fazendo parte da banca examinadora.

À equipe de orientados do professor Rogério: Fabiana Schmidt, Jonas Wesz, Géron Buss e Roberto Wolter pela dedicação, amizade e ajuda constante nos experimentos.

A todos os colegas do Departamento de Solos (muitos para serem mencionados) aos quais aprendi a amá-los e compreender suas diferenças. Pelos momentos de descontração, amizade, troca de experiências, ajuda nas coletas e preparo de solo e de plantas.

À minha amiga Carla Machado da Rosa, por não medir esforços e colaborar incansavelmente com a minha formação durante quase sete anos de convivência e com a formação de muitos colegas no Departamento de Solos.

Às amigas Marla Oliveira Farias, Cecília Sacramento do Reis, Rosângela Mattos, Noemi Lunkes pela grande amizade formada nesses anos de convivência, carinho e respeito.

À Fernanda Sannes, Gláucia Islabão, Juliana Brito e Katiúscia Strassburguer pelo carinho e amizade formada nos últimos dois anos.

A todos os funcionários do Departamento de Solos (muitos para serem mencionados) pela amizade, respeito, auxílio nas coletas de solo e auxílio técnico.

Ao meu esposo Goodson pela paciência, amor, apoio e incentivo.

Aos meus pais Rogélmo e Margarete e seus cônjuges Rosane e Roberto, respectivamente, e meus irmãos Róbinson e William e cunhada Fernanda.

Aos meus sogros Gérsom e Angela, cunhada, esposo e filho Priscila, Cleber e Calebe, pelo apoio e incentivo.

A todos os familiares que mesmo à distância sempre torceram por mim.

Aos meus irmãos em Cristo da Igreja Presbiteriana de Pelotas e Igreja Presbiteriana Pioneira - DF pelas orações.

À Universidade Federal de Pelotas, que possibilitou meus estudos durante onze anos.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - pela concessão da bolsa de estudos durante o mestrado e doutorado.

A todos que não foram mencionados, mas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

FORTES, Magali de Ávila. Fósforo em Planossolo cultivado com culturas de sequeiro e sua disponibilidade para o arroz subsequente em Plantio Direto. 2009. 130f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o efeito da adubação fosfatada e a disponibilidade das formas de fósforo para o arroz irrigado cultivado em Planossolo no sistema plantio direto, após o cultivo de culturas de sequeiro. Os experimentos foram conduzidos desde 2003, delineados em blocos ao acaso com quatro repetições e os tratamentos foram dispostos em um fatorial 2 x 2 (superfosfato triplo - SFT) e fosfato natural de Arad - FNA), com e sem reaplicação anual de P com SFT) mais um tratamento adicional testemunha sem a aplicação da adubação fosfatada. Foram coletadas amostras de solo em duas profundidades (0 - 10 cm e 0 - 20 cm), analisadas pelo método Mehlich-1 e resina de troca aniónica (RTA), e amostras de 0,0 - 2,5; 2,5 - 5,0 e 5,0 - 15,0 cm, analisadas pelo fracionamento de P. Nas plantas fez-se determinação da concentração de fósforo nas folhas bandeira e parte aérea (folhas, colmo e grãos) e quantidade total acumulada de P nas plantas, calculada a partir da concentração de fósforo na parte aérea em relação à massa de matéria seca. Foi realizada a colheita dos grãos após a maturação fisiológica para análise de rendimento. O rendimento de grãos de arroz não respondeu à adubação fosfatada, mesmo com teores iniciais de P no solo abaixo do nível crítico ( $< 6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ). A adubação fosfatada realizada nas culturas de sequeiro (milho e soja) apresentou um efeito residual para o arroz irrigado mesmo após quatro anos de cultivos destas, no sistema plantio direto. Os extratores Mehlich-1 e resina de troca aniónica foram igualmente eficientes na avaliação da disponibilidade de P para o arroz irrigado. Os teores de P extraídos do solo pelos dois métodos apresentaram correlações significativas com o P acumulado nas plantas. O fosfato natural de Arad apresenta desempenho semelhante ao superfosfato triplo no que se refere à nutrição por fósforo em arroz irrigado em rotação com culturas de sequeiro no sistema plantio direto. As frações de fósforo inorgânico que predominam em um Planossolo cultivado com as culturas de milho e soja em sistema plantio direto são as extraídas com NaOH 0,1 e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>. As adubações realizadas anualmente com superfosfato triplo e fosfato natural de Arad aumentaram todas as frações inorgânicas de fósforo no solo, desde as mais lábeis até as menos lábeis. As frações orgânicas apresentam-se pouco sensíveis à adubação fosfatada. As quantidades de fósforo acumuladas na parte aérea das plantas de arroz melhor se correlacionaram com as frações de fósforo mais lábeis (RTA, NaHCO<sub>3</sub> e NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>), principalmente na profundidade de 0,0 - 2,5 cm.

Palavras-chave: Frações de fósforo. Adubação fosfatada. Efeito residual de fósforo.

## ABSTRACT

FORTES, Magali de Ávila. Phosphorus in Albaqualf soil cultivated with dryland crops and its availability for the subsequent rice under no tillage. 2009. 130f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

The general objective of this study was to evaluate the effect of the phosphorus fertilization and the availability of the phosphorus forms in irrigated rice under no tillage in Albaqualf soil cultivated on dryland crops mulch. The experiments installed in 2003 were conducted under a randomized blocks design with four replications. The treatments were disposed in 2 x 2 factorial (triple superphosphate - TSP) and Arad rock phosphate (ARP), with and without annual replication of P with TSF. Additionally, it was conducted a treatment under natural condition (without the application of the phosphorus fertilization). The soils collected from the layers: 0 - 10 cm and 0 - 20 cm were analyzed using the Mehlich-1 and anion-exchange resin methods. Soils collected from 0.0 - 2.5; 2.5 - 5.0 and 5.0 - 15.0 cm was used to evaluate the P fractions. Analysis of P concentration in flag leaves and shoot (leaves stalk and grain) were also evaluated. Total P accumulated was calculated from the shoot P concentration in relation to the dry matter. For the future analysis, the rice harvest was done when the plants were in physiological maturity stage. The phosphorus fertilization did not affect the production of rice grains; even though with initial P soil level below of the critical level ( $< 6.0 \text{ mg dm}^{-3}$ ). The phosphorus fertilization applied to the dryland crops (maize and soybean) presented a residual effect to subsequent irrigated rice, even after four years of experiment under no-tillage management. For the irrigated rice no differences were shown between the results of P availability using the Mehlich-1 and anion-exchange resin methods. The P concentrations from the soils, using these two methods, presented significant correlations with the P accumulated in plants. The ARP presented similar performance as TSP regarding to the P nutrition in irrigated rice in rotation with dryland crops under no tillage. The P inorganic fractions that predominate in Albaqualf soil cultivated with maize and soybean under no tillage are extracted with 0.1 NaOH and 0.5 NaOH mol L<sup>-1</sup>. The fertilizations carried out annually with TSP and ARP had increased all the P inorganic fractions in soil. The organic fractions were not much affected by the phosphate fertilization. The P accumulated in shoot of rice plants was better correlated with the labile P fractions (anion-exchange resin, NaHCO<sub>3</sub> and 0.1 NaOH mol L<sup>-1</sup>), mainly in the superficial layer (0.0 - 2.5 cm).

Key words: Phosphorus fractions. Phosphorus fertilizing. Residual phosphorus effect.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	06
ABSTRACT.....	07
SUMÁRIO.....	08
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	09
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3. ARTIGO 1: Disponibilidade de fósforo para o arroz irrigado cultivado em um Planossolo Háplico no sistema plantio direto	30
Resumo.....	31
Abstract.....	32
Introdução.....	33
Material e Métodos.....	35
Resultados e Discussão.....	39
Conclusões.....	50
Referências Bibliográficas.....	51
4. ARTIGO 2: Formas de fósforo em Planossolo cultivado com arroz irrigado em resteva de milho e soja sob diferentes manejos da adubação fosfatada	54
Resumo.....	55
Abstract.....	57
Introdução.....	58
Material e Métodos.....	60
Resultados e Discussão.....	64
Conclusões.....	81
Referências Bibliográficas.....	82
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
7. APÊNDICES.....	101
8. ANEXOS.....	112

## **1. INTRODUÇÃO GERAL**

Os solos de várzea no Rio Grande do Sul apresentam uma característica comum, que é a drenagem deficiente (hidromorfismo). Isso se deve ao relevo predominantemente plano, associado a um perfil de solo com camada superficial pouco profunda e subsuperficial praticamente impermeável. Estas características tornam estes solos apropriados ao cultivo do arroz irrigado por alagamento.

O cultivo de arroz irrigado no sistema convencional associado com a pecuária de corte é o sistema de produção tradicionalmente estabelecido nos solos de várzea no Rio Grande do Sul. No entanto, este sistema tem enfrentado problemas de baixa rentabilidade, devido à alta infestação por plantas daninhas, à necessidade de longos períodos de pousio e degradação das características biológicas, físicas e químicas do solo. Essa realidade preocupa produtores e técnicos gerando uma demanda de pesquisas que busquem viabilizar sistemas alternativos de produção, como a utilização do plantio direto e cultivo mínimo de arroz irrigado, incluindo o uso de rotação de culturas, ampliando as possibilidades de utilização desses solos com culturas de sequeiro (PINTO et al., 2004).

O cultivo de culturas de sequeiro, como o milho e a soja, nesses solos apresentam-se como uma alternativa na entressafra do arroz irrigado (FERNANDES et al., 2002). No entanto, os solos de várzea apresentam fatores limitantes para o cultivo de espécies de sequeiro, como má drenagem e baixa fertilidade natural, requerendo adubações freqüentes.

O fósforo, apesar de seu pequeno requerimento pelas plantas, é o nutriente aplicado em maior quantidade nos solos brasileiros, devido sua baixa disponibilidade natural e grande afinidade pela fração mineral do solo, fazendo com que sua concentração na solução seja muito baixa, tornando-se um dos fatores limitantes para o cultivo em solos tropicais (RAIJ, 1991). Assim, faz-se necessário a utilização frequente de adubações fosfatadas para repor a quantidade de fósforo retirada pelas culturas ou para aumentar o fósforo disponível no solo.

As principais fontes de fósforo utilizadas na agricultura apresentam alta solubilidade em água, como os superfosfatos e o fosfato de amônio. A utilização de

fontes alternativas mais baratas, como os fosfatos naturais reativos, na forma farelada, tem aumentado. Entretanto, a eficiência dessas fontes alternativas é dependente das suas características intrínsecas, das características químicas do solo, do clima, das espécies vegetais e dos sistemas de manejo.

O sistema plantio direto proporciona maior eficiência de aproveitamento do fósforo pelas plantas, o que tem sido atribuído ao menor contato entre fertilizante e as partículas do solo, promovido pela ausência de revolvimento, e à presença de resíduos vegetais sob a superfície do solo que favorece a retenção de umidade e a taxa de difusão do fósforo até as raízes (COELHO e ALVES, 2003). Além disso, ânions de ácidos orgânicos liberados pelos resíduos vegetais podem competir com o fósforo pelos sítios de sorção, bem como complexar o alumínio e o ferro, aumentando a atividade do fósforo na solução do solo. De outro modo, o aumento da atividade biológica, em decorrência do maior teor de matéria orgânica, pode favorecer a mineralização do fósforo da fração orgânica do solo, podendo se constituir em importante fonte de fósforo às plantas (COELHO e ALVES, 2003). Desta forma, a aplicação de fosfatos naturais na superfície do solo, devido à liberação gradativa do fósforo disponível para as plantas, poderá ser um método racional e mais econômico de adubação fosfatada para o sistema plantio direto.

O método de análise de P no solo mais utilizado no Brasil é o extrator Mehlich-1 ( $H_2SO_4$  0,025N + HCl 0,05N), cujo mecanismo de extração está baseado na manutenção de uma atividade do íon  $H^+$  na solução suficiente para a dissolução parcial de fosfatos de cálcio e de óxidos de Fe e Al. Outro método utilizado no Brasil é o método de extração de P através de resinas trocadoras de íons, que foi proposto inicialmente por Amer et al. (1955). De acordo com Raij et al. (1986), as resinas de troca iônica contêm grupos funcionais com cargas elétricas. Este método baseia-se na dessorção ou dissolução do P da fase sólida para o restabelecimento de seu equilíbrio com o P dissolvido na suspensão do solo, que é continuamente adsorvido pela resina e trocado pelo ânion com o qual a resina é previamente saturada.

A presença do arroz irrigado na rotação de culturas deve promover alterações no comportamento do fósforo no solo. Durante o alagamento do solo, os óxidos de ferro podem ser considerados como fonte de fósforo para as plantas de arroz, já que as bactérias anaeróbias utilizam os óxidos férricos como receptores de elétrons no processo de respiração, reduzindo-os a óxidos ferrosos, de maior

solubilidade, promovendo a dessorção do fósforo. Neste ambiente, o fósforo poderá ser acessado pelas plantas (PONNAMPERUMA, 1972).

A drenagem do solo após o cultivo de arroz promove a reoxidação das formas reduzidas, com a formação de óxidos de ferro de baixa cristalinidade (VAHL, 1991). Diante disso, os óxidos retornam a funcionar como caráter dreno de fósforo com maior intensidade, ocasionando problemas no desenvolvimento e crescimento de culturas que sucedem o arroz.

O estudo da utilização de fontes alternativas de adubação fosfatada para o arroz irrigado, como os fosfatos naturais reativos, poderá contribuir para a diminuição dos custos de produção. Além disso, a dinâmica do fósforo durante o alagamento do solo é diferente do que ocorre em condições oxidadas e os métodos comumente utilizados para avaliar a disponibilidade deste nutriente, não identificam formas de fósforo que poderão contribuir para as plantas de arroz durante o alagamento. O fracionamento de fósforo desenvolvido por Hedley et al. (1982) proporciona a obtenção das formas de fósforo de acordo com a sua disponibilidade para as plantas. A utilização deste fracionamento no solo permitirá avaliar e compreender o comportamento do fósforo envolvendo a rotação de culturas com a presença de arroz irrigado, bem como o comportamento das fontes fosfatadas. Além disso, a relação das formas de fósforo com o fósforo acumulado nas plantas permitirá inferir sobre quais as formas de fósforo são mais acessadas pelas plantas de arroz.

Com base no exposto, o presente trabalho apresenta como objetivo geral avaliar o efeito da adubação fosfatada e a disponibilidade das formas de fósforo para o arroz irrigado cultivado em Planossolo no sistema plantio direto, após o cultivo de culturas de sequeiro.

O primeiro estudo apresentou como objetivos específicos avaliar a resposta do arroz irrigado à adubação fosfatada com superfosfato triplo (SFT) e fosfato natural de Arad (FNA), e o efeito residual do fósforo aplicado em culturas de sequeiro em sistema plantio direto para o arroz subsequente, assim como avaliar a eficiência dos extractores Mehlich-1 e resina de troca aniónica como indicadores da disponibilidade de P no solo. O segundo estudo foi realizado com os objetivos específicos de avaliar a distribuição das frações inorgânicas e orgânicas de fósforo em um Planossolo cultivado com milho e soja em sistema plantio direto, adubado

com superfosfato triplo (SFT) e fosfato natural de Arad (FNA), e a contribuição das frações inorgânicas para a nutrição do arroz irrigado subsequente.

O corpo da Tese é dividido em oito itens, segundo o modelo de apresentação em forma de artigos científicos. A primeira parte da Tese é constituída por uma introdução geral com objetivos geral e específicos. No item 2 é apresentada uma revisão bibliográfica, onde são discutidos a dinâmica do fósforo no solo, a avaliação de sua disponibilidade através dos métodos Mehlich-1 e resina de troca aniônica e a determinação das frações de fósforo inorgânico e orgânico. Nos itens 3 e 4 são apresentados os artigos 1 e 2. O artigo 1 apresenta uma breve introdução sobre a utilização de adubos fosfatados solúveis e naturais reativos e a disponibilidade de fósforo avaliada pelos métodos Mehlich-1 e resina de troca aniônica em um Planossolo para o arroz irrigado em resteva de culturas de sequeiro. O artigo 2 apresenta a técnica de fracionamento de fósforo utilizada em um Planossolo, as formas de fósforo presentes neste solo antes do alagamento e a contribuição destas para as plantas de arroz cultivado após as culturas de sequeiro. Nos itens 5, 6, 7 e 8 são apresentadas considerações finais, referências bibliográficas, apêndices e anexos, respectivamente.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Formas de fósforo no solo**

O teor de fósforo total na superfície dos solos varia de 0,005 a 0,15% (HAVLIN et al., 2005), distribuídas entre as frações orgânicas e inorgânicas, cujos teores são variáveis entre os solos.

O fósforo orgânico pode constituir de 20 a 80% do fósforo total do solo e é extremamente relevante nos solos tropicais, pois atua ativamente na disponibilidade de fósforo às plantas. Esta forma de fósforo é originária de resíduos vegetais e animais presentes no solo, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição. Existe uma grande variedade de compostos orgânicos do solo, que contém fósforo, sendo que uma grande parte destes ainda não foi identificada. Os principais compostos já identificados são os fosfatos de inositol, os fosfolípideos, ácidos nucléicos e outros ésteres fosfatos (DALAL, 1977; STEVENSON, 1986).

As formas orgânicas de fósforo são classificadas de acordo com a ligação predominante. Os fosfatos monoéster, como o fósforo inositol, apresenta alta energia de ligação com a estrutura da molécula e alta carga residual, conferindo facilidade de interação com os constituintes inorgânicos do solo. Isso dificulta a mineralização e favorece o acúmulo destas formas no solo, que são consideradas de baixa labilidade às plantas (DALAL, 1977; STEWART e TIESSEN, 1987). Já os fosfatos diéster, como fosfolipídeos e os ácidos nucléicos, apresentam estrutura química que facilita a sua decomposição, sendo, portanto facilmente mineralizados e de baixa persistência nos solos.

O fósforo presente na biomassa microbiana exerce influência sobre a dinâmica de nutrientes no solo, podendo provocar mineralização dos nutrientes presentes na forma orgânica nos resíduos ou imobilização dos nutrientes presentes na forma mineral no solo. Além da decomposição biológica, ocorre a mineralização bioquímica, onde os microrganismos e as plantas liberam enzimas fosfatases, as quais retiram o fósforo dos compostos orgânicos. Este mecanismo ocorre principalmente em resposta a deficiência de fósforo (NOVAIS e SMYTH, 1999).

O fósforo inorgânico pode ser separado em dois tipos, o fósforo dos minerais primários ou estruturais e o fósforo adsorvido somado ao fósforo na solução. O fósforo presente nos minerais primários encontra-se em teor muito baixo nos solos, dificultando inclusive a identificação dos minerais que contém o fósforo por difratometria de raios-X, já que estes se encontram misturados com outros minerais de maior abundância nos solos (LINDSAY, 1979). O fósforo inorgânico adsorvido, de maior abundância, pode ser encontrado ligado a ferro, alumínio e cálcio, adsorvido às caulinitas, adsorvido à matéria orgânica do solo através de pontes de cátions (compostos ternários), resultando em baixos teores de fósforo na solução (GATIBONI et al., 2005).

Em pH abaixo de 5 há maior ocorrência do fósforo ligado a ferro e alumínio, enquanto que em pH acima de 7 a ligação ocorre preferencialmente com o cálcio, sendo que a variação no pH pode favorecer a dissolução e a formação de outros compostos (LINDSAY, 1979). A adsorção de fósforo aos oxi-hidróxidos de ferro e alumínio ocorre nos sítios ácidos de Lewis, onde os grupos OH e OH<sub>2</sub> ligados monocoordenadamente ao metal são trocados com o fosfato, fenômeno conhecido como troca de ligantes (PARFITT, 1978). O fosfato liga-se aos minerais do solo em formas monodentadas e bidentadas (Figura 1), sendo que a energia de ligação é crescente para os compostos monodentado, bidentado e a possibilidade de dessorção de fósforo aumenta na ordem inversa.

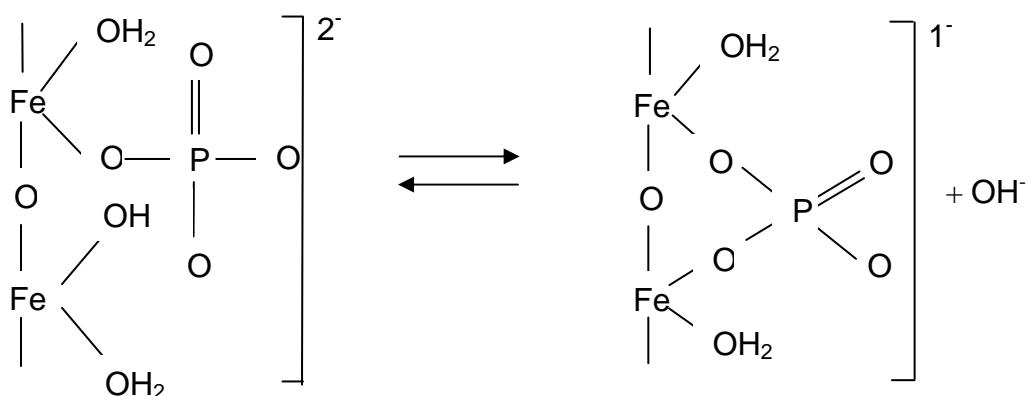


Figura 1. Esquema representativo da adsorção de fósforo através de ligações monodentadas e bidentadas. Novais e Smyth (1999).

Com o passar do tempo, ocorre o envelhecimento do cristal devido à predominância da forma bidentada e também a penetração (difusão) do fosfato nas imperfeições dos cristais. A fixação de fósforo pela precipitação e/ou adsorção, principalmente em solos tropicais intemperizados, tornam o fósforo um dos nutrientes mais utilizados como fertilizante no Brasil (NOVAIS e SMYTH, 1999).

Uma adequada disponibilidade de fósforo às culturas, de acordo com as suas exigências nutricionais, permite que as mesmas desempenhem diversas funções vitais no metabolismo das plantas tais como armazenamento e transferência de energia na forma de ATP. Além disso, um melhor aproveitamento do fósforo nativo e o que é adicionado pelas culturas, principalmente em solos com baixa capacidade de retenção de fósforo, colaboram para diminuir os riscos de aumento nas concentrações de fósforo nos ambientes aquáticos, evitando problemas ambientais como a eutrofização das águas, provocadas pelo crescimento excessivo de algas (NOVAIS e SMYTH, 1999).

## **2.2. Reatividade do fósforo adicionado no solo**

Os fosfatos acidulados, devido a sua alta solubilidade, proporcionam disponibilidade de fósforo imediata às plantas. Sua utilização é denominada de adubação de implantação ou de arranque, pois proporcionam uma resposta inicial da planta, em virtude do equilíbrio estabelecido entre o crescimento rápido, a maior demanda de fósforo nos estágios iniciais e a grande disponibilidade inicial de fósforo pelas fontes solúveis. Entretanto, com o aumento do tempo de contato solo-fosfato, o fosfato se liga a dois pontos da superfície dos óxidos formando ligações bidentadas ou penetra nas imperfeições dos cristais (difusão em fase sólida) segundo Novais e Smyth (1999), ou entre os microcristais, diminuindo seu equilíbrio com o fósforo na solução e, por conseguinte, a disponibilidade para as plantas (PARFITT, 1978; BARROW, 1983). Dentre os fatores que afetam a eficiência das fontes solúveis como fonte de fósforo às plantas, o tempo de dissolução deve ser levado em consideração, pois a rápida solubilização ao longo do ciclo da planta faz com que haja mais fósforo na solução para ser adsorvido em formas não-labéis.

Como fonte alternativa a utilização dos adubos fosfatados solúveis, tem-se utilizado os fosfatos naturais reativos. Os fatores responsáveis pela sua expansão na agricultura brasileira são atribuídos às facilidades atuais de importação e de seu

menor custo por unidade de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> quando comparado às fontes solúveis (KAMINSKI e PERUZZO, 1997). Entretanto, a utilização dos fosfatos naturais reativos de baixa solubilidade em água, como fonte eficiente de fósforo para as plantas, é dependente das suas características físicas e químicas, do clima, das características do solo, das espécies de plantas e sistemas de cultivo, das práticas de manejo e das interações desses fatores (RAJAN et al., 1996).

As características físicas das rochas fosfáticas que afetam a sua solubilidade são o tamanho dos cristais e a porosidade. As rochas de origem sedimentar apresentam cristais de menor tamanho e maior porosidade do que as rochas de origem ígnea, conferindo maior superfície específica, facilitando sua dissolução (KHASAWNEH e DOLL, 1978). Segundo esses mesmos autores, a característica química que mais afeta a solubilidade dos fosfatos naturais é o grau de substituição isomórfica de fosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) por carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). Estas substituições ocorrem no momento da formação da rocha, criando um desequilíbrio na estrutura do cristal que altera o seu produto de solubilidade. Conseqüentemente, a reatividade e solubilidade do fosfato são diretamente proporcionais ao seu grau de substituição isomórfica.

De acordo com o grau de substituição isomórfica de fosfatos por carbonatos, os fosfatos naturais podem ser divididos em duas categorias: os fosfatos naturais duros, em que as apatitas não têm, ou têm poucas substituições isomórficas, como são a maioria dos fosfatos naturais brasileiros; e os fosfatos naturais moles, de origem sedimentar, que possuem alto grau de substituição isomórfica do fosfato por carbonato na apatita, resultando num cristal imperfeito, poroso e com baixa energia entrópica, podendo ser facilmente hidrolisado. Por essa razão são reconhecidos como fosfatos naturais reativos (KAMINSKI e PERUZZO, 1997).

Como os fosfatos naturais são insolúveis em água, é necessário que os mesmos reajam com substâncias ácidas do solo para que o fósforo fique disponível às plantas, ou seja, a solubilização é maior em solos com pH mais baixo. Conseqüentemente, quanto menor o tamanho das partículas do fosfato natural e maior for sua incorporação ao solo, maior será a liberação de fósforo devido a sua maior área de contato (HOROWITZ, 1998).

Além do pH, os teores de cálcio e fósforo na solução influenciam na dissolução dos fosfatos naturais (KHASAWNEH e DOLL, 1978), pois, baixas concentrações destes nutrientes na solução favorecem o deslocamento da reação

no sentido de dissolução do fosfato natural. Dentre os três fatores mencionados acima para a dissolução, o teor de cálcio é o fator que mais influencia.

A probabilidade de resposta dos fosfatos naturais é maior em solos com a acidez intermediária e com teores baixos a médios de fósforo disponível no solo (SANCHES et al.;1980; PERUZZO, 1998), em decorrência da ausência ou da menor presença de íons complexantes, como o cálcio e o alumínio, o que possibilita o fertilizante expressar a sua eficiência.

Solos mais intemperizados, com predominância de argilominerais 1:1 e óxidos de ferro e alumínio e com cargas pH-dependentes apresentam maior capacidade de retenção de fósforo do que solos menos intemperizados. A retenção do fósforo formando fosfatos de ferro e de alumínio é maior em solos mais intemperizados, resultando em menor concentração de fósforo na solução, aumentando, assim, a velocidade de dissolução do fosfato natural (CHIEN et al., 1987).

O teor de matéria orgânica do solo pode influenciar indiretamente na dissolução do fosfato natural da seguinte maneira: a) aumento da CTC, promovendo maior adsorção de cálcio; b) o  $pK_a$  da matéria orgânica é baixo, tornando-a uma importante fornecedora de íons hidrogênios através da desprotonação dos grupos carboxílicos e fenólicos, c) a produção de ácidos orgânicos fornecem prótons e promovem a complexação de cálcio e alumínio na solução, diminuindo a sua atividade e consequentemente favorecendo a dissolução (RAJAN et al., 1996).

Além das características dos solos, as espécies vegetais influenciam na dissolução dos fosfatos naturais. As diferenças na absorção de fósforo dos fosfatos naturais entre as espécies estão relacionadas com o pH da rizosfera e com a cinética de absorção de cálcio e fósforo (RAJAN et al., 1996). Porém, o efeito dreno-planta é menor que o dreno-solo, tanto para cálcio como para fósforo.

É importante salientar que, quando se generaliza a não utilização dos fosfatos naturais em solos com pH superior a 5,5, pode-se incorrer num equívoco, ao se desconsiderar o pH da rizosfera das plantas cultivadas. Assim sendo, um pH em água de 6 pode ser reduzido na rizosfera para 4,5, favorecendo a dissolução dos fosfatos naturais (GILLESPIE e POPPE, 1990). Resultados de trabalho realizado por Marschner (1991) demonstraram o expressivo efeito da acidificação da rizosfera de plantas sobre a solubilização de fosfato natural, onde plantas supridas por N

amoniacal apresentaram valores de pH da rizosfera até duas unidades inferiores ao restante do solo.

As leguminosas apresentam maior absorção de cálcio e maior acidificação da rizosfera, promovendo maior dissolução dos fosfatos naturais quando comparadas às gramíneas (NOVAIS e SMYTH, 1999). Somado et al. (2003), avaliaram o efeito da combinação dos fosfatos naturais com a leguminosa *Aeschynomene afraspera* na cultura de arroz irrigado. Segundo os autores, a aplicação de fosfato natural com a leguminosa proporcionou maior rendimento de grãos de arroz quando comparada à aplicação de fosfato natural sem a presença da leguminosa. Goepfert et al. (1986) avaliaram a produção de soja em respostas a diferentes fosfatos em solos ácidos do Rio Grande do Sul, demonstrando eficiência semelhante dos fosfatos naturais e superfosfato triplo ao longo de quatro cultivos.

Plantas com raízes que têm pêlos radiculares bem desenvolvidos são mais eficientes em reduzir os teores de fósforo e cálcio na solução, favorecendo a dissolução do fosfato natural. Além disso, algumas espécies de plantas secretam substâncias complexantes como citratos e oxalatos, as quais complexam o cálcio na solução, favorecendo a dissolução do fosfato natural (MARWAHA, 1989). Por outro lado, espécies de plantas anuais que apresentem desenvolvimento muito rápido (por exemplo, o feijão), com alta taxa de acúmulo de fósforo e alto C<sub>min</sub>, necessitam de alta concentração de fósforo na solução, o que pode não ser atingido pelo produto de solubilidade do fosfato natural (RAJAN et al., 1996).

A eficiência agronômica do fosfato natural normalmente aumenta com o tempo, devido ao seu alto efeito residual. O efeito residual de adubos fosfatados com alta solubilidade em água tende a diminuir com o passar do tempo, enquanto que para os fosfatos naturais, o efeito imediato, após a aplicação, tende a ser menor em relação aos fosfatos de alta solubilidade em água (RAIJ, 1991). Porém, com o passar do tempo de aplicação, principalmente em solos ácidos, o rendimento acumulado das culturas para os fosfatos naturais são similares aos rendimentos obtidos como fontes de fósforo de alta solubilidade. Resultados contraditórios acontecem devido às diferentes condições nas quais os fosfatos naturais foram pesquisados (características físicas e químicas dos solos, granulometria do fosfato natural, espécies cultivadas, número de cultivos, sistemas de manejo, clima, etc.).

Em trabalho realizado por Gomes et al. (2001) que avaliaram o efeito imediato e residual da adubação fosfatada no rendimento do milho em solo de

várzea sob plantio direto, o fosfato natural de Arad e o superfosfato triplo, não diferiram entre si, durante os três primeiros cultivos. A partir do quarto cultivo não houve resposta às fontes fosfatadas, indicando a ausência do efeito residual.

O efeito de fontes de fósforo na produtividade da alfafa e centrosema observado por Moreira et al. (2002) em um Latossolo, foi maior para o superfosfato triplo do que para fosfato natural Gafsa, no primeiro cultivo. Entretanto, com a seqüência dos cortes, o fosfato natural se equiparou à fonte solúvel. Richart et al. (2006) compararam o efeito residual do fosfato natural reativo com o superfosfato triplo sobre a produção de biomassa de aveia e componentes da produção de soja. Os resultados demonstraram que, para o primeiro ano, não houve superioridade do superfosfato triplo em relação ao fosfato natural na produtividade da soja.

O termo “lag time” foi estabelecido por Edmeades et al. (1991) como o tempo necessário para 90% da dissolução dos fosfatos naturais aplicados ter ocorrido para um determinado tempo. Isso significa que quanto maior for o “lag time” menor será a fração de fosfato natural dissolvida. Rein et al. (1994) e Kaminski e Peruzzo (1997) observaram que os fosfatos naturais reativos incorporados ao solo com pH menor de 5,5 e baixo teor de fósforo, apresentaram eficiência agronômica da ordem de 60 a 65% no primeiro cultivo em comparação com o superfosfato triplo. A partir do segundo ou terceiros cultivos, esses fosfatos atingiram eficiência similar a dos fosfatos solúveis.

Em trabalho realizado por Gomes et al. (2006) onde avaliaram o efeito imediato do fosfato natural de Arad sobre o desempenho do arroz, os resultados demonstraram que o fosfato natural apresentou comportamento semelhante ao superfosfato triplo na produtividade do arroz irrigado. Resultados semelhantes foram observados por Patella (1965); Sherer e Bacha (1972) e Lopes et al. (1983). Isso se deve, provavelmente, ao teor alto inicial ou inativo de fósforo no solo e também pela própria dinâmica do fósforo em solos reduzidos que difere da dinâmica do mesmo em solos de sequeiro.

Quando os solos são reduzidos, ocorre aumento na disponibilidade de fósforo em solos ácidos devido aos seguintes fatores: redução do  $\text{Fe}^{+3}$  a  $\text{Fe}^{+2}$ , dissolução dos fosfatos minerais secundários, acréscimo no fator difusibilidade e complexação de cátions. A redução dos óxidos férricos a ferrosos, de maior solubilidade, é considerada por pesquisadores (VAHL, 1991; FARIAS, 2007) como fator principal para o aumento da disponibilidade de fósforo em solos reduzidos. Esta

redução está diretamente envolvida com a liberação do fósforo adsorvido para a solução.

Além disso, esta reação também envolve o consumo de íons hidrogênios, aumentando o pH da solução. O efeito deste na dessorção de ânions é resultado de mudanças nas cargas líquidas nas superfícies das partículas do solo. Quando o pH do solo for maior que o ponto de carga zero (PCZ), existe aumento das cargas negativas e maior competição de íons OH<sup>-</sup> e ácidos orgânicos pelos sítios de sorção ocorrendo uma repulsão dos fosfatos, aumentando a concentração dos íons H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> e HPO<sub>4</sub><sup>-2</sup> na solução (SPOSITO, 1989).

Entretanto, é importante salientar que as alterações químicas que ocorrem em solos alagados, como aumento do pH e dos teores de fósforo e cálcio na solução são contrárias à dissolução dos fosfatos naturais diminuindo a sua solubilização, conforme observado nos solos Planossolo e Cambissolo por Gonçalves (2003). Desta forma, deve-se ter cautela em relação à utilização destes fosfatos naturais em solos alagados, com teores de fósforo abaixo do nível crítico. Sosbaj (2007) recomenda que os fosfatos naturais reativos sejam utilizados no arroz apenas quando os teores de P no solo forem superiores a 3,0 mg dm<sup>-3</sup>.

### **2.3. Comportamento do fósforo em relação aos sistemas de cultivo**

No sistema plantio direto, a dinâmica do fósforo com o decorrer dos cultivos é diferenciada em relação ao sistema convencional. O maior teor de fósforo no solo, principalmente na camada superficial, pode ser devido à adição desse nutriente nas camadas superficiais, ao efeito de diluição, a melhor estruturação do solo, às reações de adsorção e à sua reciclagem pela mineralização dos resíduos (SÁ, 1999; 2004). A aplicação superficial de fósforo, sem o revolvimento do solo reduz o contato entre os colóides do solo e o íon fosfato, diminuindo as reações de adsorção (MUZILLI, 1983). Além disso, a mineralização lenta e gradual dos resíduos orgânicos proporciona a liberação e redistribuição das formas orgânicas de fósforo, mais móveis no solo e menos suscetíveis às reações de adsorção (SANTOS e ANGHINONI, 2003).

Em solo de sequeiro, o maior teor de matéria orgânica e a presença contínua de resíduos vegetais sobre a superfície do solo promovem maior disponibilidade de água em função da maior taxa de infiltração e da maior retenção

de água e menor taxa de evaporação, favorecendo o processo de difusão do fósforo até a superfície radicular. Além disso, a decomposição dos resíduos vegetais libera ácidos orgânicos, que atuam como agentes complexantes de elementos tóxicos como manganês e alumínio, beneficiando o crescimento radicular e o aumento na disponibilidade de fósforo (HUE, 1991).

Durante a decomposição dos resíduos pelas bactérias ocorre a produção de polissacarídeos, que se misturam com as partículas de argila aumentando a estabilidade dos agregados, ou seja, estas substâncias atuam como agentes cimentantes das partículas individuais do solo. Isso proporciona maior agregação e consequentemente maior resistência à erosão hídrica, diminuindo o escorramento superficial e consequentemente o deslocamento das partículas de argila e o fósforo adsorvido às mesmas.

O maior acúmulo de fósforo observado nas camadas superficiais pelos fatores já mencionados não implica que o fósforo não possa se acumular no perfil do solo com o tempo de cultivo. A descida de fósforo para maiores profundidades tem sido atribuída à decomposição dos resíduos orgânicos depositados na superfície, à decomposição das raízes no solo e a formação de compostos orgânicos solúveis de fósforo, que se deslocam às camadas inferiores do solo, independentemente do modo de aplicação do adubo (BAYER, 1993), essa descida do fósforo ocorre após a saturação dos sítios de adsorção.

O não revolvimento do solo, um dos requisitos necessários ao sistema plantio direto, bem como as diferenças entre os sistemas de cultivo, ocasionam ou possibilitam alterações no modo de aplicação e também no tipo de fertilizantes fosfatados utilizados, buscando-se uma maior otimização de fósforo no sistema solo-planta. No sistema convencional, as fontes solúveis são aplicadas em linha ou a lanço, com o objetivo de diminuir a sorção de fósforo, enquanto que os fosfatos naturais são geralmente incorporados ao solo antes do plantio, com o objetivo de reagir com íons hidrogênios e encontrar regiões do solo não saturadas com fósforo e cálcio (NOVAIS e SMYTH, 1999).

No sistema plantio direto, de maneira geral, em solos com baixa disponibilidade de fósforo, os adubos fosfatados solúveis e preferencialmente os fosfatos naturais reativos são aplicados e incorporados antes do início do primeiro cultivo, ocorrendo homogeneização do fosfato na camada arável de 0 - 20 cm. Isso corresponde à fase de instalação do sistema plantio direto com a utilização da

adubação corretiva total (ANGHINONI, 2006). Outra alternativa é o aumento de 30 a 40% da adubação fosfatada na linha de semeadura das primeiras 4 a 6 culturas a partir da implantação do sistema plantio direto (LOPEZ et al., 2004). Isso se deve ao maior contato do fósforo aplicado na região que será provavelmente ocupada pelas raízes do solo, aumentando o aproveitamento deste elemento pelas plantas.

Em solos situados nas classes alto ou muito alto, as fontes de fósforo são aplicadas a lanço. Entretanto, deve-se considerar que este tipo de aplicação potencializa as perdas de nutrientes por escorramento superficial, que pode ser agravado principalmente à medida que os produtores retiram os terraços no plantio direto (CERETTA, 2006).

Com o decorrer da sucessão de culturas, a adubação fosfatada deve ser realizada na linha de semeadura, especialmente para solos com baixa disponibilidade de fósforo, mas pode ser realizada a lanço na superfície do solo, para solos pertencentes às classes médio, alto e muito alto. Estas adubações anuais de manutenção ou reposição devem ser efetuadas de preferência, com fosfatos solúveis. Segundo Anghinoni (2006) para a utilização de fosfatos naturais reativos, é necessário considerar outros fatores como a velocidade de dissolução dos fosfatos naturais, que são dependentes do pH, dos teores de cálcio e de fósforo no solo e da intensidade de seu contato com o mesmo.

O efeito imediato e residual do fosfato natural de Arad sobre o desempenho do arroz, foi avaliado por Gomes et al. (2006) em rotação de culturas no sistema plantio direto, em solo de várzea. Os resultados demonstraram que o fosfato natural apresentou comportamento semelhante aos superfosfato triplo nos três primeiros cultivos (arroz, milho e soja). No quarto cultivo (arroz) o fosfato natural apresentou melhor desempenho residual do que o superfosfato triplo, resultando da possibilidade da utilização do fosfato natural em sistemas de rotação de culturas. Diante disso, a taxa de dissolução do fosfato natural deverá ser suficiente para manter a disponibilidade anual de fósforo, objetivando atender as demandas das plantas.

A introdução do arroz irrigado em sistema de rotação de culturas no sistema plantio direto pode promover alterações na disponibilidade de fósforo no solo. Durante o alagamento do solo, os óxidos de ferro passam a ser considerados como fonte de fósforo para as plantas de arroz, já que bactérias anaeróbias utilizam os óxidos férricos como receptores de elétrons no processo de respiração, reduzindo-

os a óxidos ferrosos, de maior solubilidade, promovendo a dessorção do fósforo (PONNAMPERUMA, 1972). Neste ambiente, o fósforo poderá ser acessado pelas plantas.

Entretanto, a drenagem do solo após o cultivo de arroz promove a reoxidação das formas reduzidas, com a formação de óxidos de ferro de baixa cristalinidade (VAHL, 1991). Diante disso, os óxidos voltam a funcionar como caráter dreno de fósforo com maior intensidade, diminuindo o efeito residual para as culturas subsequentes.

Resultados obtidos por Fabres (1998) demonstraram baixa produtividade de azevém após o cultivo de arroz. Uma alternativa seria realizar a adubação fosfatada no azevém, possibilitando a manutenção de níveis de fósforo no solo, adequados para o arroz subsequente, já que esta cultura necessita de menor quantidade de fósforo quando comparadas às culturas de sequeiro para solos com os mesmos teores de fósforo no solo.

#### **2.4. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo**

A maioria das metodologias utilizadas para avaliar a disponibilidade de P dos solos foi desenvolvida nas décadas de 40 e 50 e baseiam-se em obter uma estimativa ou um índice da fração lábil do P que se correlacione com o P absorvido pelas culturas. Segundo Barber (1984), muitos métodos foram criados visando extrair do solo somente a fração lábil de P. A maioria dos métodos extrai uma parcela de P do solo que apresenta uma boa correlação com o P absorvido pelas plantas. Isto ocorre principalmente quando solos com características semelhantes de concentração inicial de P na solução, poder tampão e coeficiente de difusão efetivo são agrupados e analisados. Entretanto, basta agrupar os solos cujas características variam significativamente para que um mesmo método não apresente boa correlação com as quantidades de P absorvido pelas plantas.

As características morfológicas das raízes das plantas, além das características dos solos, podem afetar os resultados, pois plantas com um menor sistema radicular serão mais afetadas pela concentração de P na solução do solo do que as plantas com maior sistema radicular, onde o P-lábil adsorvido aos colóides será mais facilmente acessado. Assim, é possível que a agregação das

características do sistema radicular resulte em melhor correlação entre o P extraído pelo método de análise utilizado e o P absorvido pelas plantas.

Muitos métodos de extração de P, citados por Chang (1978), têm apresentado bons resultados quanto à recomendação de adubação fosfatada para culturas de sequeiro, já para solos alagados estes métodos não apresentam a mesma eficiência, principalmente por dois problemas que não ocorrem em solos destinados a culturas de sequeiro: os teores de P aumentam significativamente devido à redução do solo originado pelo alagamento, sendo que o aumento nos teores de P disponível varia de solo para solo; e como os métodos analisam as amostras com o solo seco, não refletem o possível aumento de P disponível após o alagamento.

O extrator Mehlich-1 ( $H_2SO_4$  0,025N + HCl 0,05N) é o método mais utilizado no Brasil. O mecanismo de extração está baseado na manutenção de uma atividade do íon  $H^+$  na solução suficiente para a dissolução parcial de fosfatos de cálcio e de óxidos de Fe e Al (LINDSAY, 1979).

O método de extração de P através de resinas trocadoras de íons foi proposto inicialmente por Amer et al. (1955). No Brasil, somente o Estado de São Paulo utiliza este método em seus laboratórios de rotina. De acordo com Raij et al. (1986), as resinas de troca iônica são produtos sintéticos que apresentam uma rede tridimensional de cadeias de hidrocarbonetos, contendo grupos funcionais com cargas elétricas, sua estrutura é porosa e flexível, podendo dilatar-se e reter solvente em seu interior. Este método baseia-se na dessorção ou dissolução do P da fase sólida para o restabelecimento de seu equilíbrio com o P dissolvido na suspensão do solo, que é continuamente adsorvido pela resina e trocado pelo ânion com o qual a resina é previamente saturada. Este método apresenta algumas vantagens: a extração é contínua e feita através da água de forma similar ao que ocorre na absorção de P pelas raízes das plantas; não é utilizado nenhum reagente químico energético, que poderia dissolver fosfatos não lábeis; o pH da suspensão solo-resina é um pouco abaixo de 7, coincidente com a faixa de maior disponibilidade de P; a presença do bicarbonato ajuda a tamponar a solução diminuindo a flutuação dos resultados (SILVA e RAIJ, 1999).

Outra forma de avaliação do fósforo no solo pode ser realizada através da utilização das técnicas de fracionamento de fósforo que visam à identificação das formas com que este elemento é retido no solo e sua contribuição na capacidade de

suprimento de fósforo para as plantas. Atualmente, são utilizadas várias técnicas de fracionamento de fósforo, destacando-se os métodos de Chang e Jackson (1957) e de Hedley et al. (1982) modificado por Condron et al. (1985). Estas técnicas variam no número e na forma das frações extraídas (inorgânicas e orgânicas), bem como na ordem e tipo de extrator.

O método de Hedley et al. (1982) possibilita a obtenção das diferentes frações orgânicas e inorgânicas do solo de acordo com a sua disponibilidade, independentemente do grau de intemperismo, dos sistemas de cultivos empregados e da adubação fosfatada (HEDLEY et al., 1982; TIJESSEN et al., 1984; GUO et al., 2000). O método utiliza sequecialmente extractores de menor à maior força de extração, os quais removem P inorgânico e P orgânico das formas mais disponíveis às mais estáveis. As formas extraídas pela resina de troca aniónica (RTA) e NaHCO<sub>3</sub> são ditas formas lábeis, ou seja, de maior disponibilidade às plantas, enquanto aquelas extraídas com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, são consideradas formas moderadamente lábeis. As frações de fósforo extraídas por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> (CONDRON et al., 1985), HCl 1 mol L<sup>-1</sup> e o residual seriam consideradas não lábeis.

Frações obtidas através do fracionamento de Hedley foram agrupadas por Cross e Schlesinger (1995) em duas formas: fósforo geoquímico e fósforo biológico. O fósforo geoquímico é a soma das frações inorgânicas extraídas por RTA; NaHCO<sub>3</sub>; NaOH 0,1; NaOH 0,5; e HCl 1 mol L<sup>-1</sup> mais o fósforo residual, enquanto que o fósforo biológico é a soma das frações orgânicas extraídas por NaHCO<sub>3</sub>, NaOH 0,1 e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>. Enquanto que, Santos e Anghinoni (2003) estabeleceram seis compartimentos inorgânicos de acordo com o extrator utilizado (RTA; NaHCO<sub>3</sub>; NaOH 0,1 e 0,5 mol L<sup>-1</sup>; HCl 1 mol L<sup>-1</sup> e residual) e quatro compartimentos orgânicos (microbiano; NaHCO<sub>3</sub>; NaOH 0,1 e 0,5 mol L<sup>-1</sup>). Os compartimentos foram classificados em quatro grandes reservatórios: inorgânico, orgânico, rápido e lento. Os dois primeiros referem-se à forma de identificação e os dois últimos de acordo com a habilidade em repor o fósforo na solução.

A labilidade da fração de P extraída por NaHCO<sub>3</sub> é relatada por muitos pesquisadores, indicando que os teores extraídos pela RTA não representam todo fósforo disponível do solo (TIJESSEN et al.; 1984; CROSS e SCHLESINGER, 1995; GUO e YOST; 1998; GATIBONI et al., 2005). A fração de P inorgânico extraída por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> representa o fósforo inorgânico moderadamente lábil, quimiossorvido por ligações monodentadas e bidentadas aos óxidos e à caulinita

(HEDLEY et al., 1982) . Além disso, representa as formas precipitadas de fósforo com o ferro e alumínio (RUIZ et al., 1997).

A fração de P orgânico extraída por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> representa o fósforo orgânico moderadamente lável ligado aos ácidos húmicos (CROSS e SCHEHLESINGER, 1995; LOPEZ et al., 2004). O fósforo orgânico é representado pelas formas monoéster, diéster, fosfonatos e polifosfatos (TATE e NEWMAN, 1982). Os fosfatos monoéster (hexafosfato de inositol, açúcares fosfatados, mononucleotídeos e fosfato colina) representam a maior parte do fósforo orgânico em dois solos de terras altas do Rio Grande do Sul, um Argissolo e outro Latossolo (SANTOS e ANGHINONI, 2003). Estas formas são adsorvidas com alta energia por causa de sua elevada carga residual, tornando quimicamente e fisicamente protegida do ataque microbiano (STEWART e TIJESSEN, 1987; CONDRON et al., 1990).

Os fosfatos diéster são mineralizados em maior proporção do que os fosfatos monoéster, quando o fósforo inorgânico não é capaz de suprir a absorção pelas plantas (GATIBONI et al., 2005). Em sistemas onde ocorre o acúmulo de fósforo inorgânico pela adubação fosfatada, a planta absorve esta forma de fósforo, ocorrendo acúmulo do fósforo orgânico. A fração de P inorgânico e P orgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> representa o fósforo fisicamente protegido no interior de microagregados (CROSS e SCHLENSIGER, 1995). Lopez et al. (2004) observaram que a aplicação de superfosfato triplo aumentou esta fração, indicando a dessorção do fósforo de fosfatos de ferro e alumínio.

A fração de P extraída por HCl 1 mol L<sup>-1</sup> representa as formas inorgânicas de fósforo associadas ao cálcio (CROSS e SCHLESINGER, 1995). A associação com este cátion pode ocorrer nos minerais primários, fosfatos de cálcio neoformados e em fosfatos naturais. Saleque et al. (2004) e Gatiboni et al. (2005) observaram aumento nos teores desta fração devido à adição de superfosfato triplo e também pela aplicação de calcário. Em ambas as situações observaram-se neoformações de fosfatos de cálcio. Solos com baixos teores na fração extraída por HCl são resultantes do avançado grau de intemperismo, que resulta na lixiviação de cátions básicos.

A fração residual representa o fósforo presente nas substâncias húmicas, bem como formas inorgânicas de fósforo insolúveis, e a fração total representa todas as formas de fósforo, incluindo fósforo estrutural e fósforo ocluso em minerais do

solo. Uma das grandes utilidades do fracionamento de Hedley é a detecção das modificações das formas de fósforo em função do sistema de cultivo e sucessão de culturas utilizadas.

As alterações nas formas de fósforo no solo são dependentes da quantidade adicionada, da exportação pelos grãos e das transformações químicas no solo (mineralização do fósforo orgânico; ciclagem de nutrientes e reações de sorção). Zhang e Mackenzie (1997) relatam que a fração de P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> foi a mais sensível no balanço entre as adições e retiradas durante um longo período de cultivo, indicando que esta fração atua como dreno e posteriormente como fonte de fósforo às plantas.

Em estudo realizado por Gatiboni et al. (2005) em que analisaram as formas de fósforo submetidas a várias sucessões de culturas, observaram que as formas inorgânicas de P extraídas por RTA, NaHCO<sub>3</sub> e NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> foram sensíveis a sucessão do cultivos, tendo seus teores modificados pela absorção pelas plantas. Quando estas frações pararam de repor o fósforo na solução, as frações inorgânicas extraídas por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> e P residual passaram a tamponar as formas lábeis. As formas orgânicas de fósforo foram ativas como fonte de fósforo para o sistema apenas nos solos com baixos conteúdos de fósforo inorgânico. Nos solos com adição de fertilizante fosfatado, houve acúmulo de fósforo principalmente na formas inorgânicas, as quais foram fornecedoras do fósforo para ser absorvido pelas plantas. A participação das formas orgânicas no tamponamento do fósforo absorvido ocorre em ecossistemas naturais, sem adição de fósforo, favorecendo a mineralização bioquímica do fósforo orgânico (TIESSEN et al., 1984; BECK e SANCHES, 1994; GUGGENBERGER et al., 1996).

Resultados de pesquisa realizada por Tokura et al. (2002) mostraram maiores valores de fósforo total com o decorrer do tempo no sistema plantio direto. O fracionamento propicia constatar que com o tempo de cultivo sob plantio direto numa mesma classe de solo, as formas de P não lábeis em relação ao P total tendem a diminuir, sendo acompanhados de um aumento relativo das formas mais lábeis.

O conteúdo e a distribuição das formas de fósforo no solo de diferentes disponibilidades sob três sistemas de manejo (plantio direto, convencional e mínimo), na profundidade de 0 - 10 cm de um Latossolo Vermelho foram determinados por Selles et al. (1990). Esses autores observaram aumentos de 33%

do P lábil no sistema plantio direto em relação ao sistema convencional. Isso foi atribuído ao aumento do fósforo orgânico, sugerindo que no sistema de cultivo mínimo e, principalmente, no sistema plantio direto, poderia ter mais fósforo disponível para as plantas em função da mineralização lenta e contínua. A maior atividade microbiana resultou na liberação de ácidos orgânicos que competiram com o fósforo pelos sítios de sorção.

Estudando o efeito da adoção de diferentes métodos de preparo do solo e sucessões de culturas por um longo período nas distribuições das frações de fósforo em diferentes profundidades de um Latossolo e um Argissolo, Santos e Anghinoni (2003) observaram que no sistema plantio direto ocorreu maior acúmulo de fósforo inorgânico lábil (P inorgânico extraído pela Resina e  $\text{NaHCO}_3$ ) e também fósforo inorgânico não lábil ligado ao cálcio (P inorgânico extraído por HCl) na camada superficial, comparativamente ao cultivo convencional. Em relação às sucessões de culturas, estas tiveram pouca influência nas frações de fósforo orgânico, sendo que os teores de fósforo orgânico lábil, extraído com  $\text{NaHCO}_3$ , foram muito baixos e não foram afetados pelos preparos de solos e sucessões de culturas. Os teores de fósforo orgânico extraídos pelo  $\text{NaOH}$  0,1 mol L<sup>-1</sup> foram superiores aos extraídos pelo  $\text{NaHCO}_3$ , sendo que no sistema plantio direto ocorreu acúmulo de P nas camadas superficiais. O contrário ocorreu no sistema convencional, onde o acúmulo foi maior nas camadas mais profundas devido a incorporação dos resíduos vegetais e dos fertilizantes fosfatados no perfil do solo.

A obtenção das frações de fósforo no solo e sua associação com o fósforo acumulado pelas plantas podem indicar quais as frações que mais contribuem na disponibilidade de fósforo para as culturas, bem como auxiliam na escolha de um extrator apropriado a essas frações, resultando numa melhor eficiência dos métodos de análise. Saleque et al. (2004), estudando o efeito de fertilizantes orgânicos e inorgânicos nas formas de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado, observaram que a fração de fósforo extraída pelo  $\text{NaHCO}_3$  resultou em maiores coeficientes de determinação com o fósforo acumulado pelas plantas.

O fósforo extraído pela Resina e o fósforo inorgânico extraído pelo  $\text{NaOH}$  0,1 mol L<sup>-1</sup> foram as formas preferencialmente absorvidas pelas plantas de arroz, na ciclagem de nutrientes, em solos cultivados com arroz submetidos a vários cultivos (PHEAV et al., 2005) . Ranno (2004) realizou o fracionamento de fósforo pelo Método de Chang e Jackson (1957) em onze solos de várzea submetidos à cultura

de arroz irrigado, onde observou que a fração predominante foi a de fósforo ligado aos óxidos de ferro. Como este elemento é reduzido durante o alagamento, uma fração significativa dos óxidos e dos fosfatos de ferro é solubilizada, provavelmente, aumentando a disponibilidade de fósforo para a cultura do arroz irrigado. Além disso, o autor observou que o fósforo ocluso, considerado não lábil, foi parcialmente ou totalmente dissolvido pela redução do ferro. Acredita-se que esta fração determinada pelo fracionamento de Chang e Jackson (1957) corresponde a fração inorgânica de fósforo extraída pelo NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> obtida pelo fracionamento de Hedley et al. (1982).

O método do fracionamento pode ser utilizado também para avaliar a dinâmica do fósforo em sistema de plantio direto envolvendo a rotação de culturas com inclusão do arroz irrigado. Desta forma, informações detalhadas referentes ao destino do fósforo em condições sazonalmente reduzidas podem ser obtidas.

**3. ARTIGO 1-** Disponibilidade de fósforo para o arroz irrigado cultivado em um Planossolo Háplico no sistema plantio direto.

## DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO PARA O ARROZ IRRIGADO CULTIVADO EM UM PLANOSSOLO HÁPLICO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

### PHOSPHORUS AVAILABILITY FOR IRRIGATED RICE CULTIVATED IN ALBAQUALF SOIL UNDER NO TILLAGE

#### **RESUMO-**

A adubação de culturas de sequeiro em solos de várzea pode elevar os teores de fósforo no solo. O arroz irrigado cultivado na sequência pode aproveitar o efeito residual dos adubos fosfatados utilizados, principalmente porque o arroz é menos exigente em fósforo do que as culturas de sequeiro. O objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta do arroz irrigado à adubação fosfatada com superfosfato triplo (SFT) e fosfato natural de Arad (FNA), e o efeito residual do fósforo aplicado em culturas de sequeiro em sistema plantio direto para o arroz subsequente, assim como avaliar a eficiência do Mehlich-1 e resina de troca aniónica como extractores de P no solo. Para a realização do trabalho foram utilizados dois experimentos em um Planossolo Háplico eutrófico solódico na área experimental da Estação Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado. Os experimentos foram delineados em blocos ao acaso com quatro repetições e os tratamentos foram dispostos em um fatorial 2 x 2 (SFT e FNA, com e sem reaplicação anual de P com SFT) mais um tratamento adicional testemunha sem a aplicação da adubação fosfatada. Foram coletadas amostras de solo em duas profundidades (0 - 10 cm e 0 - 20 cm) e nessas amostras foi realizada a análise dos teores de P pelo método Mehlich-1 e resina de troca aniónica. Nas plantas fez-se determinação da massa de matéria seca, concentração de fósforo nas folhas bandeira e parte aérea (folhas, colmos e grãos) e a quantidade total acumulada de P nas plantas foi calculada a partir da concentração de fósforo na parte aérea em relação à massa de matéria seca. Foi realizada a colheita de grãos de arroz após a maturação fisiológica para a avaliação do rendimento. O rendimento de grãos de arroz não respondeu à adubação fosfatada, mesmo com teores iniciais de P no solo abaixo do nível crítico ( $< 6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ). A adubação fosfatada realizada nas culturas de sequeiro (milho e soja) apresentou um efeito residual para o arroz irrigado mesmo após quatro anos de cultivos destas, no sistema plantio direto. Os extractores Mehlich-1 e resina de troca aniónica foram igualmente eficientes na avaliação da disponibilidade de P para o arroz irrigado. Os teores de P extraídos do solo pelos dois métodos apresentaram correlações significativas com o P acumulado nas plantas. O fosfato natural de Arad apresenta desempenho semelhante ao superfosfato triplo no que se refere à nutrição por fósforo em arroz irrigado em rotação com culturas de sequeiro no sistema plantio direto.

**Palavras-chave:** Solos de várzea. Adubos fosfatados. Concentração de fósforo.

**ABSTRACT-**

The fertilization of dryland crops in lowland soils can increase the P concentration in soil. The subsequent cultures, as irrigated rice, can use the residual effect from the phosphorus fertilization. It happens mainly because the rice production needs less P in comparison with dryland crops. The objective of this work was to evaluate the irrigated rice using Phosphorus fertilization with triple superphosphate (TSP) and Arad rock phosphate (ARP). Additionally, it was evaluated the P residual effect applied in dryland crops under no tillage for the subsequent rice production, as well as, the efficiency of the Mehlich-1 and anion-exchange resin methods. This study was done in two field experiments in the Lowland Experimental Station from Embrapa Temperate Climate Center. The soil was classified as an Albaqualf. The experiments were conducted under a randomized block design with four repetitions. For this, 2 x 2 factorial (TSP and ARP, with and without annual replication of P) was designed. Additionally, it was conducted a treatment under natural condition (without the application of phosphate fertilization). The soil was collected in two depths (0 - 10 cm and 0 - 20 cm). In these samples it was carried out the analysis of P concentration using the Mehlich-1 and anion-exchange resin methods. From the plants it was determined the dry matter, P concentration in the flag leaves and shoot (leaves, stalk and grains). The total P accumulated was calculated from shoot P concentration in relation to the dry matter. For the future analysis, the rice harvest was done when the plant were in physiological maturity stage. The phosphorus fertilization did not affect the production of rice grains, even though with initial P soil level below of the critical level ( $< 6.0 \text{ mg dm}^{-3}$ ). The phosphorus fertilization applied to the dryland crops (maize and soybean) presented a residual effect to subsequent irrigated rice even after four years experiment under no-tillage management. No differences were shown between the results of P availability using the Mehlich-1 and anion-exchange resin methods for the irrigated rice. There was a significant correlation with P accumulated in plants and P soil concentration using the two methods studied. The ARP presents similar performance as TSP regarding to P nutrition in irrigated rice, in rotation with dryland crops, under no tillage.

Key words: Lowland soils. Phosphorus fertilizing. Phosphorus concentration.

## INTRODUÇÃO

Os adubos fosfatados solúveis são rapidamente dissolvidos no solo disponibilizando altas concentrações de fósforo, que faz com que as plantas respondam com rápido crescimento e absorção de fósforo. No entanto, essas fontes de fósforo perdem a eficiência ao longo do tempo, pois o fósforo depois de dissolvido é adsorvido no solo pode ser convertido a formas não-lábeis. Os fosfatos naturais reativos solubilizam mais lentamente que os fosfatos solúveis, e normalmente são mais eficientes para utilização em médio prazo.

Combinações de fosfatos solúveis e fosfatos naturais podem configurar uma estratégia de manejo interessante para a adubação fosfatada do arroz irrigado, cultivado isoladamente, ou, principalmente em rotação de culturas (FERREIRA et al., 2007). Alguns trabalhos realizados por Gomes et al. (2005) mostraram resultados positivos na produtividade de grãos de arroz após quatro anos de adubação fosfatada com FN, demonstrando efeito residual de fósforo para a cultura.

A introdução do arroz irrigado na rotação de culturas no sistema plantio direto pode promover alterações na disponibilidade de fósforo no solo. Durante o alagamento do solo, os óxidos de ferro passam a ser considerados como fonte de fósforo para as plantas de arroz, já que bactérias anaeróbias utilizam os óxidos férricos como receptores de elétrons no processo de respiração, reduzindo-os a óxidos ferrosos, de maior solubilidade, promovendo a dessorção do fósforo (PONNAMPERUMA, 1972). Neste ambiente, o fósforo poderá ser acessado pelas plantas.

Muitos métodos de extração de P têm apresentado bons resultados quanto à recomendação de adubação fosfatada para culturas de sequeiro (Chang, 1978). No entanto, em solos alagados, os teores de P aumentam significativamente devido à redução do solo, sendo este aumento variável de solo para solo. Como os métodos analisam as amostras com o solo seco, não refletem o possível aumento de P disponível após o alagamento, não apresentando, portanto boa capacidade preditiva da disponibilidade de P para o arroz sob alagamento.

O extrator Mehlich-1 ( $H_2SO_4$  0,025N + HCl 0,05N) é o método mais utilizado no Brasil. O mecanismo de extração está baseado na manutenção de uma atividade do íon  $H^+$  na solução suficiente para a dissolução parcial de fosfatos de cálcio e de óxidos de Fe e Al (LINDSAY, 1979). Embora na capacidade preditiva da

disponibilidade de fósforo para o arroz em solos do Rio Grande do Sul seja apenas razoável, nenhum outro método tem apresentado desempenho superior que justifique sua substituição (SILVA et al., 2008).

O método de extração de P através de resinas trocadoras de íons foi proposto inicialmente por Amer et al. (1955). No Brasil, somente o Estado de São Paulo utiliza este método em seus laboratórios de rotina. De acordo com Raij et al. (1986), as resinas de troca iônica são produtos sintéticos que apresentam uma rede tridimensional de cadeias de hidrocarbonetos, contendo grupos funcionais com cargas elétricas ( $-NR_3 + OH^-$ ) que faz com que se comporte como base forte, desse modo dissociando em qualquer valor de pH (SILVA e RAIJ, 1999). No processo de extração do P há uma transferência do elemento para a resina, na qual o fosfato é adsorvido.

Uma das vantagens deste método em relação ao Mehlich-1 é que a extração é contínua e feita através da água de forma similar ao que ocorre na absorção de P pelas raízes das plantas e não utiliza nenhum reagente químico energético, que poderia dissolver fosfatos não lábeis. De acordo com a Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC (2004), esse método é indicado para o diagnóstico da disponibilidade de fósforo em solos que foram adubados com fosfatos naturais nos últimos dois anos e a interpretação é realizada independente dos teores de argila ou do alagamento do solo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta do arroz irrigado à adubação fosfatada com superfosfato triplo (SFT) e fosfato natural de Arad (FNA), e o efeito residual do fósforo aplicado em culturas de sequeiro em sistema plantio direto para o arroz subsequente, assim como avaliar a eficiência do Mehlich-1 e resina de troca aniônica como extractores de P no solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização do trabalho foram utilizados dois experimentos, conduzidos desde 2003 em um Planossolo Háplico eutrófico solódico (STRECK et al., 2008) na área experimental da Estação Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado. Os experimentos foram delineados em blocos ao acaso com quatro repetições e os tratamentos foram dispostos em um fatorial 2 x 2 (superfosfato triplo - SFT e fosfato natural de Arad - FNA, com e sem reaplicação anual de P na forma de SFT) mais um tratamento adicional testemunha sem a aplicação da adubação fosfatada. Um dos experimentos foi conduzido com as culturas da soja no verão e azevém no inverno, e o outro com as culturas do milho no verão e azevém + trevo branco no inverno. A área de cada parcela correspondeu a 20 m<sup>2</sup>.

As espécies de sequeiro foram cultivadas na mesma área por quatro anos, sendo que a implantação dos experimentos foi realizada pelo sistema convencional de cultivo e nos demais anos sistema plantio direto. As culturas de inverno foram dessecadas com herbicida de ação total e os restos vegetais permaneceram na superfície do solo. No verão do quinto ano todas as parcelas foram semeadas com arroz irrigado (cultivar Atalanta) em sistema plantio direto sobre a resteva das culturas de sequeiro.

As doses de fósforo foram estabelecidas em função da análise inicial do solo realizada antes da instalação dos experimentos (Tabela 1). A adubação foi realizada a lanço e incorporada na instalação dos experimentos. Nas parcelas em que o solo foi coletado não foi realizada calagem.

**Tabela 1.** Resultados da análise do solo da área experimental, na camada de 0 - 20 cm de profundidade, antes da implantação do experimento.

pH <sub>água</sub>	MO	K	Na	P	AI	Ca	Mg	Argila
Índice	%	-----	mg dm <sup>-3</sup>	-----	-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----	%
5,5	2,2	39,9	48	1,5	0,6	2,2	1,3	20

Fonte: Laboratório de análise de solos da Embrapa Clima Temperado.

Foram aplicados quatro tratamentos de adubação fosfatada: SFT - Dose recomendada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de SFT (110 kg ha<sup>-1</sup> para o milho e 120 kg ha<sup>-1</sup> para a soja) sem e com reaplicação anual da dose inicialmente recomendada; FNA - Dose

recomendada de  $P_2O_5$  na forma de FNA sem e com reaplicação anual da dose inicialmente recomendada com SFT; e um tratamento adicional: Testemunha - sem aplicação de  $P_2O_5$ .

As tabelas 2 e 3 apresentam a estrutura dos tratamentos aplicados para melhor compreensão dos experimentos. Também foram realizadas adubações potássica e nitrogenada para o milho ( $100\text{ kg ha}^{-1}$  de KCl e  $130\text{ kg ha}^{-1}$  de N na forma de uréia, respectivamente) e adubação potássica para a soja ( $90\text{ kg ha}^{-1}$  de KCl).

**Tabela 2.** Distribuição temporal e quantitativa dos tratamentos, considerando fontes e doses de fósforo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) envolvendo o sistema de cultura milho/arroz irrigado.

Tratamento	2003/04		2004/05		2005/06		2006/07		2007/08		Total/Dose	
	Fonte	Dose <sup>3</sup>	Fonte	Dose	Fonte	Dose	Fonte	Dose	Fonte	Dose	FNr	SFT
Testemunha	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	0	0
SFT S/Reap	SFT <sup>1</sup>	110	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	0	110
FNA S/Reap	FNr <sup>2</sup>	110	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	110	0
SFT C/Reap	SFT	110	SFT	110	SFT	110	SFT	110	SFT	110	0	550
FNA C/Reap	FNr	110	SFT	110	SFT	110	SFT	110	SFT	110	110	440

<sup>1</sup>SFT = Superfosfato triplo; <sup>2</sup>FNr = Fosfato natural reativo de Arad; <sup>3</sup>Dose recomendada de adubação fosfatada para o milho.

**Tabela 3.** Distribuição temporal e quantitativa dos tratamentos, considerando fontes e doses de fósforo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) envolvendo o sistema de cultura soja/arroz irrigado.

Tratamento	2003/04		2004/05		2005/06		2006/07		2007/08		Total/Dose	
	Fonte	Dose <sup>3</sup>	Fonte	Dose	Fonte	Dose	Fonte	Dose	Fonte	Dose	FNr	SFT
Testemunha	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	0	0
SFT S/Reap	SFT <sup>1</sup>	120	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	0	120
FNA S/Reap	FNr <sup>2</sup>	120	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	120	0
SFT C/Reap	SFT	120	SFT	120	SFT	120	SFT	120	SFT	120	0	600
FNA C/Reap	FNr	120	SFT	120	SFT	120	SFT	120	SFT	120	120	480

<sup>1</sup>SFT = Superfosfato triplo; <sup>2</sup>FNr = Fosfato natural reativo de Arad; <sup>3</sup>Dose recomendada de adubação fosfatada para a soja.

Antes do cultivo de arroz, no quinto ano do experimento, foram coletadas amostras de solo em duas profundidades 0 - 10 cm e 0 - 20 cm. As amostras de solo foram secas, peneiradas (peneira 2 mm). Foram realizadas as seguintes análises: No solo: Teor de P pelo método Mehlich-1 e resina de troca aniônica na forma de lâminas de 5,0 x 2,0 cm de tamanho. Nas plantas: Concentração de fósforo ( $\text{g kg}^{-1}$ ) segundo método descrito em Tedesco et al. (1995) em cinquenta folhas bandeira

coletadas por parcela no florescimento pleno das plantas de arroz. No final do ciclo da cultura uma amostra de 0,50 m linear de plantas de arroz foi coletada em cada parcela, onde foi realizada a avaliação da massa de matéria seca na parte aérea (colmo, folhas e grãos), após secagem em estufa à temperatura de 65°C por 72 horas ( $\text{kg m}^{-2}$ ), concentração de fósforo na parte aérea (colmo, folhas e grãos) (TEDESCO et al., 1995) e quantidade total acumulada de P ( $\text{g m}^{-2}$ ), calculada a partir da concentração de fósforo em relação à massa de matéria seca. A colheita de grãos de arroz nas parcelas para avaliação do rendimento foi efetuada após a maturação fisiológica em uma área de 8,40  $\text{m}^2$  por parcela.

A metodologia da análise estatística dos resultados utilizada foi a seguinte: decomposição da variação entre tratamentos (ANOVA) considerou a estrutura factorial  $2^2$ , acrescida do tratamento adicional, bem como o delineamento das unidades considerado (blocos ao acaso com quatro repetições). A identificação dos fatores foi a seguinte: Fator A - Fonte de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (A1: SFT e A2: FNA) e fator B - Reaplicação da adubação fosfatada (B1: sem reaplicação e B2: com reaplicação do  $\text{P}_2\text{O}_5$ ). O tratamento adicional correspondeu a uma testemunha sem aplicação de fósforo.

Nas condições gerais impostas, o modelo pode ser expresso pela seguinte equação:

$$Y_{ij}: m + t_i + b_j + EE_{ij}$$

Onde:

$Y_{ij}$ : resposta observada na parcela que recebeu o i-ésimo tratamento no j-ésimo bloco;

m: valor médio do experimento;

$t_i$ : efeito do i-ésimo tratamento;

$b_j$ : efeito do j-ésimo bloco;

$EE_{ij}$ : Erro experimental observado na parcela que recebeu o i-ésimo tratamento no j-ésimo bloco;

Para a decomposição dos efeitos entre tratamentos que compõe a estrutura factorial foram utilizados os procedimentos descritos por Zimmermann (2004): uso de contrastes ortogonais para isolar os efeitos do fatorial e decomposição do fatorial nos efeitos principais e suas interações. No Anexo 1 é apresentada a tabela com as fontes de variação consideradas no experimento e os respectivos graus de liberdade. Segundo Zimmermann (2004), quando os fatores experimentais apresentarem apenas dois níveis, não há a necessidade de efetuar teste

complementar ao teste F para comparação de médias. Para as análises de correlação, utilizou-se o programa estatístico Winstat (MACHADO, 2001).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A adubação fosfatada aumentou os teores de P no solo, extraídos pelos dois extractores, diferindo da testemunha sem aplicação de adubo (Tabela 4). Os teores de P extraídos pelo Mehlich-1 apresentaram-se inferiores ao nível crítico de 6,0 mg dm<sup>-3</sup> na área de resteva de milho para solos alagados (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC, 2004). Na área de resteva da soja os teores somente foram superiores a 6,0 mg kg<sup>-1</sup> nas profundidades 0 - 10 cm e 0 - 20 cm quando houve reaplicação da adubação fosfatada.

Não houve diferenças entre as fontes de P independente da profundidade e das áreas analisadas, porém a reaplicação anual da dose inicialmente recomendada proporcionou acréscimos nos teores de P no solo (Tabela 4). Os teores de P extraídos pela RTA foram superiores ao nível crítico sugerido pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC (2004), que é de 20 mg dm<sup>-3</sup>, apenas nos tratamentos com reaplicação anual da adubação nas duas áreas analisadas (Tabela 4). Diferentemente do que ocorreu com o extrator Mehlich-1, houve diferenças nos teores de P extraídos pela RTA entre as duas fontes, onde o FNA proporcionou maiores teores de P na área de resteva de milho sem reaplicação a 0 - 10 cm de profundidade, e na área de resteva da soja na profundidade de 0 - 10 cm com e sem reaplicação e na profundidade de 0 - 20 cm com reaplicação da adubação.

Os teores de fósforo extraídos pela RTA foram maiores do que os extraídos pelo Mehlich-1. Trabalhos mostram que a resina trocadora de íons extrai mais fósforo do que a solução de Mehlich-1 (SIMS, 1989; GATIBONI, 2003). As maiores quantidades de fósforo extraído se deve à utilização de NaHCO<sub>3</sub> pelo método da resina para efetuar a troca iônica com o fósforo. Além disso, o tempo de agitação da solução com o solo é maior (16 h) do que para o Mehlich-1 (5 min) (BORTOLON, 2005).

**Tabela 4.** Teores de P no solo extraídos pelos extractores Mehlich-1 e resina de troca aniônica (RTA) nas áreas de resteva de milho e soja em sistema plantio direto, em duas profundidades de um Planossolo, sem e com reaplicação do adubo fosfatado (S/Reap. e C/Reap.).

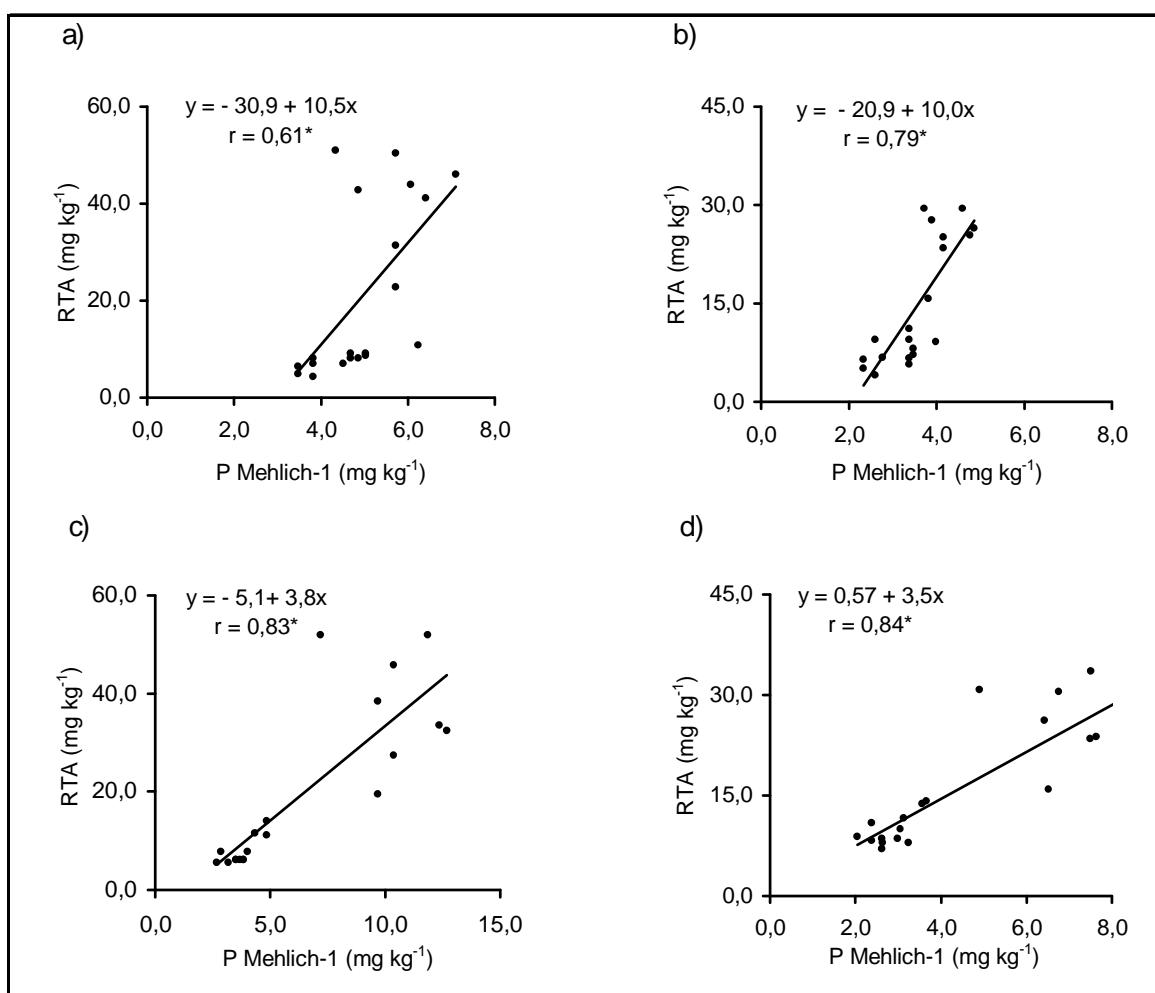
Fonte	Resteva Milho				Resteva Soja			
	0-10		0-20		0-10		0-20	
	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.
Mehlich-1 ( $\text{mg kg}^{-1}$ )								
Testemunha	3,9*		2,7*		3,3*		2,8*	
SFT	4,2Ab	5,4Aa	3,1Ab	4,2Aa	4,0Ab	11,3Aa	3,6Ab	10,2Aa
FNA	5,2Aa	5,8Aa	3,6Ab	4,3Aa	4,0Ab	9,8Aa	4,7Ab	7,9Aa
CV %	15,1		9,8		20,0		18,0	
RTA ( $\text{mg kg}^{-1}$ )								
Testemunha	6,1*		5,4*		5,9*		8,6*	
SFT	7,7Bb	34,5Aa	8,5Ab	23,1Aa	7,8Bb	28,2Ba	10,0Ab	21,5Ba
FNA	9,2Ab	47,8Aa	8,5Ab	27,6Aa	9,9Ab	47,0Aa	10,8Ab	30,3Aa
CV %	20,7		18,9		24,8		18,3	

\*Testemunha difere dos demais tratamentos. Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna e minúsculas na linha dentro de cada profundidade diferem estatisticamente pelo teste  $F < 5\%$  de probabilidade. Testemunha - sem aplicação de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; SFT - Dose recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de SFT sem e com reaplicação anual; FNA - Dose recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de FN de Arad sem e com reaplicação anual com SFT.

Na figura 1 são apresentadas as correlações entre os métodos de extração de fósforo no solo Mehlich-1 e resina de troca aniônica. Houve correlação entre os teores de fósforo extraídos no solo pelos dois métodos de extração analisados independentes das fontes, profundidades e áreas (Figura 1). Os maiores coeficientes de correlação entre os dois métodos testados foram observados na profundidade de 0 - 20 cm ( $r = 0,79$ , Figura 1b e  $r = 0,84$ , Figura 1d), provavelmente devido ao efeito de diluição do FNA nessa profundidade. No sistema plantio direto, de maneira geral, em solos com baixa disponibilidade de fósforo, os adubos fosfatados solúveis e preferencialmente os fosfatos naturais reativos são aplicados e incorporados antes do início do primeiro cultivo, ocorrendo homogeneização do fosfato na camada arável de 0 - 20 cm (ANGHINONI, 2006). Nesse experimento, foi realizada a incorporação da adubação fosfatada no início da implantação do sistema plantio direto o que pode justificar os resultados encontrados.

Diversos autores (SILVA et al., 1999; BORTOLON, 2005; CARDOSO, 2007; GONÇALVES e MEURER, 2008) têm observado boa correlação entre esses dois métodos, sendo que os coeficientes de correlação variam de solo para solo, pois o tipo de solo influencia na eficiência de extração de fósforo pelos métodos, além da influência da fonte de adubação fosfatada. De acordo com a Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC (2004), a análise de P no solo através da resina de

troca aniônica é indicada para o diagnóstico da disponibilidade de fósforo em solos que foram adubados com fosfatos naturais nos últimos dois anos, pois como o Mehlich-1 é um método de extração através de ácidos, poderia dissolver fosfatos não lábeis.



**Figura 1.** Correlação entre o teor de fósforo no solo extraído pelo método Mehlich-1 e resina de troca aniônica (RTA) na área de resteva de milho em sistema plantio direto nas profundidades 0 - 10 cm (a) e 0 - 20cm (b) e na área de resteva de soja nas profundidades 0 - 10 cm (c) e 0 - 20cm (d). \*Significativo a < 1% de probabilidade.

Apesar disso, devido à facilidade e rapidez no processo de análise, o Mehlich-1 é o método mais utilizado no Brasil, e baseia-se na manutenção de uma atividade do íon  $H^+$  na solução suficiente para a dissolução parcial de fosfatos de cálcio e de óxidos de Fe e Al (LINDSAY, 1979). Já o método de extração de P através de resinas trocadoras de íons baseia-se na dessorção ou dissolução do P da

fase sólida para o restabelecimento de seu equilíbrio com o P dissolvido na suspensão do solo (SILVA e RAIJ, 1996). A interpretação dos teores de P extraídos pela resina é realizada independente dos teores de argila ou do alagamento do solo (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC, 2004).

Segundo Skogley e Dobermann (1996) no método da RTA há a extração do fósforo ligado à superfície dos colóides, até que o equilíbrio eletroquímico entre o solo-solução-resina seja obtido. Com a solução Mehlich-1 pode haver dissolução de compostos estáveis de fósforo no solo que não contribuem para o fósforo em solução, principalmente fosfatos de cálcio (RAIJ et al., 1986). Apesar disso, o presente estudo não apresentou maiores teores de P extraídos pelo Mehlich-1 em relação à RTA (Tabela 4).

Trabalho realizado por Cardoso (2007) discorda de Silva e Raij (1996), que afirmam que uma das vantagens do método que utiliza RTA é que não superestima a disponibilidade de P como os extratores ácidos em solos adubados com fosfatos naturais, pois este autor observou menores coeficientes de correlação entre o P acumulado nas plantas de arroz e o P extraído pela resina num solo adubado com fosfato natural ( $r = 0,47$ ) em relação ao superfosfato triplo ( $r = 0,67$ ). Baixas correlações entre o método utilizando RTA e absorção de P pelas plantas em solos adubados com fosfato natural também foram observados por Kroth (1998). Esse mesmo autor mostra que a RTA superestima o P disponível em solos adubados com fosfatos naturais.

A adubação fosfatada, independentemente da reaplicação e fontes de P aumentou os teores de P das plantas de arroz. Os maiores teores de P nas folhas bandeira e na parte aérea das plantas de arroz (Tabela 5) foram observados quando houve a reaplicação anual da adubação fosfatada. Apenas se observa diferenças entre as fontes na área de resteva da soja nos teores da parte aérea das plantas, sendo que onde houve adubação com o FNA os teores foram inferiores aos obtidos pela adubação realizada sempre com SFT.

Os teores de P nas folhas bandeira do arroz se mantiveram abaixo do nível de suficiência para o arroz irrigado segundo a Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC (2004) que é de 2,4 a 4,8 g kg<sup>-1</sup>. No entanto, segundo Dobermann e Fairhurst (2000), o nível crítico de suficiência de fósforo na folha bandeira de cultivares modernas de arroz é de 1,8 mg kg<sup>-1</sup>, e por este critério os tratamentos com reaplicação anual de adubo fosfatado estariam nutrindo as plantas de arroz,

enquanto que nos demais tratamentos (testemunha e adubação apenas no primeiro ano) as plantas estariam deficientes em fósforo. Considerando-se que a quantidade de adubo adicionada nos tratamentos com reaplicação tenha sido suficiente para nutrir o arroz, os níveis sugeridos por Dobermann e Fairhurst (2000) parecem mais adequados que os sugeridos pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC (2004).

**Tabela 5.** Teores de P nas folhas bandeira e na parte aérea das plantas de arroz (colmo, folhas e grãos) nas áreas de resteva de milho e soja em sistema plantio direto, sem e com reaplicação do adubo fosfatado (S/Reap. e C/Reap.).

Fonte	S/Reap.	C/Reap.			S/Reap.	C/Reap.
	Resteva Milho				Resteva Soja	
----- Teor de P folhas bandeira ( $\text{g kg}^{-1}$ ) -----						
Testemunha	1,15*				1,30*	
SFT		1,50Ab	2,02Aa		1,51Ab	2,05Aa
FNA		1,50Ab	2,02Aa		1,51Ab	1,93Aa
CV %	10,1			14,8		
----- Teor de P parte aérea ( $\text{g kg}^{-1}$ ) -----						
Testemunha	1,28*				1,75*	
SFT		1,63Ab	3,52Aa		2,32Ab	3,47Aa
FNA		1,81Ab	3,39Aa		1,95Bb	2,96Ba
CV %	25,8			16,3		

\*Testemunha difere dos demais tratamentos. Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna e minúsculas na linha dentro de cada área diferem estatisticamente pelo teste  $F < 5\%$  de probabilidade. Testemunha - sem aplicação de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; SFT - Dose recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de SFT sem e com reaplicação anual; FNA - Dose recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de FN de Arad sem e com reaplicação anual com SFT.

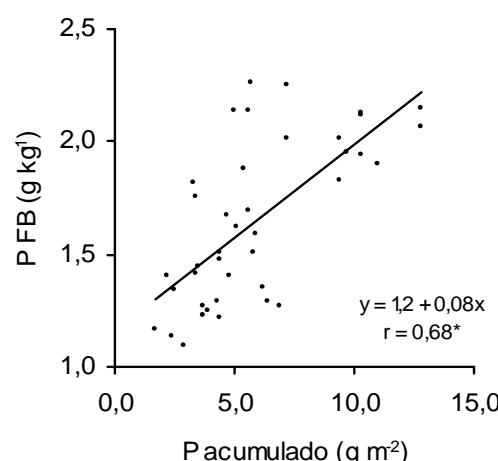
A adubação fosfatada também aumentou o P acumulado das plantas de arroz (Tabela 6) e a reaplicação anual da adubação proporcionou maiores acúmulos, porém isto não se refletiu na massa de matéria seca das plantas. Foram observadas diferenças entre as fontes apenas na área de resteva da soja, onde o SFT aplicado desde o início do experimento foi superior ao FNA com reaplicação anual de SFT.

**Tabela 6.** Fósforo acumulado e massa seca na parte aérea das plantas de arroz (colmo, folhas e grãos) nas áreas de resteva de milho e soja em sistema plantio direto, sem e com reaplicação do adubo fosfatado (S/Reap. e C/Reap.).

Fonte	S/Reap. C/Reap.		S/Reap. C/Reap.	
	Resteva Milho	Resteva Soja	Resteva Milho	Resteva Soja
----- P acumulado ( $\text{g m}^{-2}$ ) -----				
Testemunha	2,66*			4,04*
SFT	4,03Ab	9,94Aa		6,06Ab
FNA	4,05Ab	9,54Aa		3,91Bb
CV %	35,5		25,3	
----- Massa de matéria seca ( $\text{kg m}^{-2}$ ) -----				
Testemunha	2,12 <sup>ns</sup>			2,39 <sup>ns</sup>
SFT	2,47Aa	2,95Aa		2,74Aa
FNA	2,39Aa	2,88Aa		2,04Ba
CV %	21,2		21,0	

\*Testemunha difere dos demais tratamentos. <sup>ns</sup>Testemunha não difere dos demais tratamentos. Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna e minúsculas na linha dentro de área diferem estatisticamente pelo teste  $F < 5\%$  de probabilidade. Testemunha - sem aplicação de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; SFT - Dose recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de SFT sem e com reaplicação anual; FNA - Dose recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de FN de Arad sem e com reaplicação anual com SFT.

A Figura 2 apresenta a correlação entre o teor de fósforo nas folhas bandeira do arroz e o fósforo acumulado nas plantas. Apesar da existência de correlação entre estas variáveis ( $r = 0,68$ ), houve grande dispersão dos pontos. Por exemplo, para um valor de P acumulado em torno de  $5,0 \text{ g m}^{-2}$ , os teores de fósforo nas folhas bandeira variam de  $1,25$  a  $2,25 \text{ g kg}^{-1}$ .

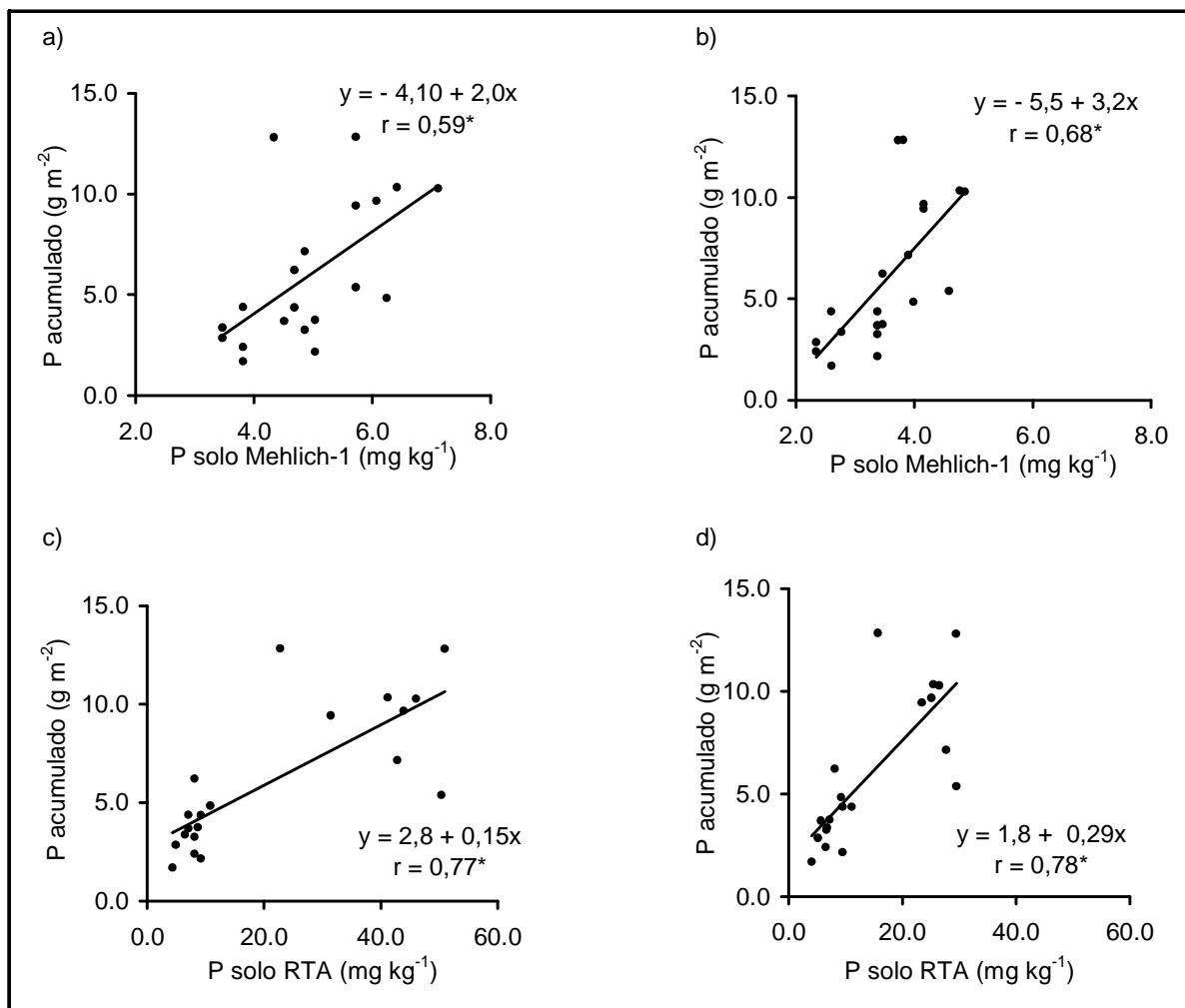


**Figura 2.** Correlação entre o teor de fósforo na folha bandeira do arroz e fósforo acumulado na parte aérea das plantas (colmo, parte aérea e grãos) independente da área. \*Significativo a < 1% de probabilidade.

Nas figuras 3 e 4 são apresentadas as correlações entre o fósforo extraído por Mehlich-1 e RTA nas duas profundidades e o P acumulado na parte aérea do arroz cultivado sob resteva de milho (Figura 3) e de soja (Figura 4). Houve correlação significativa entre essas variáveis, com coeficientes de correlação variando de 0,51 a 0,78.

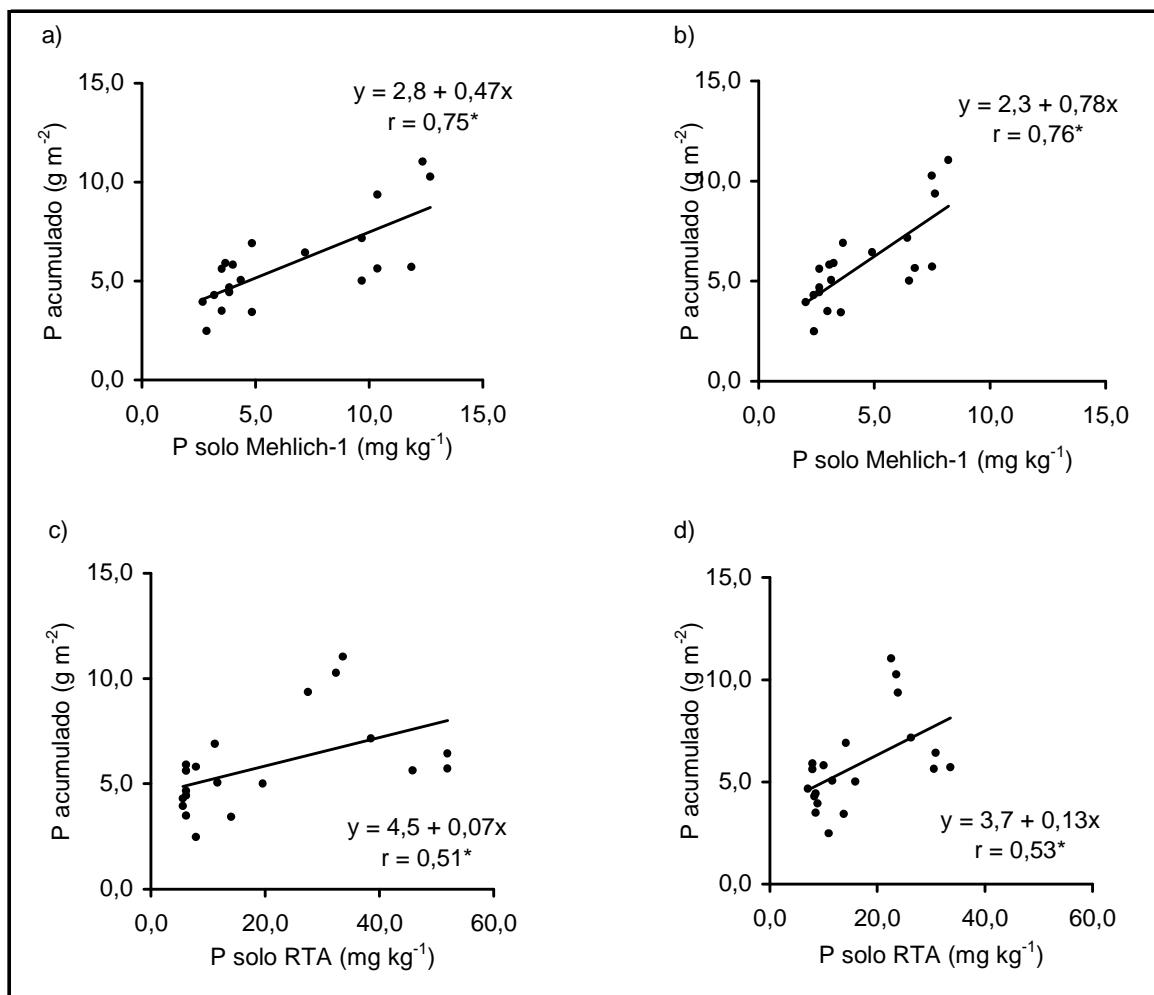
Na área de resteva de milho (Figura 3), o fósforo acumulado na parte aérea do arroz melhor se correlacionou com os teores de P extraídos com a RTA ( $r = 0,77$  e  $r = 0,78$ ) do que com o Mehlich-1 ( $r = 0,59$  e  $r = 0,68$ ). Porém na área de resteva da soja (Figura 4), o comportamento dos dados foi o contrário ao da área do milho, onde o P acumulado no arroz se correlacionou melhor com os teores de P extraídos pelo extrator Mehlich-1 ( $r = 0,75$  e  $r = 0,76$ ) do que com a RTA ( $r = 0,51$  e  $r = 0,53$ ). A melhor correlação do P acumulado com o teor de P extraído com a RTA na área do milho pode ter sido causada pela concentração de pontos em duas regiões do gráfico, relacionadas às baixas e altas concentrações do fósforo extraídas pela resina. A ocorrência dessas duas regiões de pontos está relacionada aos tratamentos sem e com reaplicação anual do fósforo. Diferente do que ocorre com o P extraído com Mehlich-1 onde há uma melhor distribuição dos pontos ao longo da reta.

Nos trabalhos realizados com arroz irrigado, o desempenho dos extratores Mehlich-1 e RTA têm sido semelhantes na previsão da disponibilidade de fósforo para o arroz. Silva et al. (2008) estudando o comportamento do P em diversos solos de várzea do RS observou coeficientes de correlação de 0,45 para o extrator Mehlich-1 e 0,70 para a RTA em relação ao fósforo acumulado pelas plantas. Cardoso (2007) trabalhando com três solos de várzea (dois Planossolos Háplicos e um Gleissolo Háplico), onde foram aplicadas diferentes doses de SFT e Fosfato Natural Daoui, observou coeficientes de correlação de 0,58 para o Mehlich-1 e de 0,61 para a RTA. Gonçalves e Meurer (2008) trabalhando com cinco solos cultivados com arroz irrigado observaram coeficientes de determinação ( $R^2 = 0,88$ ) para a resina e ( $R^2 = 0,83$ ) para o Mehlich-1.



**Figura 3.** Correlação entre o fósforo acumulado na parte aérea das plantas (colmo, folhas e grãos) e teor de fósforo no solo extraído pelo método Mehlich-1 de 0 - 10 (a) e 0 - 20 cm (b) e teor de fósforo no solo extraído pela resina de troca aniônica (RTA) de 0 - 10 (c) e 0 - 20 cm (d) na área de resteva de milho. \*Significativo < 1% de probabilidade.

Mesmo que na capacidade preditiva da disponibilidade de fósforo para o arroz em solos do Rio Grande do Sul o Mehlich-1 seja apenas razoável, nenhum outro método tem apresentado desempenho tão superior que justifique sua substituição (SILVA et al., 2008).



**Figura 4.** Correlação entre o fósforo acumulado na parte aérea das plantas (colmo, folhas e grãos) e teor de fósforo no solo extraído pelo método Mehlich-1 de 0 - 10 (a) e 0 - 20 cm (b) e teor de fósforo no solo extraído pela resina de troca aniônica (RTA) de 0 - 10 (c) e 0 - 20 cm (d) na área de resteva de soja. Significativo < 1% de probabilidade.

O rendimento de grãos (Tabela 7) não foi afetado por nenhum dos tratamentos utilizados, indicando que a quantidade de P disponibilizada pelo solo foi suficiente para o arroz atingir os rendimentos obtidos. O P, que geralmente é muito mais limitante para as plantas cultivadas em solos bem drenados, não é tão limitante para o arroz em solos alagados, o que se deve ao aumento da disponibilidade do elemento promovido pela redução do solo (VAHL e SOUSA, 2004). Os aumentos de rendimento de grãos de arroz obtidos em experimentos com adubação fosfatada em Planossolos raramente ultrapassam 20% (VAHL, 2004).

As culturas de sequeiro cultivadas anteriormente ao arroz responderam à adubação fosfatada, não diferindo entre as fontes, sendo que no milho a produtividade de grãos em relação à testemunha (sem adubação) foi em média o dobro e na soja 50% superior, quando o solo foi adubado (dados não publicados), confirmando que as culturas de sequeiro respondem mais à adubação fosfatada do que o arroz irrigado.

**Tabela 7.** Rendimento de grãos de arroz nas áreas de resteva de milho e soja no sistema plantio direto em sistema plantio direto, sem e com reaplicação do adubo fosfatado (S/Reap. e C/Reap.).

Fonte	S/Reap.		C/Reap.		S/Reap.	C/Reap.
	Resteva Milho	Resteva Soja				
----- Rendimento ( $t\ ha^{-1}$ ) -----						
Testemunha	6,98 <sup>ns</sup>				8,06 <sup>ns</sup>	
SFT		7,28 <sup>ns</sup>	7,77 <sup>ns</sup>		8,80 <sup>ns</sup>	7,49 <sup>ns</sup>
FNA		7,14 <sup>ns</sup>	7,92 <sup>ns</sup>		8,07 <sup>ns</sup>	8,24 <sup>ns</sup>
CV %	10,3				10,7	

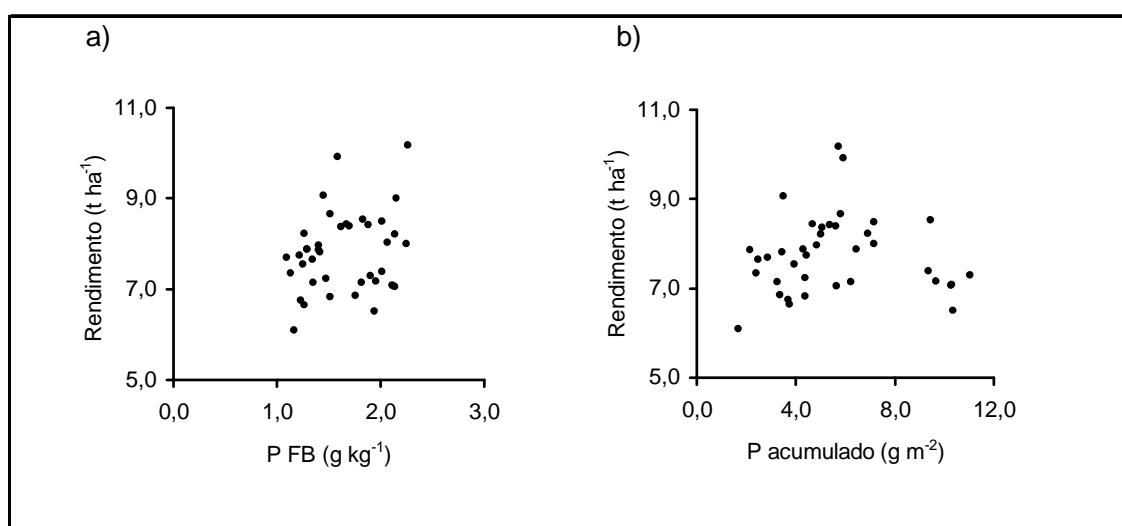
<sup>ns</sup>Não há diferenças entre tratamentos. Testemunha - sem aplicação de  $P_2O_5$ ; SFT - Dose recomendada de  $P_2O_5$  na forma de SFT sem e com reaplicação anual; FNA - Dose recomendada de  $P_2O_5$  na forma de FN de Arad sem e com reaplicação anual com SFT.

A ausência de resposta do arroz à adubação prejudica a comparação das fontes utilizadas. No entanto, como de modo geral os teores de P no solo e nas plantas de arroz foram equivalentes entre as fontes, é possível inferir que a utilização de fosfato natural em culturas de sequeiro visando à nutrição do arroz cultivado posteriormente pode ser uma alternativa viável. Gomes et al. (2005) e Ferreira et al. (2007) apresentam resultados que comprovam a eficiência da utilização dos fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo de arroz irrigado que incluem culturas de sequeiro.

Os teores de P nas folhas bandeira e o fósforo acumulado na parte aérea do arroz não se correlacionaram com o rendimento de grãos (Figura 5). Assim, uma melhor nutrição das plantas pelo fósforo não se refletiu em aumento de rendimento de grãos, o que é mais um indicativo de que as plantas de arroz estão bem nutridas pelo elemento, mesmo nas parcelas que não receberam fósforo. Desta forma os níveis críticos de deficiência apontados tanto pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2004) quanto por Dobermann e Fairhurst (2000) já discutidos

anteriormente, provavelmente não são indicados para expressar o nível adequado de nutrição por fósforo apresentado nos experimentos.

Tais índices também foram questionados por Pocojeski (2007), que não observou queda no rendimento de grãos do arroz em plantas com teores de fósforo abaixo dos níveis estabelecidos como deficientes por aqueles autores. É possível que estas discrepâncias estejam relacionadas ao fato de que os níveis estabelecidos por estes autores não tenham sido testados em condições de solo e clima do Rio Grande do Sul e/ou com cultivares de arroz utilizado neste Estado.



**Figura 5.** Correlação do fósforo nas folhas bandeira (a) e fósforo acumulado na parte aérea das plantas (colmo, folhas e grãos) (b) e o rendimento de grãos de arroz independente da área, em função da adubação fosfatada.

## CONCLUSÕES

O rendimento de grãos de arroz não respondeu à adubação fosfatada, mesmo com teores iniciais de P no solo abaixo do nível crítico ( $< 6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ).

A adubação fosfatada realizada nas culturas de sequeiro (milho e soja) apresentou um efeito residual para o arroz irrigado mesmo após quatro anos de cultivos destas, no sistema plantio direto.

Os extractores Mehlih-1 e resina de troca aniônica foram igualmente eficientes na avaliação da disponibilidade de P para o arroz irrigado. Os teores de P extraídos do solo pelos dois métodos apresentaram correlações significativas com o P acumulado nas plantas.

O fosfato natural de Arad apresenta desempenho semelhante ao superfosfato triplo no que se refere à nutrição por fósforo em arroz irrigado em rotação com culturas de sequeiro no sistema plantio direto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMER, F.; BOUDIN, D. R.; BLACK, C. A. et al. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P<sup>32</sup> equilibration. **Plant and Soil.** The Hague, v.6, p.391-408, 1955.
- ANGHINONI, I. Adubação fosfatada e potássica em plantio direto. In: FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto.** Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2006. p.87-104.
- BORTOLON, L. **Métodos de avaliação da disponibilidade de nutrientes para as plantas em solos do Rio Grande do Sul.** 2005. 129f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CARDOSO, E.F. **Adubação fosfatada para o arroz irrigado em solos com diferentes capacidades de adsorção de fósforo.** 2007. 82f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- CHANG, S.C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science,** Baltimore, v.84, p.133-144, 1957.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC - SBCS/NRS. **Manual de adubação e calagem para os Estados do RS e de SC /** Sociedade Brasileira de Ciência do solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. -10. ed. – Porto Alegre, 2004. 224p.
- DOBERMANN, A.; FAIRHURST, T. **Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management.** International Rice Research Institute (IRRI), Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC), 2000. CD-ROM.
- FERREIRA, L.H.G.; GOMES, A. da S.; SCIVITTARO, W.B.; PEREIRA, R.S.D.; WINKLER, A.S.; CHIARELO, C. **Efeito imediato e residual da adubação fosfatada na cultura do arroz irrigado por inundação, sobre a produtividade de grãos de arroz.** In: V Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, XXVII Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, 2007. Anais. Pelotas, v.1, p.528-531.
- GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas.** 2003. 213f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

- GOMES, A. da S.; FERREIRA, L.H.G.; BENDER, R.R. **Uso de fosfato natural no cultivo de arroz, soja e milho em rotação, no sistema plantio direto.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005. 35p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n.20).
- GONÇALVES, G.K.; MEURER, E.J. Disponibilidade de Fósforo em Solos Cultivados com Arroz Irrigado por Alagamento no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2745-2750, 2008, Número Especial.
- KROTH, P.L. **Disponibilidade de fósforo no solo para plantas e fatores que afetam a extração por resina de troca em membrana.** 1998. 168f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- LINDSAY, W.L. **Chemical equilibrium in soils.** New York: John Wiley & Sons, 1979. 449p.
- LOPES, S.I.G. **Eficiência da adubação potássica e distribuição radicular do arroz irrigado.** 1991. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MACHADO, A. **Winstat - Sistema de análises estatísticas para o Windows.** Versão 1.0, Pelotas : NIA – Núcleo de Informática Aplicada, Universidade Federal de Pelotas, 2001, CD-ROM.
- POCOJESKI, E. **Estimativa do estado nutricional de arroz irrigado por alagamento.** 2007. 97f. Dissertação (Mestrado em Solos) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.24, p.29-96, 1972.
- RAIJ, B. Van; QUAGGIO, J.A.; SILVA, M.N. Extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soil by anion-exchange resin procedure. **Science of Plant Analysis**, New York, v.17, p.547-566, 1986.
- SILVA, F.C.; RAIJ, B.V. Avaliação da disponibilidade de fósforo por diversos extratores em amostras de solo cultivados com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.83-90, 1996.
- SILVA, L.S.; RANNO, S.K.; RHODEN, C.; SANTOS, D.R.; GRAUPE, A. Avaliação de métodos para estimativa da disponibilidade de fósforo para arroz em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.207-216, 2008.

- SILVA, W.M.; FABRÍCIO, A.C.; MARCHETTI, M.E.; KURIHARA, C.H.; MAEDA, S.; HERNANI, L.C. Eficiência de extractores de fósforo em dois Latossolos do mato Grosso do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2277-2285, 1999.
- SIMS, J.T. Comparison of Mehlich 1 and Mehlich 3 extractants for P, K, Ca, Mg, Mn, Cu and Zn in atlantic coastal plain soils. **Communication in Soil Science and Plant Analisys**, New York, v.20, p. 1707-1726, 1989.
- SKOGEY, O.; DOBERMANN, A. Synthetic ion-exchange resins: soil and environmental studies. **Journal Environmental Quality**, Madison, v.25, p.13-24, 1996.
- SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI, 2007. 154p.
- STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. As principais classes de solos identificadas no Rio Grande do Sul. In: **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. revista e ampliada. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR. 2008. 222p.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLK WEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. revista e ampliada. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS. 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, n.5).
- VAHL, L.C. O Fósforo na Cultura do Arroz Irrigado. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004, p.419-434.
- VAHL, L.C.; SOUSA, R.O. Aspectos físico-químico de solos alagados. In: GOMES, A.da.S.; MAGALHÃES Jr, A.M. de (Eds.) **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.97-118.
- ZIMMERMANN, F.J.P. **Estatística aplicada à pesquisa agrícola**. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, 2004. 402p.

**4. ARTIGO 2-** Formas de fósforo em Planossolo cultivado com arroz irrigado em resteva de milho e soja sob diferentes manejos da adubação fosfatada.

**FORMAS DE FÓSFORO EM PLANOSSOLO CULTIVADO COM ARROZ  
IRRIGADO EM RESTEVA DE MILHO E SOJA SOB DIFERENTES MANEJOS DA  
ADUBAÇÃO FOSFATADA**

**PHOSPHORUS FORMS IN ALBAQUALF SOIL CULTIVED WITH IRRIGATED  
RICE ON MAIZE AND SOYBEAN MULCH UNDER DIFERRENTS PHOSPHORUS  
FERTILIZATION**

**RESUMO-**

O fósforo liberado pelos fertilizantes pode apresentar-se no solo em formas de maior ou menor labilidade, ligado, principalmente, a Fe, Al, Ca e à matéria orgânica do solo. As técnicas de fracionamento de fósforo visam à identificação das formas com que este elemento é retido no solo e sua contribuição na capacidade de suprimento de fósforo às plantas. O método proposto por Hedley apresenta como vantagem a obtenção de informações sobre a disponibilidade de fósforo a curto e longo prazo. Durante o alagamento do solo no cultivo do arroz irrigado, os óxidos de ferro passam a ser considerados como fonte de fósforo para as plantas de arroz, já que bactérias anaeróbias utilizam os óxidos férricos como receptores de elétrons no processo de respiração, reduzindo-os a óxidos ferrosos, de maior solubilidade, promovendo a dessorção do fósforo. Neste ambiente, o fósforo poderá ser acessado pelas plantas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição das frações inorgânicas e orgânicas de fósforo em um Planossolo cultivado com milho e soja em sistema plantio direto, adubado com superfosfato triplo (SFT) e fosfato natural de Arad (FNA), e a contribuição das frações inorgânicas para o arroz irrigado como cultura subsequente. Para a realização do trabalho foram utilizados dois experimentos em um Planossolo Háplico eutrófico solódico na área experimental da Estação Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado. Os experimentos foram delineados em blocos ao acaso com quatro repetições e os tratamentos foram dispostos em um fatorial 2 x 2 (SFT e FNA, com e sem reaplicação anual de P com SFT) mais um tratamento adicional testemunha sem a aplicação da adubação fosfatada. Foram coletadas amostras de solo em três profundidades, 0 - 2,5 cm; 2,5 - 5,0 cm; e 5,0 - 15,0 cm onde foi realizado o fracionamento de fósforo pelo método de Hedley et al. (1982) modificado por Condron et al. (1985). As formas de P determinadas no solo foram: P disponível extraído pela Resina e P inorgânico e orgânico extraído por  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup>; P inorgânico e P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup> e as formas mais estáveis de Po e Pi residual), determinadas por digestão. Nos extratos alcalinos foi determinado o P total por digestão, sendo o Po obtido por diferença entre o P total e P inorgânico. Nas plantas determinou-se a quantidade total acumulada de P calculada a partir da concentração de fósforo na parte aérea (folhas, colmo e grãos) em relação à massa de matéria seca. As frações de fósforo inorgânico que predominam em um Planossolo cultivado com as culturas de milho e soja em sistema plantio direto são as extraídas com NaOH 0,1 e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>. As adubações realizadas anualmente com superfosfato triplo e fosfato natural de Arad

aumentaram todas as frações inorgânicas de fósforo no solo, desde as mais lábeis até as menos lábeis. As frações orgânicas apresentam-se pouco sensíveis à adubação fosfatada. As quantidades de fósforo acumuladas na parte aérea das plantas de arroz melhor se correlacionaram com as frações de fósforo mais lábeis (RTA,  $\text{NaHCO}_3$  e  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ), principalmente na profundidade de 0,0 - 2,5 cm.

Palavras-chave: Adubação fosfatada. Frações de P. Formas inorgânicas de P.

## ABSTRACT-

The phosphorus from the fertilizers can be presented in the soil in forms of greater or minor lability. It is mainly linked to the Fe, Al and Ca and to the soil organic matter. The techniques of P fractions aim to identify the forms in which this element is retained in soil and its contribution on the supplement of P capacity to the plants. The method proposed by Hedley presents, as an advantage, the information gathering about P availability in short and long stated period. In the case of irrigated rice, especially during the period when the soil is inundated, the iron oxide is the P source for the rice plants. In this process the anaerobic bacteria use ferric electron oxides as receptors in the breath process, reducing them to the ferrous oxides (bigger solubility), promoting the desorption of P. In this environment, therefore, the P can be accessed by the plants. The objective of this work was to evaluate the distribution of P inorganic and organic fractions in an Albaqualf soil cultivated with maize and soybean under no tillage. Fertilizers with triple superphosphate (TSP) and Arad rock phosphate (ARP) were applied in the area. The contribution of the inorganic fractions for the subsequent irrigated rice was also evaluated. This study was done in two field experiments in the Lowland Experimental Station from Embrapa Temperate Climate Center. The soil was classified as an Albaqualf. The experiments were conducted under a randomized block design with four replications. For this, 2 x 2 factorial (TSP and ARP, with and without annual replication of P with TSP) was designed. Additionally, it was conducted a treatment under natural condition (without the application of phosphate fertilization). The soil was collected in three depths (0 - 2.5 cm; 2.5 - 5.0 cm; and 5.0 - 15.0 cm) where it was carried out the P fractions using the method of Hedley al. (1982) modified by Condron et al. (1985). The P forms evaluated were: Available inorganic P extracted by anion-exchange resin; inorganic and organic P extracted by 0.5 NaHCO<sub>3</sub> mol L<sup>-1</sup>; Inorganic and organic P extracted by 0.1 NaOH mol L<sup>-1</sup> and 0.5 NaOH mol L<sup>-1</sup>; inorganic P extracted by HCl 1 mol L<sup>-1</sup> and residual forms most steady of inorganic and organic phosphorus determined by digestion. In alkaline extracts the total P was determined by digestion. Organic P was obtained by the difference between inorganic P and total P. From the plants it was calculated the P accumulated from the P concentration in shoot (leaves, stalk and grains) in relation to the dry matter. The fractions of P inorganic that predominate in Albaqualf soil cultivated with maize and soybean under no tillage were extracted with 0.1 NaOH and 0.5 NaOH mol L<sup>-1</sup>. The fertilizations carried out annually with TSP and ARP had increased all the P inorganic fractions in soil, since the more labile until the less labile. The organic fractions were not much affected by the phosphate fertilization. The P accumulated in shoot of rice plants was better correlated with the labile P fractions (RTA, NaHCO<sub>3</sub> and 0.1 NaOH mol L<sup>-1</sup>), mainly in the superficial layer (0.0 - 2.5 cm).

Key words: Phosphorus fertilizers. Phosphorus fractions. P Inorganic forms.

## INTRODUÇÃO

O teor de fósforo total na superfície dos solos varia de 0,005 a 0,15% (HAVLIN et al., 2005), distribuídas entre as frações orgânicas e inorgânicas, cujos teores são variáveis entre os solos. O fósforo orgânico pode constituir de 5 a 80% do fósforo total do solo, podendo ser relevante nos solos tropicais, pois atuaativamente na disponibilidade de fósforo às plantas (SANTOS e ANGHINONI, 2003). Esta forma de fósforo é originária de resíduos vegetais e animais adicionados ao solo, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição (RHEINHEIMER et al., 2000a). O fósforo inorgânico adsorvido, de maior abundância, pode ser encontrado ligado a ferro, alumínio e cálcio, adsorvido às caulinitas, adsorvido à matéria orgânica do solo através de pontes de cátions, resultando em baixos teores de fósforo na solução (PIERZYNSKI et al., 2005).

O fósforo liberado pelos fertilizantes pode apresentar-se no solo em formas de maior ou menor labilidade, ligado, principalmente, a compostos de Fe, Al, Ca e à matéria orgânica do solo (RAIJ, 1991). A redistribuição do fósforo das diversas formas fornecidas pela adubação fosfatada também ocorre em solos cultivados sob sistema plantio direto (SPD), pois se observa junto à superfície do solo um maior acúmulo de matéria orgânica e de nutrientes, inclusive de fósforo (RHEINHEIMER et al., 2000).

As técnicas de fracionamento de fósforo visam à identificação das formas com que este elemento é retido no solo e sua contribuição na capacidade de suprimento de fósforo para as plantas. Várias técnicas de fracionamento de fósforo têm sido utilizadas, destacando-se os métodos de Chang e Jackson (1957) e de Hedley et al. (1982) modificado por Condron et al. (1985). Estas técnicas variam no número e na forma das frações extraídas (inorgânicas e orgânicas), bem como na ordem e tipo de extrator. O método proposto por Hedley et al. (1982) apresenta como vantagem a obtenção de informações sobre a disponibilidade de fósforo a curto e longo prazo, por meio da determinação dos teores das frações orgânicas e inorgânicas de fósforo com vários graus de disponibilidade, independentemente do grau de intemperismo, dos sistemas de cultivos empregados e da adubação fosfatada. O método utiliza sequencialmente extractores de menor à maior força de extração, os quais removem P inorgânico e P orgânico das formas mais disponíveis às mais estáveis.

A introdução do arroz irrigado em sistema de rotação de culturas no sistema plantio direto pode promover alterações na disponibilidade de fósforo no solo. Durante o alagamento do solo, os óxidos de ferro passam a ser considerados como fonte de fósforo para as plantas de arroz, já que bactérias anaeróbias utilizam os óxidos férricos como receptores de elétrons no processo de respiração, reduzindo-os a óxidos ferrosos, de maior solubilidade, promovendo a dessorção do fósforo (PONNAMPERUMA, 1972). Neste ambiente, o fósforo poderá ser acessado pelas plantas. Assim, formas de fósforo consideradas de baixa labilidade em solos de sequeiro podem, em condições de alagamento, suprir fósforo para as plantas de arroz (PHEAV et al., 2005).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição das frações inorgânicas e orgânicas de fósforo em um Planossolo cultivado com milho e soja em sistema plantio direto, adubado com superfosfato triplo (SFT) e fosfato natural de Arad (FNA), e a contribuição das frações inorgânicas para o arroz irrigado como cultura subsequente.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização do trabalho foram utilizados dois experimentos, conduzidos desde 2003 em um Planossolo Háplico eutrófico solódico (STRECK et al., 2008) na área experimental da Estação Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado. Os experimentos foram delineados em blocos ao acaso com quatro repetições e os tratamentos foram dispostos em um fatorial 2 x 2 (superfosfato triplo - SFT e fosfato natural de Arad - FNA, com e sem reaplicação anual de P na forma de SFT) mais um tratamento adicional testemunha sem a aplicação da adubação fosfatada. Um dos experimentos foi conduzido com as culturas da soja no verão e azevém no inverno, e o outro com as culturas do milho no verão e azevém + trevo branco no inverno. A área de cada parcela correspondeu a 20 m<sup>2</sup>.

As espécies de sequeiro foram cultivadas na mesma área por quatro anos, sendo que a implantação dos experimentos foi realizada pelo sistema convencional de cultivo e nos demais anos sistema plantio direto. As culturas de inverno foram dessecadas com herbicida de ação total e os restos vegetais permaneceram na superfície do solo. No verão do quinto ano todas as parcelas foram semeadas com arroz irrigado (cultivar Atalanta) em sistema plantio direto sobre a resteva das culturas de sequeiro.

As doses de fósforo foram estabelecidas em função da análise inicial do solo realizada antes da instalação dos experimentos (Tabela 1). A adubação foi realizada a lanço e incorporada na instalação dos experimentos. Nas parcelas em que o solo foi coletado não foi realizada calagem.

**Tabela 1.** Resultados da análise do solo da área experimental, na camada de 0 - 20 cm de profundidade, antes da implantação do experimento.

pH <sub>água</sub>	MO	K	Na	P	AI	Ca	Mg	Argila
Índice	%	-----	mg dm <sup>-3</sup>	-----	-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----	%
5,5	2,2	39,9	48	1,5	0,6	2,2	1,3	20

Fonte: Laboratório de análise de solos da Embrapa Clima Temperado.

Foram aplicados quatro tratamentos de adubação fosfatada: SFT - Dose recomendada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de SFT (110 kg ha<sup>-1</sup> para o milho e 120 kg ha<sup>-1</sup> para a soja) sem e com reaplicação anual da dose inicialmente recomendada; FNA -

Dose recomendada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de FNA sem e com reaplicação anual da dose inicialmente recomendada com SFT; e um tratamento adicional: Testemunha - sem aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

As tabelas 2 e 3 apresentam a estrutura dos tratamentos aplicados para melhor compreensão dos experimentos. Também foram realizadas adubações potássica e nitrogenada para o milho (100 kg ha<sup>-1</sup> de KCl e 130 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de uréia, respectivamente) e adubação potássica para a soja (90 kg ha<sup>-1</sup> de KCl).

**Tabela 2.** Distribuição temporal e quantitativa dos tratamentos, considerando fontes e doses de fósforo (kg ha<sup>-1</sup>) envolvendo o sistema de cultura milho/arroz irrigado.

Tratamento	2003/04		2004/05		2005/06		2006/07		2007/08		Total/Dose	
	Fonte	Dose <sup>3</sup>	Fonte	Dose	Fonte	Dose	Fonte	Dose	Fonte	Dose	FNr	SFT
Testemunha	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	0	0
SFT S/Reap	SFT <sup>1</sup>	110	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	0	110
FNA S/Reap	FNr <sup>2</sup>	110	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	110	0
SFT C/Reap	SFT	110	SFT	110	SFT	110	SFT	110	SFT	110	0	550
FNA C/Reap	FNr	110	SFT	110	SFT	110	SFT	110	SFT	110	110	440

<sup>1</sup>SFT = Superfosfato triplo; <sup>2</sup>FNr = Fosfato natural reativo de Arad; <sup>3</sup>Dose recomendada de adubação fosfatada para o milho.

**Tabela 3.** Distribuição temporal e quantitativa dos tratamentos, considerando fontes e doses de fósforo (kg ha<sup>-1</sup>) envolvendo o sistema de cultura soja/arroz irrigado.

Tratamento	2003/04		2004/05		2005/06		2006/07		2007/08		Total/Dose	
	Fonte	Dose <sup>3</sup>	Fonte	Dose	Fonte	Dose	Fonte	Dose	Fonte	Dose	FNr	SFT
Testemunha	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	0	0
SFT S/Reap	SFT <sup>1</sup>	120	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	0	120
FNA S/Reap	FNr <sup>2</sup>	120	-----	0	-----	0	-----	0	-----	0	120	0
SFT C/Reap	SFT	120	SFT	120	SFT	120	SFT	120	SFT	120	0	600
FNA C/Reap	FNr	120	SFT	120	SFT	120	SFT	120	SFT	120	120	480

<sup>1</sup>SFT = Superfosfato triplo; <sup>2</sup>FNr = Fosfato natural reativo de Arad; <sup>3</sup>Dose recomendada de adubação fosfatada para a soja.

Antes do cultivo de arroz, no quinto ano dos experimentos, foram coletadas amostras de solo em três profundidades, 0 - 2,5 cm; 2,5 - 5,0 cm; e 5,0 - 15,0 cm utilizando trado calador, sendo cada amostra composta por dez subamostras por parcela.

Nas amostras de solo foi realizado o fracionamento de fósforo pelo método de Hedley et al. (1982) modificado por Condron et al. (1985), com exceção do P-microbiano que não foi determinado. As formas de P determinadas no solo foram: P

disponível extraído pela resina de troca aniônica (P RTA) e P inorgânico e orgânico adsorvido à superfície dos colóides (Pi bic e Po bic - extraídos por  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> em pH 8,5); P inorgânico ligado a Fe e a Al, e o P orgânico ligado a compostos húmicos (Pi hid e Po-hid - extraídos por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>); P ligado a Ca (P-HCl - extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup>) e as formas mais estáveis de Po e Pi (P-res - residual), determinadas por digestão com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado +  $\text{H}_2\text{O}_2$  +  $\text{MgCl}_2$  (BROOKES e POWLSON, 1981).

O somatório das frações P RTA, Pi bic, Pi hid 0,1 e Pi hid 0,5 mol L<sup>-1</sup> e P HCl constituem o P inorgânico do solo. As formas de fósforo extraídas no fracionamento anteriormente ao cultivo de arroz irrigado foram analisadas em função dos tratamentos. A fração de P extraída pela resina de troca aniônica foi determinada pelo método descrito em Tedesco et al. (1995). O Pi dos extratos alcalinos extraídos por  $\text{NaHCO}_3$  e NaOH foi analisado pelo método Dick e Tabatabai (1977). Nos extratos alcalinos foi determinado o P total por digestão (USEPA, 1971), sendo o Po obtido por diferença entre o P total e P inorgânico. O fósforo dos extratos ácidos foi determinado por metodologia descrita por Murphy e Riley (1962).

No final do ciclo da cultura uma amostra de 0,50 m linear de plantas de arroz foi coletada em cada parcela, onde foi realizada a avaliação da massa de matéria seca na parte aérea (colmo, folhas e grãos), após secagem em estufa à temperatura de 65°C por 72 horas ( $\text{kg m}^{-2}$ ), concentração de fósforo na parte aérea (colmo, folhas e grãos) (TEDESCO et al., 1995) e quantidade total acumulada de P ( $\text{g m}^{-2}$ ), calculada a partir da concentração de fósforo em relação à massa de matéria seca.

A metodologia da análise estática dos resultados utilizada foi a seguinte: a decomposição da variação entre tratamentos (ANOVA) considerou a estrutura fatorial 2<sup>2</sup>, acrescida do tratamento adicional, bem como o delineamento das unidades considerado (blocos ao acaso com quatro repetições). A identificação dos fatores componentes da estrutura fatorial foi a seguinte: Fator A - Fonte de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (A1: SFT e A2: FNA) e fator B - Reaplicação da adubação fosfatada (B1: sem reaplicação e B2: com reaplicação do  $\text{P}_2\text{O}_5$ ). O tratamento adicional correspondeu a uma testemunha sem aplicação de fósforo.

Nas condições gerais impostas, o modelo pode ser expresso pela seguinte equação:

$$Y_{ij} = m + t_i + b_j + EE_{ij}$$

Onde:

$Y_{ij}$ : resposta observada na parcela que recebeu o i-ésimo tratamento no j-ésimo bloco;

$m$ : valor médio do experimento;

$t_i$ : efeito do i-ésimo tratamento;

$b_j$  : efeito do j-ésimo bloco;

$EE_{ij}$  : Erro experimental observado na parcela que recebeu o i-ésimo tratamento no j-ésimo bloco;

Para a decomposição dos efeitos entre tratamentos que compõe a estrutura factorial foram utilizados os procedimentos descritos por ZIMMERMANN (2004): uso de contrastes ortogonais para isolar os efeitos do fatorial e decomposição do fatorial nos efeitos principais e suas interações. No Anexo 1 é apresentada a tabela com as fontes de variação consideradas no experimento e os respectivos graus de liberdade. Segundo Zimmermann (2004) uma particularidade importante é que o fato de os fatores experimentais apresentarem apenas dois níveis, não há a necessidade de efetuar teste complementar ao teste F para comparação de médias.

Nos resultados onde foram realizadas análises de correlação, utilizou-se o programa estatístico Winstat (MACHADO, 2001).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Frações Inorgânicas de fósforo

O fósforo inorgânico do solo que inclui as frações extraídas pela resina de troca aniônica (P RTA),  $\text{NaHCO}_3$  (Pi bic),  $\text{NaOH}$  (P hid) e  $\text{HCl}$  (P HCl) são apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

A adubação fosfatada efetuada na área de resteva de milho aumentou os teores de fósforo nas diferentes frações avaliadas, independente da fonte, à exceção do fósforo extraído pela RTA na profundidade de 5,0 - 15,0 cm (Tabela 4). Enquanto que na área de resteva de soja (Tabela 5) não foi observado efeito da adubação nas frações Pi hid  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  e P HCl na profundidade 5,0 - 15,0 cm e na fração Pi hid  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  nas três profundidades avaliadas.

A adubação fosfatada realizada tanto na implantação do experimento como a realizada todos os anos foi capaz de aumentar os teores de fósforo nas diferentes frações, desde formas consideradas mais lábeis, como a extraída pela resina de troca aniônica, até as formas consideradas não lábeis, como o fósforo extraído com  $\text{HCl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$ . Tal comportamento foi verificado independentemente da solubilidade da fonte de P utilizada na implantação do experimento, o que discorda de alguns autores (PARFITT, 1978; BARROW, 1983) que afirmam que fontes mais solúveis de P perdem a eficiência ao longo do tempo em relação ao fosfato natural, pois o fósforo rapidamente dissolvido fica mais propenso à formação de formas não lábeis.

O fósforo adicionado ao solo, independente de sua forma, ao se dissolver liga-se a fase sólida mineral através de um processo denominado troca de ligantes, formando complexos de esfera interna na superfície de minerais, principalmente oxi/hidróxidos de Fe e Al (SIMS e PIERZYUSKI, 2005). Quando o íon fosfato está ligado a apenas um oxigênio na superfície mineral forma-se um complexo monodentado que é considerado uma forma lábil de P (TISDALE et al., 1993). Com o passar do tempo ocorre um envelhecimento do cristal, e o íon fosfato passa a se ligar em dois pontos na superfície mineral, formando complexos bidentados ou binucleados, que são consideradas formas não lábeis (NOVAIS e SMYTH, 1999), isso explica o aumento dos teores de P nas formas consideradas não lábeis (Tabelas 4 e 5).

As diferenças observadas nas frações do fósforo nos tratamentos com e sem reaplicação foram menores na profundidade de 5,0 - 15,0 cm em relação às outras duas avaliadas, provavelmente porque o fósforo foi aplicado na superfície do solo não sendo incorporado, o que promoveu maiores concentrações do elemento nas camadas mais superficiais do solo, principalmente na profundidade de 0 - 2,5 cm. A adubação fosfatada realizada todos os anos proporcionou o maior valor das frações consideradas disponíveis (P RTA e Pi bic) nas três profundidades avaliadas (Tabelas 4 e 5).

**Tabela 4.** Frações de fósforo inorgânico ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) em três profundidades de um Planossolo em função de fontes de adubação fosfatada (Superfosfato Triplo - SFT e Fosfato Natural reativo de Arad - FNA) em resteva de milho no sistema plantio direto, sem e com reaplicação do adubo fosfatado (S/Reap. e C/Reap. na forma de SFT).

Fonte	Profundidade (cm)					
	0-2,5		2,5-5,0		5,0-15,0	
	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.
----- P RTA -----						
Testemunha	6,5*		4,9*		4,1 <sup>ns</sup>	
SFT		11,2Ab	55,5Aa		6,5Ab	13,7Aa
FNA		10,5Ab	49,4Aa		5,7Ab	14,8Aa
----- Pi bic 0,5 mol L <sup>-1</sup> -----						
Testemunha	9,5*		8,7*		8,0*	
SFT		13,2Ab	34,4Aa		9,5Ab	17,6Aa
FNA		11,5Ab	25,9Aa		9,4Ab	17,5Aa
----- Pi hid 0,1 mol L <sup>-1</sup> -----						
Testemunha	20,9*		18,6*		16,7*	
SFT		25,5Ab	45,1Aa		22,3Ab	30,8Aa
FNA		27,7Ab	41,0Aa		22,3Ab	32,0Aa
----- Pi HCl 1,0 mol L <sup>-1</sup> -----						
Testemunha	2,4*		2,2*		1,8*	
SFT		3,2Ab	5,2Aa		2,4Ab	3,1Aa
FNA		2,9Ab	5,5Aa		2,2Ab	3,9Aa
----- Pi hid 0,5 mol L <sup>-1</sup> -----						
Testemunha	21,9*		18,6*		16,8*	
SFT		29,3Ab	33,1Aa		25,8Ab	30,0Aa
FNA		24,7Ab	32,7Aa		22,6Ab	28,3Aa

\*Testemunha difere dos demais tratamentos. <sup>ns</sup>Não significativo. Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna e minúsculas na linha dentro de cada profundidade e fração de P diferem estatisticamente pelo teste F < 5 % de probabilidade. Pi RTA: fósforo extraído com a resina de troca aniônica; Pi bic: fósforo inorgânico extraído com  $\text{NaHCO}_3$ ; Pi hid 0,1 mol L<sup>-1</sup>: fósforo inorgânico extraído com  $\text{NaOH}$  0,1 mol L<sup>-1</sup>; Pi HCl: fósforo extraído com HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>; Pi hid 0,5 mol L<sup>-1</sup>: fósforo inorgânico extraído com  $\text{NaOH}$  0,5 mol L<sup>-1</sup>. Testemunha - sem aplicação de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; SFT - Dose recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de SFT sem e com reaplicação anual; FNA - Dose recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de FN de Arad sem e com reaplicação anual com SFT.

Gonçalves (2007), avaliando teores de P extraídos por RTA e NaHCO<sub>3</sub> em um Planossolo adubado com SFT observou valores de 6,4 mg kg<sup>-1</sup> na extração pela RTA e 22,5 mg kg<sup>-1</sup> na extração com NaHCO<sub>3</sub>. Comparando-se esses resultados com o presente estudo, verifica-se que onde houve reaplicação anual da dose inicialmente recomendada os teores extraídos pelos mesmos extratores foram muito superiores, mas quando não houve reaplicação os teores extraídos com NaHCO<sub>3</sub> são quase que a metade dos encontrados por Gonçalves (2007).

**Tabela 5.** Frações de fósforo inorgânico (mg kg<sup>-1</sup>) em três profundidades de um Planossolo em função de fontes de adubação fosfatada (Superfosfato Tripla - SFT e Fosfato Natural reativo de Arad - FNA) em resteva de soja no sistema plantio direto, sem e com reaplicação do adubo fosfatado (S/Reap. e C/Reap.).

Fonte	Profundidade (cm)					
	0-2,5		2,5-5,0		5,0-15,0	
	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.
P RTA						
Testemunha	7,6*		5,3*		4,6*	
SFT	10,9Ab	49,0Aa	7,4Ab	24,9Aa	6,1Ab	14,7Aa
FNA	9,2Bb	38,9Ba	7,2Ab	23,8Aa	5,1Ab	9,0Aa
Pi bic 0,5 mol L <sup>-1</sup>						
Testemunha	10,5*		9,3*		8,7*	
SFT	11,5Ab	31,6Aa	10,2Ab	19,3Aa	9,7Ab	14,7Aa
FNA	11,0Ab	22,5Ba	9,3Bb	14,5Ba	8,8Bb	10,3Ba
Pi hid 0,1 mol L <sup>-1</sup>						
Testemunha	23,0*		19,9*		20,0 <sup>ns</sup>	
SFT	23,5Ab	41,9Aa	20,1Ab	29,9Aa	18,8Aa	22,4Aa
FNA	26,0Ab	36,2Aa	21,6Ab	28,2Aa	20,5Aa	22,8Aa
Pi HCl 1,0 mol L <sup>-1</sup>						
Testemunha	2,6*		1,8*		2,1 <sup>ns</sup>	
SFT	3,5Ab	5,7Aa	2,5Ab	3,9Aa	2,2Aa	2,8Aa
FNA	3,0Ab	5,6Aa	2,3Ab	3,4Aa	2,0Aa	2,5Aa
Pi hid 0,5 mol L <sup>-1</sup>						
Testemunha	28,8 <sup>ns</sup>		25,8 <sup>ns</sup>		22,6 <sup>ns</sup>	
SFT	31,0Aa	29,7Aa	24,7Aa	27,9Aa	18,2Aa	25,1Aa
FNA	31,1Aa	27,7Aa	28,5Aa	25,9Aa	25,8Aa	25,4Aa

\*Testemunha difere dos demais tratamentos. <sup>ns</sup>Não significativo. Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna e minúsculas na linha dentro de cada profundidade e fração de P diferem estatisticamente pelo teste F < 5 % de probabilidade. Pi RTA: fósforo extraído com a resina de troca aniónica; Pi bic: fósforo inorgânico extraído com NaHCO<sub>3</sub>; Pi hid 0,1 mol L<sup>-1</sup>: fósforo inorgânico extraído com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Pi HCl: fósforo extraído com HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>; Pi hid 0,5 mol L<sup>-1</sup>: fósforo inorgânico extraído com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>. Testemunha - sem aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; SFT - Dose recomendada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de SFT sem e com reaplicação anual; FNA - Dose recomendada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de FN de Arad sem e com reaplicação anual com SFT.

De modo geral, verifica-se que houve predominância de participação das frações inorgânicas extraídas com NaOH 0,1 e 0,5 mol L<sup>-1</sup> sobre as demais frações (Tabelas 4 e 5), comportamento já relatado em estudos de fracionamento de P em solos ácidos (TOKURA et al., 2002; SANTOS et al., 2008). Gonçalves (2007) observou que, depois da fração residual, as frações extraídas com NaOH predominaram sobre as demais frações de fósforo inorgânico de quatro solos de várzea, atribuindo essa predominância ao fato de estarem adsorvidas ao solo com elevada energia.

A reaplicação anual de fósforo resultou em maiores teores de P na maioria das frações (Tabelas 4 e 5), a exceção da fração Pi hid 0,1 mol L<sup>-1</sup> na profundidade de 5,0 - 15,0 na área de resteva de milho (Tabela 4), das frações P hid 0,1 mol L<sup>-1</sup> e P HCl na profundidade 5,0 - 15,0 cm e Pi hid 0,5 mol L<sup>-1</sup> nas três profundidades na área de resteva da soja (Tabela 5). As frações inorgânicas extraídas com NaOH 0,1 e 0,5 mol L<sup>-1</sup> representam o P ligado a Fe e a Al (HEDLEY et al., 1982). O pH em água inicial do solo era de 5,5 (Tabela 1), o que pode ter favorecido o aumento de P nessas frações, concordando com os diagramas de solubilidade de P propostos por Lindsay e Moreno (1960) que indicam que a solubilidade de P é controlada por fosfato de cálcio em pH acima de sete, e por fosfato de ferro e alumínio, em pH inferior a sete. Valores superiores aos observados neste estudo foram relatados por Gonçalves (2007) em um Planossolo, sendo de 51,4 mg kg<sup>-1</sup> na extração com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e 64,3 mg kg<sup>-1</sup> na extração com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>.

Zhang e Mackenzie (1997) relatam que a fração Pi hid 0,1 mol L<sup>-1</sup> foi a mais sensível no balanço entre as adições e retiradas de P durante um longo período de cultivo, indicando que esta fração atua como dreno e posteriormente como fonte de fósforo às plantas. A tendência dos solos apresentarem maiores concentrações de P hid pode ser desvantajosa em curto espaço de tempo sob o ponto de vista de fertilidade em solos oxidados, devido à menor disponibilidade dessa fração em relação às frações P RTA e P bic, já quando o solo é alagado a fração P hid poderá contribuir com a nutrição de fósforo para as plantas de arroz.

Ao extrator HCl 1 mol L<sup>-1</sup>, utilizado após o NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, é atribuída a capacidade de dessorção de formas inorgânicas de P associadas ao Ca (CROSS e SCHLESINGER, 1995). Os baixos valores detectados em relação às demais frações refletem a participação pouco expressiva dessa fração no compartimento de P inorgânico do solo em estudo (Tabelas 4 e 5). Para a maioria das profundidades

do solo, a reaplicação anual de fósforo proporcionou maiores teores de P nessa fração à exceção da profundidade 5,0 - 15,0 cm na área de resteva de soja. Em estudo realizado por Ranno et al. (2007), em que analisaram diferentes tipos de solos de várzea e as formas de fósforo nestes solos, verificaram que o P ligado a cálcio variou de 1,0 a 31,0 mg kg<sup>-1</sup> antes do alagamento do solo, sendo que a média dos Planossolos foi de 4,0 mg kg<sup>-1</sup>. Os autores justificam os valores mais elevados de alguns solos ao fato de serem solos poucos intemperizados e ricos em cálcio trocável, que segundo Novais e Smyth (1999) deverão ser mais ricos em P ligado a cálcio, além da calagem que foi realizada no solo para correção do pH, o que pode ter gerado aumento na atividade de Ca<sup>2+</sup> e possibilidade de precipitação com o fosfato.

Para a maioria das frações de P não houve diferenças entre as fontes de adubação fosfatada avaliadas (Tabelas 4 e 5) com exceção do fósforo extraído pela RTA e Pi bic na profundidade de 0,0 - 2,5 cm e Pi bic (Tabela 5), onde o SFT foi superior ao FNA aplicado parcialmente. Os fosfatos acidulados apresentam alta solubilidade e proporciona disponibilidade de fósforo imediata às plantas (NOVAIS e SMYTH, 1999), o que não ocorre com os fosfatos naturais reativos, que se tornam solúveis ao longo do tempo. Apesar disso, observa-se que não houve diferenças entre as fontes estudadas. Os fosfatos naturais apresentam maior solubilidade em valores de pH mais baixos, sendo que a não realização da calagem do solo, pode explicar em parte os resultados encontrados.

Além disso, as espécies vegetais influenciam na dissolução dos fosfatos naturais. As diferenças na absorção de fósforo dos fosfatos naturais entre as espécies estão relacionadas com o pH da rizosfera (RAJAN et al., 1996). Assim, um pH em água de 6,0 pode ser reduzido na rizosfera para 4,5 favorecendo a dissolução dos fosfatos naturais (GILLESPIE e POPPE, 1990). No solo em estudo o pH em água inicial era de 5,5 (Tabela 1). Isso pode ter favorecido a solubilidade dos fosfatos pelas raízes das plantas de sequeiro que antecederam o arroz.

Nos tratamentos onde se fez reaplicação anual da adubação fosfatada, a mesma foi sempre realizada com o SFT, o que influenciou nos resultados, porém alguns trabalhos têm mostrado efeito positivo dos fosfatos naturais reativos comparados ao SFT após alguns anos de cultivo (GOMES et al., 2001; GOMES et al., 2005; FERREIRA et al., 2007).

## Frações Orgânicas de fósforo

A adubação fosfatada não influenciou os valores das frações orgânicas de fósforo no solo em relação à testemunha na área de resteva de milho (Tabela 6). Na área de resteva de soja (Tabela 7) houve efeito positivo da adubação apenas sobre a fração Po hid 0,1 mol L<sup>-1</sup> nas profundidades 2,5 - 5,0 e 5,0 - 15,0 cm.

O Po é obtido pela diferença entre o P total e o Pi, isso interferiu nos valores reais. No entanto, Santos (2000) observou pouca variação nos teores de Po em três profundidades de um Latossolo, além disso, a adoção do sistema plantio direto e das sucessões de culturas por 18 anos não afetaram o Po do solo. O valor médio de Po encontrado por este autor foi de 325 mg kg<sup>-1</sup>, representando 31% do P total do solo. Gatiboni et al. (2007) também verificou que os teores de Po em um Latossolo foram pouco influenciados pelas diferentes doses de P.

De modo geral, a soma das frações de Po hid, e principalmente a fração Po hid 0,1 mol L<sup>-1</sup>, tiveram maior contribuição para o compartimento Po total (Tabelas 6 e 7), comportamento semelhante ao que foi observado às frações inorgânicas, em que o Pi hid foi a fração mais importante para o Pi total (Tabelas 4 e 5). Predominância do Po no compartimento considerado pouco disponível (Po hid) também foi observada para diferentes classes de solos em outros estudos (ARAÚJO e SALCEDO, 1997; TOKURA et al., 2002; GONÇALVES, 2007; SANTOS et al., 2008). Em relação à proporção, os extractores NaHCO<sub>3</sub> e NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> extraíram os maiores teores de P. Resultados semelhantes também foram observados por Santos (2000) em sistema plantio direto, pois segundo o autor extractores mais brandos extraem mais o P orgânico do que extractores com maior força de extração, como o NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>.

A adubação fosfatada realizada todos os anos proporcionou os maiores teores de Po bic e Po hid 0,1 mol L<sup>-1</sup> na profundidade de 0,0 - 2,5 cm e Po hid 0,1 mol L<sup>-1</sup> na profundidade de 2,5 - 5,0 cm, o que não foi observado na fração Po hid 0,5 mol L<sup>-1</sup>, onde não existiram diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 6). Enquanto na área de resteva de soja (Tabela 7) a reaplicação da adubação alterou apenas as frações P RTA e Po hid 0,5 mol L<sup>-1</sup> na profundidade 0,0 - 2,5 cm. A fração do Po hid 0,5 mol L<sup>-1</sup> agrupa formas de P menos lábeis, conforme as pressuposições do fracionamento de Hedley et al. (1982). São observadas menores proporções de P nesta fração em relação à Po hid 0,1 mol L<sup>-1</sup>.

**Tabela 6.** Frações de fósforo orgânico ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) em três profundidades de um Planossolo em função de fontes de adubação fosfatada (Superfosfato Triplo - SFT e Fosfato Natural reativo de Arad - FNA) em resteva de milho no sistema plantio direto, sem e com reaplicação do adubo fosfatado (S/Reap. e C/Reap.).

Fonte	Profundidade (cm)					
	0-2,5		2,5-5,0		5,0-15,0	
	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.
----- Po bic $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ -----						
Testemunha	25,8 <sup>ns</sup>		24,4 <sup>ns</sup>		22,4 <sup>ns</sup>	
SFT	27,6Ab	36,8Aa	26,4Aa	30,1Aa	23,7Aa	25,1Aa
FNA	30,8Ab	41,5Aa	28,3Aa	32,5Aa	23,5Aa	23,3Aa
----- Po hid $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ -----						
Testemunha	33,0 <sup>ns</sup>		34,3 <sup>ns</sup>		34,3 <sup>ns</sup>	
SFT	37,5Ab	42,0Aa	31,1Ab	36,7Aa	28,6Aa	39,3Aa
FNA	32,0Ab	44,1Aa	30,8Ab	34,8Aa	29,3Aa	31,9Aa
----- Po hid $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ -----						
Testemunha	13,4 <sup>ns</sup>		14,2 <sup>ns</sup>		12,6 <sup>ns</sup>	
SFT	7,5Aa	8,3Aa	5,0Aa	10,0Aa	10,2Aa	8,2Aa
FNA	10,5Aa	12,1Aa	11,0Aa	10,5Aa	10,4Aa	11,4Aa

\*Testemunha difere dos demais tratamentos. <sup>ns</sup>Não significativo. Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna e minúsculas na linha dentro de cada profundidade e fração de P diferem estatisticamente pelo teste F < 5 % de probabilidade Po bic: fósforo orgânico extraído com  $\text{NaHCO}_3$ ; Po hid  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ : fósforo orgânico extraído com  $\text{NaOH}, 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ; Po hid  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ : fósforo orgânico extraído com  $\text{NaOH}, 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ . Testemunha - sem aplicação de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; SFT - Dose recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de SFT sem e com reaplicação anual; FNA - Dose recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de FN de Arad sem e com reaplicação anual com SFT.

Foram observadas diferenças entre as fontes apenas na área de resteva de soja (Tabela 7) nas profundidades 2,5 - 5,0 e 5,0 - 15,0 cm onde o SFT foi superior ao FNA aplicado parcialmente, resultado não explicado do ponto de vista prático uma vez que a adubação foi realizada em superfície.

Os resultados de Po indicam que a adição de fosfatos ao solo alterou preferencialmente as frações inorgânicas de fósforo. Conte et al. (2003) observaram diminuição linear da participação do Po em relação ao P total quando da adição de fosfatos ao solo.

**Tabela 7.** Frações de fósforo orgânico ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) em três profundidades do solo em função de fontes de adubação fosfatada (Superfosfato Triplo - SFT e Fosfato Natural reativo de Arad - FNA) em resteva de soja no sistema plantio direto, sem e com reaplicação do adubo fosfatado (S/Reap. e C/Reap.).

Fonte	Profundidade (cm)					
	0-2,5		2,5-5,0		5,0-15,0	
	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.
----- Po bic $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ -----						
Testemunha	30,3 <sup>ns</sup>		26,6 <sup>ns</sup>		26,0 <sup>ns</sup>	
SFT	35,8Ab	40,3Aa	28,5Aa	33,8Aa	25,5Aa	27,1Aa
FNA	31,6Ab	48,2Aa	29,7Aa	30,7Aa	26,1Aa	26,7
----- Po hid $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ -----						
Testemunha	39,3 <sup>ns</sup>		33,4*		28,3*	
SFT	48,6Aa	48,2Aa	44,5Aa	43,3Aa	41,6Aa	36,1Aa
FNA	40,6Aa	43,9Aa	33,6Ba	36,2Ba	29,1Ba	33,3Ba
----- Po hid $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ -----						
Testemunha	10,7 <sup>ns</sup>		8,7 <sup>ns</sup>		9,6 <sup>ns</sup>	
SFT	10,4Ab	25,5Aa	7,3Aa	8,2Aa	9,3Aa	8,9Aa
FNA	8,8Ab	16,4Aa	8,5Aa	16,7Aa	7,3Aa	8,0Aa

\*Testemunha difere dos demais tratamentos. <sup>ns</sup>Não significativo. Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna e minúsculas na linha dentro de cada profundidade e fração de P diferem estatisticamente pelo teste  $F < 5\%$  de probabilidade. Po bic: fósforo orgânico extraído com  $\text{NaHCO}_3$ ; Po hid  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ : fósforo orgânico extraído com  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ; Po hid  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ : fósforo orgânico extraído com  $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ . Testemunha - sem aplicação de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; SFT - Dose recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de SFT sem e com reaplicação anual; FNA - Dose recomendada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de FN de Arad sem e com reaplicação anual com SFT.

O fósforo orgânico, embora possa servir como nutriente às plantas após a mineralização até formas inorgânicas parece apresentar menor importância prática no fornecimento de P às plantas em curto espaço de tempo (GATIBONI, 2003).

### Fósforo inorgânico, orgânico e residual

A adubação fosfatada gerou incrementos nos teores de fósforo da fração Pi total independente da profundidade (Tabela 8). Na fração Po total e P res houve aumento nos teores de fósforo com a adubação apenas na profundidade de 0,0 - 2,5 cm, enquanto que no P total do solo a aplicação da adubação fosfatada foi superior à testemunha nas três profundidades avaliadas (Tabela 8). Na área de resteva de soja (Tabela 9), o comportamento das frações foi semelhante ao observado na área de resteva de milho.

De modo geral, os maiores teores de P nas frações Pi, Po e P res foram observados nos tratamentos com a aplicação da adubação fosfatada todos os anos (Tabelas 8 e 9). Os teores médios de Pi foram superiores ao Po na área de resteva

de milho (Tabela 8), 82 mg kg<sup>-1</sup> de Pi o que representou 38% do P total e 63 mg kg<sup>-1</sup> de Po, representando 30% do P total. Na área de resteva de soja (Tabela 9) os teores médios de Pi e Po foram semelhantes, 83 mg kg<sup>-1</sup> de Pi e 81 mg kg<sup>-1</sup> de Po, o que correspondeu a 37% e 36% do P total, respectivamente.

**Tabela 8.** Fósforo inorgânico (Pi), fósforo orgânico (Po), fósforo residual (P res) e fósforo total (P total) (mg kg<sup>-1</sup>) em três profundidades de um Planossolo em função de fontes de adubação fosfatada (Superfosfato Triplo - SFT e Fosfato Natural reativo de Arad - FNA) em resteva de milho no sistema plantio direto, sem e com reaplicação do adubo fosfatado (S/Reap. e C/Reap.).

Fonte	Profundidade (cm)					
	0-2,5		2,5-5,0		5,0-15,0	
	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.
Pi total -----						
Testemunha	61,2*		53,0*		47,4*	
SFT	82,1Ab	173,2Aa	66,3Ab	95,2Aa	56,5Ab	67,0Aa
FNA	76,5Ab	148,3Aa	62,2Ab	96,5Aa	60,9Ab	77,3Aa
Po total -----						
Testemunha	72,2*		73,0 <sup>ns</sup>		69,2 <sup>ns</sup>	
SFT	72,6Ab	87,1Aa	62,5Ab	76,8Aa	62,5Aa	72,6Aa
FNA	73,2Ab	97,7Aa	70,1Ab	77,9Aa	63,2Aa	66,9Aa
P res -----						
Testemunha	51,7*		52,9 <sup>ns</sup>		53,8 <sup>ns</sup>	
SFT	59,0Ab	68,4Aa	54,4Aa	59,1Aa	55,3Aa	61,3Aa
FNA	54,9Ab	63,8Aa	55,9Aa	58,4Aa	57,5Aa	58,2Aa
P Total -----						
Testemunha	185,0*		178,9*		170,4*	
SFT	213,7Ab	328,7Aa	183,2Ab	231,1Aa	174,2Ab	200,9Aa
FNA	204,6Ab	309,7Aa	188,1Ab	232,8Aa	181,6Ab	202,4Aa

\*Testemunha difere dos demais tratamentos. <sup>ns</sup>Não significativo. Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna e minúsculas na linha dentro de cada profundidade e fração de P diferem estatisticamente pelo teste F < 5 % de probabilidade. Pi: somatório das frações (Pi RTA; Pi bic; Pi hid 0,1 mol L<sup>-1</sup> e 0,5 mol L<sup>-1</sup> e P HCl); Po: somatório das frações (Po bic; Po hid 0,1 mol L<sup>-1</sup> e 0,5 mol L<sup>-1</sup>); P res: fósforo residual; P total: fósforo total. Testemunha - sem aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; SFT - Dose recomendada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de SFT sem e com reaplicação anual; FNA - Dose recomendada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de FN de Arad sem e com reaplicação anual com SFT.

A fração residual de fósforo (P res), que engloba as formas inorgânicas e orgânicas de P mais fortemente adsorvidas, apresentou teores de P menores do que as frações Pi e Po (Tabelas 8 e 9). Em termos médios a fração residual correspondeu a um pouco menos de um terço do P total. Teores de P superiores nesta fração foram observados por Golçalves (2007), sendo o P residual a fração que mais participou do P total com valores acima de 80 mg kg<sup>-1</sup>. Santos (2000) observou teores de P residual acima de 200 mg kg<sup>-1</sup> em um Latossolo, sendo que o

autor justifica o fato de ser um solo com mais de 70% de argila e predominância de caulinita e óxidos de ferro. O Planossolo em estudo apresentou apenas 20% de argila (Tabela 1) e isso contribuiu para a menor adsorção de P nessa fração.

Houve uma tendência de diminuição das formas inorgânicas com o aumento da profundidade (Tabelas 8 e 9), o que pode ter sido causado pela aplicação da adubação na superfície do solo, pelo retorno do P absorvido pelas culturas através da deposição dos resíduos vegetais, e/ou pela baixa mobilidade do P no solo.

Observa-se que os tratamentos com reaplicação anual de fósforo também foram superiores aos demais tratamentos contribuindo com os maiores valores de P total (Tabelas 8 e 9).

**Tabela 9.** Fósforo inorgânico (Pi), fósforo orgânico (Po), fósforo residual (P res) e fósforo total (P total) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) em três profundidades de um Planossolo em função de fontes de adubação fosfatada (Superfosfato Tripla - SFT e Fosfato Natural reativo de Arad - FNA) em resteva de soja no sistema plantio direto, sem e com reaplicação do adubo fosfatado (S/Reap. e C/Reap.).

Fonte	Profundidade (cm)					
	0-2,5		2,5-5,0		5,0-15,0	
	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.	S/Reap.	C/Reap.
-----						
Testemunha	72,5*		62,2*		57,9*	
SFT	80,4Ab	157,9Aa	65,0Ab	105,9Aa	55,1Ab	79,7Aa
FNA	80,3Ab	131,0Ba	68,8Ab	95,8Aa	62,2Ab	69,9Aa
-----						
Testemunha	80,2*		68,7 <sup>ns</sup>		63,9 <sup>ns</sup>	
SFT	94,9Ab	114,0Aa	80,3Aa	85,4Aa	76,3Aa	72,1Aa
FNA	81,0Ab	108,5Aa	71,8Aa	83,7Aa	62,5Aa	68,0Aa
-----						
Testemunha	53,7*		55,1 <sup>ns</sup>		53,8 <sup>ns</sup>	
SFT	57,9Ab	68,3Aa	53,8Aa	62,5Aa	55,3Aa	61,3Aa
FNA	58,3Ab	66,0Aa	59,0Aa	58,2Aa	57,5Aa	58,2Aa
-----						
Testemunha	206,4*		186,0*		175,6*	
SFT	233,1Ab	340,2Aa	199,1Ab	253,8Aa	186,7Ab	213,0Aa
FNA	219,6Bb	305,5Ba	199,5Ab	237,6Aa	182,2Ab	196,2Aa

\*Testemunha difere dos demais tratamentos. <sup>ns</sup>Não significativo. Médias seguidas de letras maiúsculas distintas na coluna e minúsculas na linha dentro de cada profundidade e fração de P diferem estatisticamente pelo teste  $F < 5\%$  de probabilidade. Pi: somatório das frações (Pi RTA; Pi bic; Pi hid 0,1 mol L<sup>-1</sup> e 0,5 mol L<sup>-1</sup> e P HCl); Po: somatório das frações (Po bic; Po hid 0,1 mol L<sup>-1</sup> e 0,5 mol L<sup>-1</sup>); P res: fósforo residual; P total: fósforo total. Testemunha - sem aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; SFT - Dose recomendada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de SFT sem e com reaplicação anual; FNA - Dose recomendada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de FN de Arad sem e com reaplicação anual com SFT.

De acordo com uma classificação arbitrária estabelecida para solos do RS por Machado et al. (1993) quanto ao teor de P total, no presente trabalho o P total se encontra um pouco superior a 500 mg kg<sup>-1</sup> considerando-se a soma das três profundidades avaliadas (Tabelas 8 e 9) no tratamento testemunha (sem aplicação da adubação) o que o classificaria como médio conteúdo de P total.

Apesar das leguminosas apresentarem maior absorção de cálcio e, portanto maior acidificação da rizosfera promovendo maior dissolução dos fosfatos naturais quando comparadas às gramíneas (NOVAIS e SMYTH, 1999), nesse estudo pode-se verificar que não houve grandes variações entre as frações de P obtidas na área de resteva de soja em relação à de milho, apesar da adubação recomendada para a soja ser superior a do milho em 10 kg ha<sup>-1</sup>.

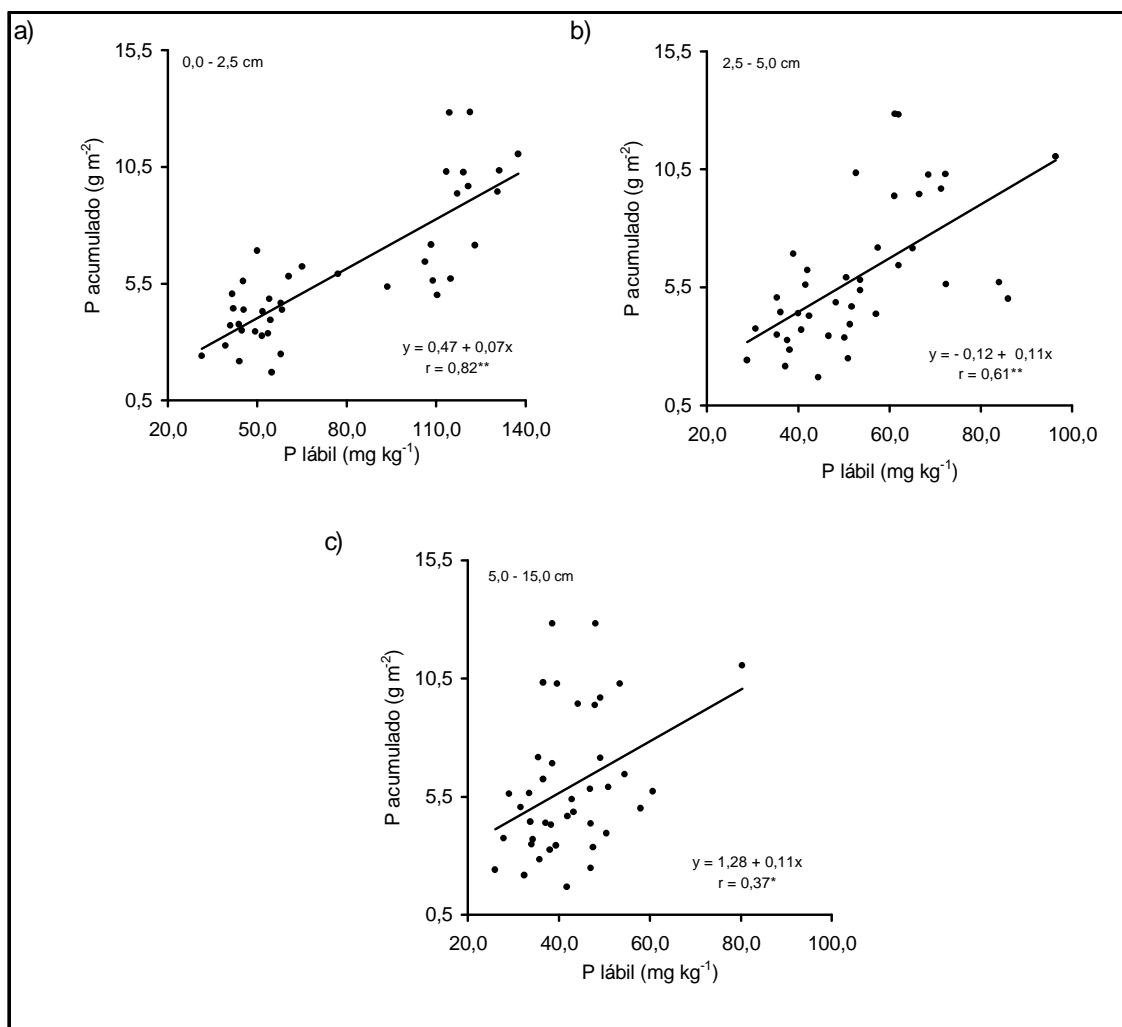
### **Contribuição das formas de fósforo do solo para as plantas de arroz**

Foram observadas correlações entre o fósforo acumulado na parte aérea das plantas (colmo, folhas e grãos) e a fração considerada lábil de P no solo (composta pela soma do P RTA e P bic), independente da resteva presente na área (Figura 1). A labilidade da fração NaHCO<sub>3</sub> é relatada por muitos pesquisadores, indicando que os teores extraídos pela RTA não representam todo fósforo disponível do solo (TIESSEN et al.; 1984; CROSS e SCHLESINGER, 1995; GUO e YOST; 1998; GATIBONI et al., 2005).

O maior coeficiente de correlação foi observado na profundidade de 0 - 2,5 cm (Figura 1). É provável que a melhor correlação observada na camada superficial do solo, seja devido ao acúmulo de fósforo na superfície, ocasionada pelo sistema plantio direto, além da deposição dos restos vegetais das culturas de sequeiro no solo. A aplicação superficial de fósforo sem o revolvimento do solo reduz o contato entre os colóides do solo e o íon fosfato, diminuindo as reações de adsorção (MUZILLI, 1983). A mineralização lenta e gradual dos resíduos orgânicos proporciona a liberação e redistribuição das formas orgânicas de fósforo, mais móveis no solo e menos suscetíveis às reações de adsorção (SANTOS e ANGHINONI, 2003).

Outro aspecto que pode ter contribuído para a melhor correlação do P acumulado com o P lábil na profundidade 0,0 - 2,5 cm está relacionado à maior concentração de raízes do arroz em pequenas profundidades do solo. Lopes (1991)

verificou que no início de diferenciação do primôrdio floral do arroz, 40% das raízes se encontravam até a profundidade de 2,5 cm.



**Figura 1.** Correlação entre o fósforo acumulado na parte aérea das plantas (colmo, folhas e grãos) e o teor de fósforo considerado lábil em três profundidades (a: 0,0 - 2,5 cm; b: 2,5 - 5,0 cm; c: 5,0 - 15,0 cm), resultante da soma dos teores de fósforo extraídos pela resina de troca aniónica (RTA) e  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  nas áreas de resteva de milho e soja em sistema plantio direto em função da adubação fosfatada. \*\*Significativo a <1% de probabilidade. \*Significativo a < 5% de probabilidade.

Como o maior coeficiente de correlação foi observado na profundidade de 0,0 - 2,5 cm (Figura 1) foram realizadas correlações entre as diferentes frações de P inorgânico para esta profundidade, incluindo as frações de menor labilidade (Figuras 2, 3 e 4). Foram observadas correlações entre o fósforo acumulado nas plantas e as

frações de P no solo consideradas lábil (Figura 2a e 2b) e moderadamente lábil (Figura 2c) quando a adubação foi reaplicada anualmente. HUGUENIN-ELIE et al. (2003) observaram que 10% do fósforo acumulado pelas plantas foram oriundos da fração considerada lábil (P RTA, Pi bic e Po bic). Quando não foi realizada adubação fosfatada ou quando foi realizada apenas a recomendada sem reaplicação anual de P, não foram observadas correlações entre as frações de P extraídas pelos diferentes extractores e o P acumulado nas plantas (Figuras 3 e 4).

Esse resultado não era esperado, pois os teores se mantiveram altos nas frações P RTA e P bic (Tabelas 4 e 5) mesmo após a exportação pelas culturas de sequeiro e as alterações nas formas de P no solo são dependentes da quantidade adicionada, da exportação pelos grãos e das transformações químicas no solo.

Os coeficientes de correlação entre o P acumulado pelas plantas e as frações foram semelhantes (Figura 2), porém o maior coeficiente de correlação ( $r = 0,64$ ) foi observado com o P extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>. Gonçalves (2007) observou coeficientes de correlação de 0,73 entre o P acumulado nas plantas de arroz e as frações de P extraídas por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e NaHCO<sub>3</sub>, e para a fração extraída pela resina de troca aniônica o coeficiente de correlação foi de 0,94. Enquanto que Mariano et al. (2002) observou  $r = 0,95$  entre o P acumulado pelo arroz e o P extraído por NaHCO<sub>3</sub> para um grupo de quatro solos de várzea, porém esses dois autores realizaram experimentos em vaso, o que pode justificar a melhor correlação por eles observada, pois nestes casos, a variabilidade é menor.

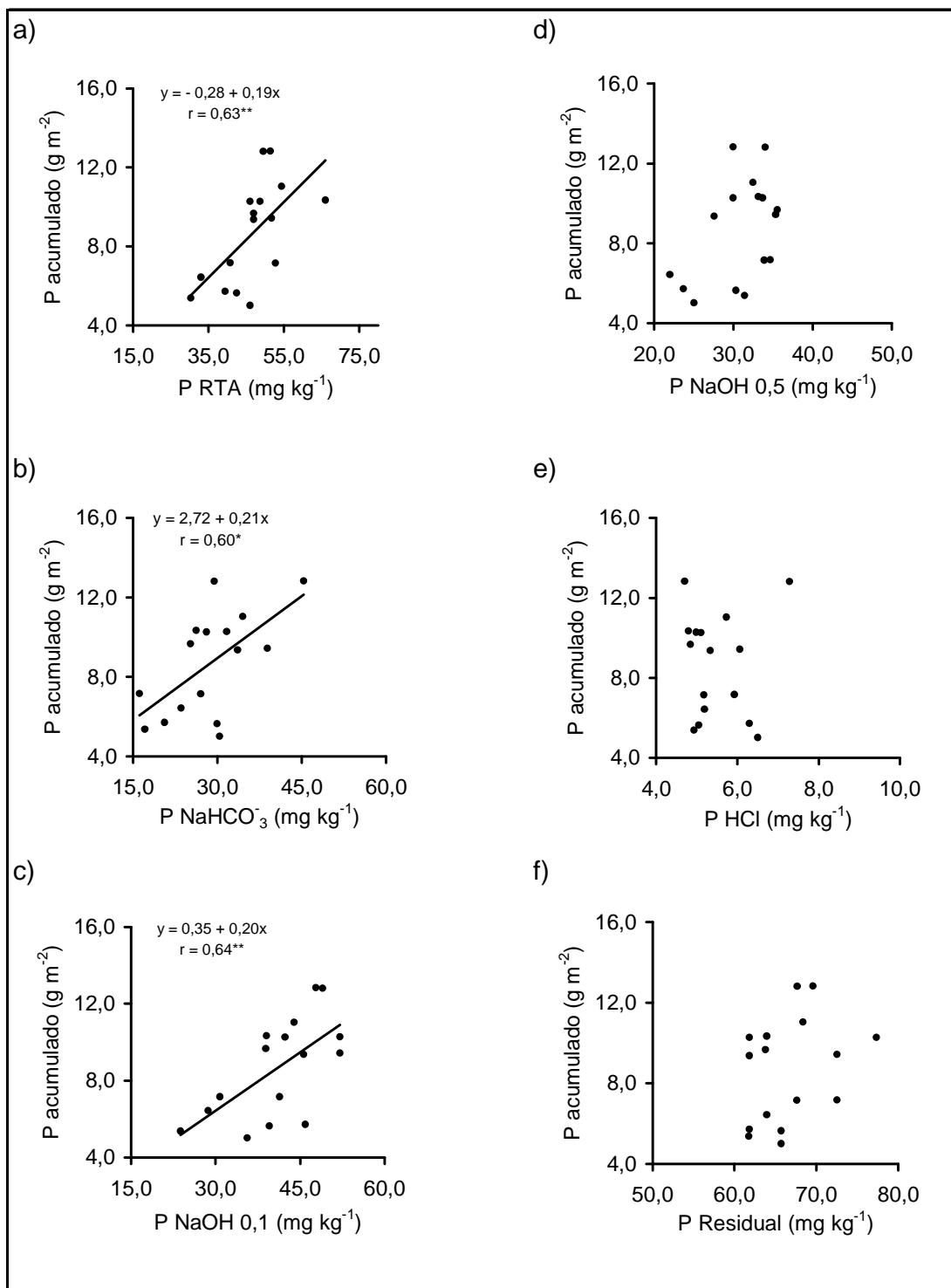
Correlações entre o fósforo acumulado pelas plantas de arroz e a fração de fósforo lábil e moderadamente lábil Pi hid 0,1 mol L<sup>-1</sup> também foram observadas por Saleque et al. (2004). Pheav et al. (2005) observaram que as sucessões de cultivos de arroz provocaram a diminuição das frações consideradas lábil, moderadamente lábil e não lábil, sugerindo que, sob condições de alagamento, todas as frações de fósforo fornecem fósforo indiretamente ou diretamente às plantas.

No presente estudo, além das plantas absorverem as formas ditas lábeis (P RTA e P bic), também houve contribuição da fração (P hid 0,1 mol L<sup>-1</sup>) que inclui o P adsorvido aos óxidos de ferro (Figura 2c). Ranno et al. (2007) realizaram o fracionamento de fósforo pelo Método de Chang e Jackson (1957) em onze solos de várzea submetidos à cultura de arroz irrigado e observaram que a fração predominante foi a de fósforo ligado aos óxidos de ferro, que corresponde a fração extraída com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>. Como este elemento é reduzido durante o

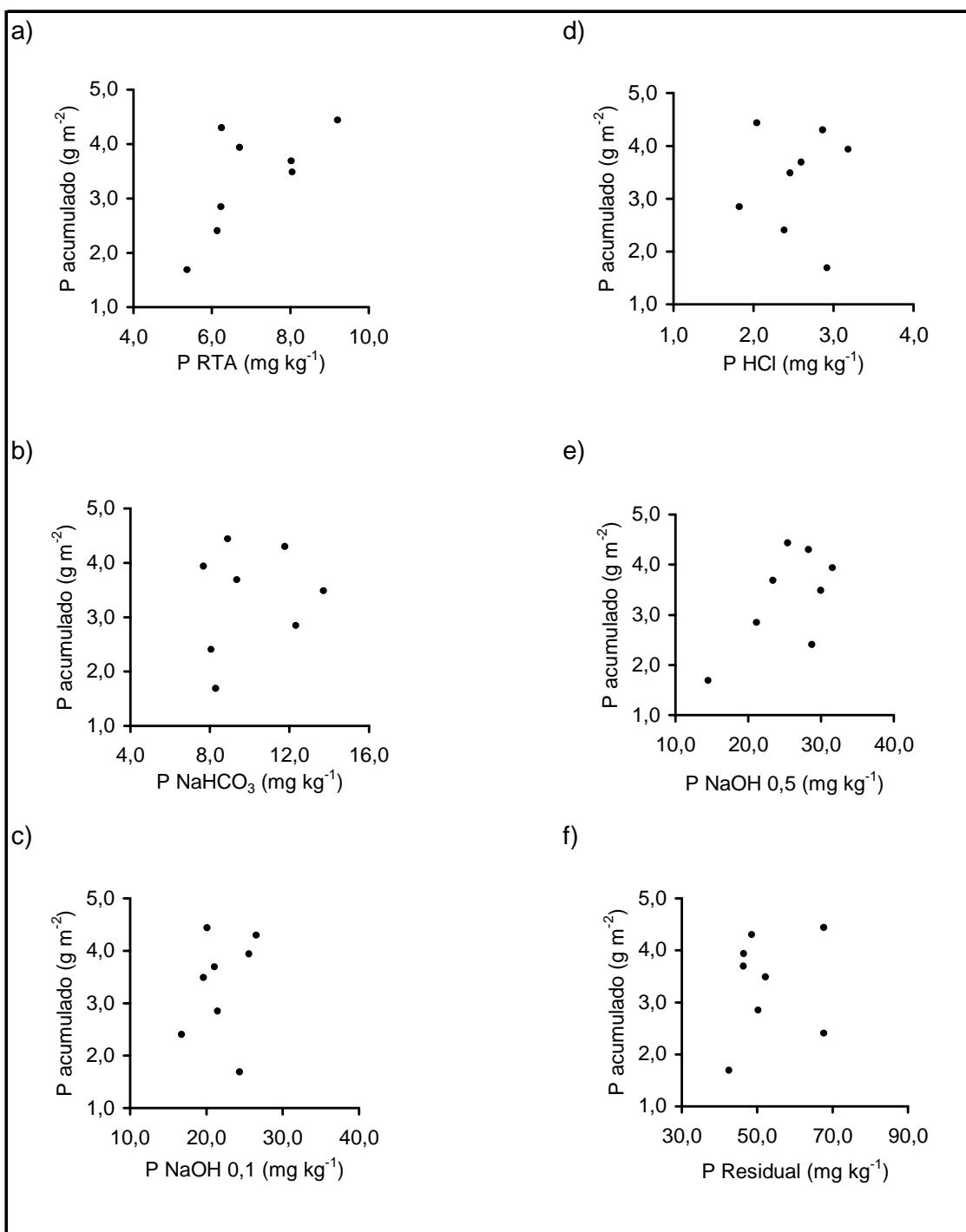
alagamento, uma fração significativa dos óxidos e dos fosfatos de ferro é solubilizada, provavelmente, aumentando a disponibilidade de fósforo para a cultura do arroz irrigado. O fósforo extraído pela resina de troca aniônica e o fósforo extraído pelo NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> foram as formas preferencialmente absorvidas pelas plantas de arroz, em solos submetidos a vários cultivos (PHEAV et al., 2005).

A ausência de correlação entre o P acumulado nas plantas e as demais frações (Figuras 2d; 2e; e 2f), ditas não lábeis em solos oxidados, pode ter ocorrido pelo tamponamento do P na solução pelas frações lábeis e moderadamente lábeis, ou seja, as quantidades de P na solução durante o alagamento do solo foram suficientes para a absorção pelas plantas. Mariano et al. (2002) observou coeficientes de correlação acima de 0,90 entre P hid 0,5 mol L<sup>-1</sup>, P HCl, P residual e o P acumulado pelas plantas em quatro solos de várzea em experimento em vaso.

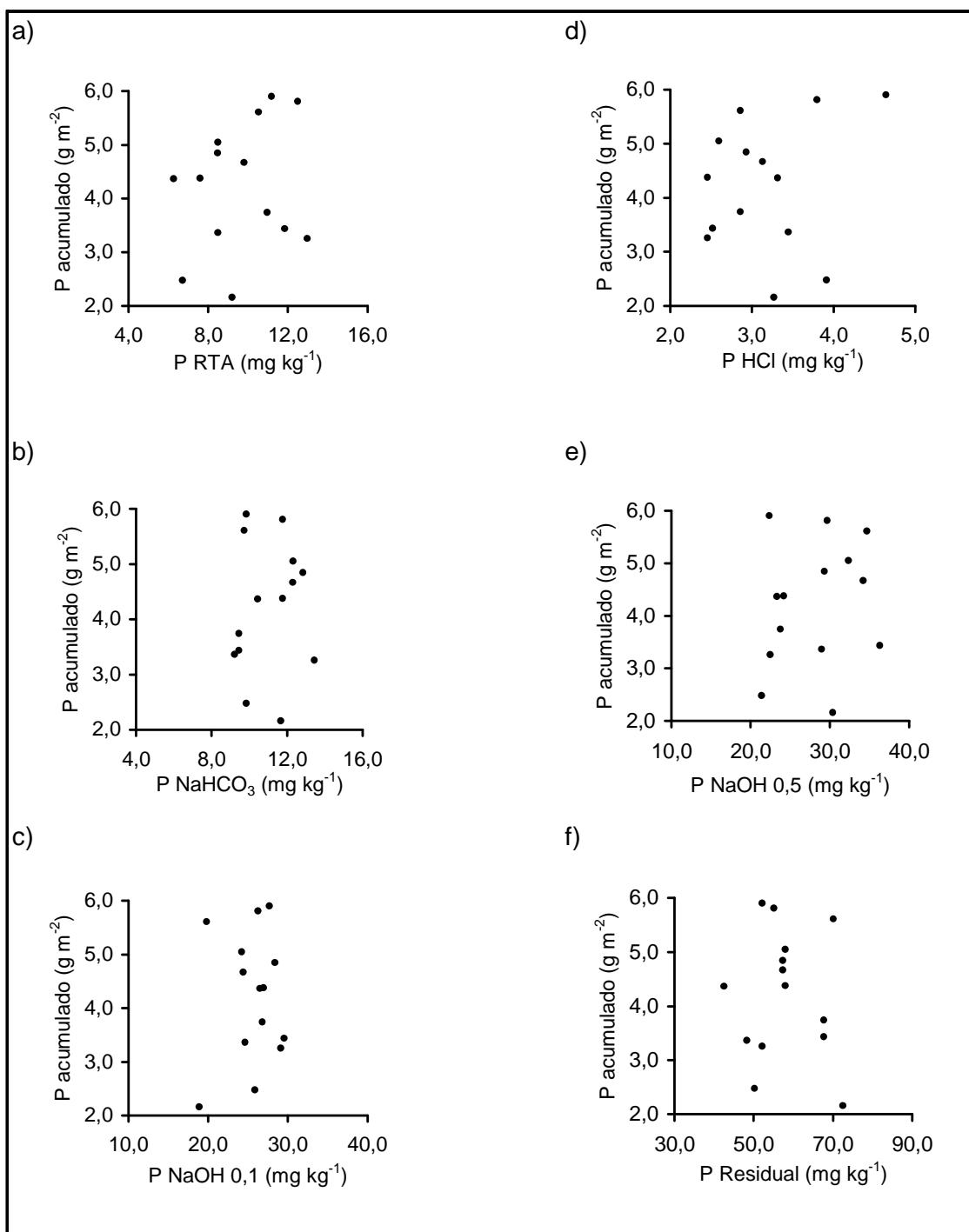
Estudo realizado por Ranno et al. (2007) utilizando o fracionamento de Chang e Jackson (1957) em solos de várzea com a presença de arroz irrigado observou que o teor de P ocluso diminuiu após o alagamento do solo, indicando que parte dessa fração de P participou da absorção pelas plantas.



**Figura 2.** Correlações entre o fósforo acumulado na parte aérea das plantas (colmo, folhas e grãos) e o teor de fósforo inorgânico na camada 0 - 2,5 cm extraído por resina de troca aniônica - RTA (a),  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (b),  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  (c),  $\text{HCl}$  (d),  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  e P Residual nas áreas de resteva de milho e soja em sistema plantio direto com reaplicação anual da adubação fosfatada. \*\*Significativo a <1% de probabilidade. \*Significativo a < 5% de probabilidade.



**Figura 3.** Correlações entre o fósforo acumulado nas plantas (colmo, folhas e grãos) e o teor de fósforo inorgânico na camada 0 - 2,5 cm extraído por resina de troca aniónica - RTA (a),  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (b),  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  (c), HCl (d),  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  e P Residual nas áreas de resteva de milho e soja em sistema plantio direto na ausência da adubação fosfatada.



**Figura 4.** Correlações entre o fósforo acumulado na parte aérea das plantas (colmo, folhas e grãos) e o teor de fósforo inorgânico na camada 0,0 - 2,5 cm extraído por resina de troca aniónica - RTA (a),  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (b),  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  (c), HCl (d),  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  e P Residual nas áreas de resteva de milho e soja em sistema plantio direto com adubação fosfatada sem reaplicação anual.

## CONCLUSÕES

As frações de fósforo inorgânico que predominam em um Planossolo cultivado com as culturas de milho e soja em sistema plantio direto são as extraídas com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>.

As adubações realizadas anualmente com superfosfato triplo e fosfato natural de Arad aumentaram todas as frações inorgânicas de fósforo no solo, desde as mais lábeis até as menos lábeis. As frações orgânicas apresentam-se pouco sensíveis à adubação fosfatada.

As quantidades de fósforo acumuladas na parte aérea das plantas de arroz melhor se correlacionaram com as frações de fósforo mais lábeis (RTA, NaHCO<sub>3</sub> e NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>), principalmente na profundidade de 0,0 - 2,5 cm.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, M.S.; SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.643-650, 1997.
- BARROW, N.J.; A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.34, p.733-750, 1983.
- BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, New York, v.32, p.671-674, 1981.
- CHANG, S.C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v.84, p.133-144, 1957.
- CONDRON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.36, p.199-207, 1985.
- CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v.27, p.893-900, 2003.
- CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v.64, p.197-214, 1995.
- DICK, W.A.; TABATABAI, M.A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, v.6, p.82-85, 1977
- FERREIRA, L.H.G.; GOMES, A. da S.; SCIVITTARO, W.B.; PEREIRA, R.S.D.; WINKLER, A.S.; CHIARELO, C. **Efeito imediato e residual da adubação fosfatada na cultura do arroz irrigado por inundação, sobre a produtividade de grãos de arroz**. In: V Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, XXVII Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, 2007. Anais. Pelotas, v.1, p.528-531.
- GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 213f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.

- GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; FLORES, J.P.C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.691-699, 2007.
- GATIBONI, L.C.; SANTOS, D.R. dos.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Phosphorus Forms and Availability Assessed by  $^{31}\text{P}$ -NMR in Successive Cropped Soil. **Communications in Soil Science and Plant Analisys**, New York, v.36, p.2625-2640, 2005.
- GILLESPIE, A.R.; POPPE, P.E. Rhizosphere acidification increase phosphorus recovery Black Locust: I. Induced acidification and soil response. **Soil science Society of American Journal**, Madson, v.54, p.533-537, 1990.
- GOMES, A. da S.; FERREIRA, L.H.G.; BENDER, R.R. **Uso de fosfato natural no cultivo de arroz, soja e milho em rotação, no sistema plantio direto**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005. 35p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n.20).
- GOMES, A.S. da; FERREIRA, L.H.; VERNETTI, F. J.; GOMES, D.N.; GONÇALVES, G.K. Efeitos imediato e residual da adubação fosfatada no rendimento de milho em solo de várzea sob plantio direto. **XXVIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Londrina, 2001. p.171.
- GONÇALVES, G.K. **Formas e disponibilidade de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. 2007. 186f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- GUO, F.; YOST, R.S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, Baltimore, v.163, p.822-833, 1998.
- HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7 ed. New Jersey: Pearson, 2005. 515 p.
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.46, p.970-976, 1982.
- HUGUENIN-ELIE, O.; KIRK, G.J.D.; FROSSARD, E. Phosphorus uptake by rice from soil that is flooded, drained or flooded then drained. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.54, p. 77-90, 2003.

- LINDSAY, W.L.; MORENO, E.C. Phosphate phase equilibrium in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v.24, p.177-182, 1960.
- LOPES, S.I.G. **Eficiência da adubação potássica e distribuição radicular do arroz irrigado**. 1991. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MACHADO, A. **Winstat - Sistema de análises estatísticas para o Windows**. Versão 1.0, Pelotas : NIA – Núcleo de Informática Aplicada, Universidade Federal de Pelotas, 2001, CD-ROM.
- MACHADO, M.I.C.; BRAUNER, J.L.; VIANNA, A.C.T. Formas de fósforo na camada arável de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.3, p.331-336, 1993.
- MARIANO, I.O.S.; FERNANDES, L.A.; FAQUIN, V.; ANDRADE, T.A. Phosphorus critical levels and availability in lowland soils cultivated with flooded rice. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, p.113-120, 2002.
- MURPHY, J.; RILLEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, v.27, p.31-36, 1962.
- MUZILLI, O. Influência do sistema plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 7, p.95-102, 1983.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. 1. ed. Viçosa - MG, 1999. 399p.
- PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, New York, v.30, p.1-50, 1978.
- PHEAV, S.; BELL, R.W.; KIRK, G.J.D.; WHITE, P.F. Phosphorus cycling in rainfed lowland rice ecosystems on sandy soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.269, p.89-98, 2005.
- PIERZYNSKI, G.M.; McDOWEL, R.W.; SIMS, J.T. Chemistry, Cicling, and Potential Movement of Inorganic Phosphorus: Agriculture and the Environment Agronomy Monograph. n.46. 2005. 53-86p.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.24, p.29-96, 1972.
- RAIJ, B. Van. **Fertilidade do Solo e adubação**. Ed. Ceres. 1991. 343p.
- RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, J.H.; SINCLAIR, A.G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.57, p.77-157, 1996.

- RANNO, S.K.; SILVA, L.S.; MALLMANN, F.J.K. Fracionamento do fósforo inorgânico em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira Agrociência**, Pelotas, v.13, n.1, p.47-54, 2007.
- RHEINHEIMER, D.S. ANGHINONI, I; CONTE, E. Fósforo da biomassa em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.3, p.589-597, 2000a.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.24, p.345-354, 2000.
- SALEQUE, M.A.; NAHER, U.A.; ISLAM, A.; PATHAN, A.B.M.B.U.; HOSSAIN, A.T.M.S.; MEISNER, C.A. Inorganic and organic phosphorus fertilizer effects on the phosphorus fractionation in wetland rice soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, p.1635-1644, 2004.
- SANTOS, D.R. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SANTOS, D.R.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.34, n.15/16, p.2339-2354, 2003.
- SANTOS, D.R.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.24, p.345-354, 2000.
- SANTOS, J.Z.L.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A.V.; CURI, N.; CARNEIRO, L.F.; COSTA, S.E.V.G.A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.32, p.705-714, 2008.
- SILVA, L.S.; RANNO, S.K.; RHODEN, C.; SANTOS, D.R.; GRAUPE, A. Avaliação de métodos para estimativa da disponibilidade de fósforo para arroz em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.207-216, 2008.

- SIMS, J.T; PIERZYUSKI, G.M. Chemistry of Phosphorus in Soils. In: TABATABAI, M.A.; SPARKS, D.L. **Chemical Processes in Soils**. Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America, Inc. 2005. p.151-192.
- STEWART, J.W.B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, Netherlands, v.4, p.41-60, 1987.
- STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. As principais classes de solos identificadas no Rio Grande do Sul. In: **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. revista e ampliada. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR. 2008. 222p.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLK WEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. revista e ampliada. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS. 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, n.5).
- TIESSEN, H.; STEWART, W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of American Jornal**, Madison, v.48, p.853-858, 1984.
- TISDALE, L.S.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Lehigh Press, 1993. 633p.
- TOKURA, A.M.; NETO, A.E.F.; CURI, N.; FAQUIN, V. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p.1467-1476, 2002.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Métodos of chemical analysis for water and wastes. Cincinnati, 1971. 312p.
- ZHANG, T.K.; MACKENZIE, A.F. Changes of soil phosphorus fractions under long-term corn monoculture. **Soil Science of American Journal**, Madison, v.61, p.485-493, 1997.
- ZIMMERMANN, F.J.P. **Estatística aplicada à pesquisa agrícola**. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, 2004. 402p.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Apesar de o fósforo ser um nutriente muito estudado em diversos tipos de solos, muitos aspectos relacionados à dinâmica do elemento em solos alagados ainda precisam ser melhor entendidos, pois o comportamento desse elemento nesses ambientes é muito complexo. Os ciclos de umedecimento e secagem em que os solos de várzeas são submetidos alteram a labilidade das formas de fósforo, fazendo com que haja um aumento nas quantidades de fósforo disponível durante o período de alagamento e uma diminuição na disponibilidade do fósforo no período de secagem devido à interação do elemento com os óxidos de ferro que são precipitados no solo oxidado.

As diferenças na labilidade do fósforo no ambiente de sequeiro em relação ao alagado fazem com que os métodos tradicionais de análises de fósforo no solo apresentem limitações para a previsão da disponibilidade desse nutriente, pois as plantas de arroz crescem em ambiente alagado e o solo é analisado seco. Assim, os métodos de extração de fósforo Mehlich-1 e resina de troca aniônica apresentam um desempenho apenas razoável na predição do fósforo disponível para o arroz em solos alagados, sendo que não se observa diferenças muito expressivas no desempenho desses dois métodos.

Não foram observadas respostas das plantas de arroz em termos de rendimento de grãos mesmo os teores de fósforo no solo apresentando-se bem abaixo do nível crítico pelo método Mehlich-1, que é de  $6,0 \text{ mg dm}^{-3}$ . É comum a ocorrência de baixa resposta do arroz à adubação fosfatada, principalmente em Planossolos. Assim, em muitas situações a adubação do arroz com fósforo é realizada para manter os teores de fósforo em níveis adequados. Quando o arroz é cultivado após culturas de sequeiro adequadamente adubadas, a adubação fosfatada pode ser significativamente diminuída ou até mesmo não realizada, pois o arroz irá beneficiar-se do residual da adubação fosfatada, que normalmente será suficiente para suprir as necessidades da cultura.

Nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o método da resina de troca aniônica é recomendado para áreas adubadas com fosfato natural, uma vez

que o extrator Mehlich-1 dissolve partículas do fosfato natural ainda não solubilizadas no solo, superestimando os teores de fósforo disponível. Todavia, os experimentos realizados em solos alagados adubados com fosfato natural não têm indicado a ocorrência de superestimação dos teores de fósforo no solo pelo Mehlich-1. É possível que durante a extração, o fósforo dissolvido pelos extratores ácidos seja adsorvido aos óxidos de ferro impedindo que os teores de fósforo disponível sejam superestimados. No presente estudo observou-se valores muito altos de fósforo no solo extraído com a resina de troca aniônica, principalmente nas parcelas adubadas com fosfato natural, indicando uma possível superestimação dos valores de fósforo disponível no solo, o que discorda de resultados obtidos em outros tipos de solos. Este é um aspecto que precisa ser melhor esclarecido em trabalhos futuros.

O fracionamento do fósforo no solo demonstrou que as frações inorgânicas foram todas afetadas pela adubação, desde as frações mais lábeis até as menos lábeis, e as frações de fósforo orgânico foram pouco afetadas pela adubação fosfatada. Dentre as frações inorgânicas de fósforo no Planossolo cultivado com milho e soja em plantio direto houve um predomínio das extraídas com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>, que representam frações moderadamente lábil e não lábil, respectivamente. Tais frações, embora consideradas menos lábeis, poderiam suprir fósforo ao arroz irrigado durante o alagamento, devido ao processo de redução biológica do ferro e sua solubilização, que acaba disponibilizando o fósforo associado ao ferro. No entanto, as frações de fósforo mais lábeis, principalmente na profundidade de 0,0 - 2,5 cm foram as que melhor se correlacionaram com o fósforo acumulado nas plantas de arroz, o que pode estar relacionado à adubação fosfatada ter se concentrado na superfície que é característico do sistema plantio direto.

É provável que no sistema convencional em que o adubo é misturado ao solo a cada cultivo, o comportamento do fósforo nas diferentes frações seja diferente. Assim a comparação das diferentes frações de fósforo entre sistemas de cultivo em solos de várzea cultivados com arroz irrigado é uma proposta de trabalho futuro bastante interessante.

Comparações entre as diferentes frações de fósforo antes do cultivo do arroz e após o cultivo do arroz poderiam ajudar a entender o comportamento do fósforo em solos alagados, e fornecer subsídios para um refinamento das recomendações de adubação para o arroz irrigado e culturas de sequeiro utilizadas em sucessão.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMER, F.; BOUDIN, D. R.; BLACK, C. A. et al. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P<sup>32</sup> equilibration. **Plant and Soil**. The Hague, v.6, p.391-408, 1955.
- ANGHINONI, I. Adubação fosfatada e potássica em plantio direto. In: FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2006. p.87-104.
- ARAÚJO, M.S.; SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.643-650, 1997.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient Bioavailability; a mechanistic Approach**. New York; J. Wiley, 1984.398p.
- BARROW, N.J.; A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.34, p.733-750, 1983.
- BAYER, C. **Características do solo e nutrição e rendimento de milho afetados por métodos de preparo de solo**. Porto Alegre, 1993. 172f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- BECK, M.A.; SANCHES, P.A. Soil phosphorus fraction dynamic during 18 years of cultivation on a typic paleudult. **Soil Science**, Baltimore, v.34, p.1424-1431, 1994.
- BORTOLON, L. **Métodos de avaliação da disponibilidade de nutrientes para as plantas em solos do Rio Grande do Sul**. 2005. 129f. Tese (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal of Science Food Agriculture**, New York, v.32, p.671-674, 1981.

- CARDOSO, E.F. **Adubação fosfatada para o arroz irrigado em solos com diferentes capacidades de adsorção de fósforo.** 2007. 82f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- CERETTA, C.A. Adubação em sistemas de cultura no plantio direto. In: FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto.** Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2006. p.117-134.
- CHANG, S.C. Evolution of the fertility of rice soils. In: International Ricer Research Institute. **Soil and Rice.** Los Banös: International Research Institute, p.521-541, 1978.
- CHANG, S.C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science,** Baltimore, v.84, p.133-144, 1957.
- CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.; LEON, L.A. Long-term reactions of phosphate rocks with an oxisol in Colombia. **Soil Science,** Baltimore, v.144, p.257-265, 1987.
- COELHO, A. M.; ALVES, V. M. C. **Resposta do milho à adubação fosfatada, níveis críticos de P no solo e doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> recomendados.** Simpósio sobre fósforo na agricultura brasileira. São Paulo-SP. 2003. (CD-Rom).
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC - SBCS/NRS. **Manual de adubação e calagem para os Estados do RS e de SC /** Sociedade Brasileira de Ciência do solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. -10. ed. – Porto Alegre, 2004. 224p.
- CONDRON, L.M.; FROSSARD, E.; TIESSEN, H.; NEWMAN, R.H.; STEWART, J.W.R. Chemical nature of organic phosphorus in cultivated and uncultivated soils under different environmental conditions. **Journal of Soil Science,** Oxford, v.41, p.41-51, 1990.
- CONDRON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science,** Oxford, v.36, p.199-207, 1985.
- CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo,** Campinas, v.27, p.893-900, 2003.

- CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v.64, p.197-214, 1995.
- DALAL, R.C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.29,
- DICK, W.A.; TABATABAI, M.A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, v.6, p.82-85, 1977.
- DOBERMANN, A.; FAIRHURST, T. **Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management**. International Rice Research Institute (IRRI), Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC), 2000. CD-ROM.
- EDMEADES, D.C.; WATKINSON, J.H.; PERROT, K.W.; SINCLAIR, A.G. Comparing the agronomic performance of soluble and slow release phosphate fertilizers: the experimental basis for RPR recommendations. **New Zealand Grassland Association**, v. 53, p.181-190, 1991.
- FABRES, R.T. **Efeito residual de adubação fosfatada aplicada no azevém sobre a cultura do arroz subsequente em plantio direto**. Pelotas, 1998. 39f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- FARIAS, M.O. **Efeito da adubação com fósforo e potássio na toxidez de ferro em arroz irrigado**. Pelotas, 2007. 43f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V.; NETO, A. E. F.; CURI, N. Formas de fósforo em solos de várzea e biodisponibilidade para o feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.37, n.3, p.373-383, 2002.
- FERREIRA, L.H.G.; GOMES, A. da S.; SCIVITTARO, W.B.; PEREIRA, R.S.D.; WINKLER, A.S.; CHIARELO, C. **Efeito imediato e residual da adubação fosfatada na cultura do arroz irrigado por inundação, sobre a produtividade de grãos de arroz**. In: V Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, XXVII Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, 2007. Anais. Pelotas, v.1, p.528-531.
- GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 213f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.

- GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; FLORES, J.P.C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.691-699, 2007.
- GATIBONI, L.C.; SANTOS, D.R. dos.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Phosphorus Forms and Availability Assessed by  $^{31}\text{P}$ -NMR in Successive Cropped Soil. **Communications in Soil Science and Plant Analisys**, New York, v.36, p.2625-2640, 2005.
- GILLESPIE, A.R.; POPPE, P.E. Rhizosphere acidification increase phosphorus recovery Black Locust: I. Induced acidification and soil response. **Soil science Society of American Journal**, Madson, v.54, p.533-537, 1990.
- GOEPFERT, C.F.; TEDESCO, A. Efeito de fontes, níveis de fósforo e granulometria de fosfatos naturais sobre o rendimento de grãos de colza e de soja. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.22, p.53-59, 1986.
- GOMES, A. da S.; FERREIRA, L.H.G.; BENDER, R.R. **Uso de fosfato natural no cultivo de arroz, soja e milho em rotação, no sistema plantio direto**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005. 35p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n.20).
- GOMES, A.S. da; FERREIRA, L.H.; VERNETTI, F. J.; GOMES, D.N.; GONÇALVES, G.K. Efeitos imediato e residual da adubação fosfatada no rendimento de milho em solo de várzea sob plantio direto. **XXVIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Londrina, 2001. p.171.
- GOMES, A.S.; FERREIRA, L.H.; SCIVITTARO, W.B. Uso de fosfato natural no arroz irrigado cultivado em rotação de culturas, no sistema plantio direto. **Comunicado técnico**, 152p. 2006.
- GONÇALVES, G.K. **Formas e disponibilidade de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. 2007. 186f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- GONÇALVES, G.K. **Solubilização de fosfatos naturais em solos alagados**. Pelotas, 2003. 49f. Dissertação (Mestrado em Solos) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

- GONÇALVES, G.K.; MEURER, E.J. Disponibilidade de Fósforo em Solos Cultivados com Arroz Irrigado por Alagamento no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2745-2750, 2008, Número Especial.
- GUGGENBERGER, G.; CHRISTENSEN, B.T.; RUBACK, G. Land use and fertilization effects on P forms in two European soil resin extraction and 31 P-RMN analysis. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.47, p.605-614, 1996.
- GUO, F.; YOST, R.S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, Baltimore, v.163, p.822-833, 1998.
- GUO, F.; YOST, R.S.; HUE, N.V.; EVENSEN, C.I.; SILVA, J.A. Changes in phosphorus fractions under intensive plant growth. **Soil Science of America Journal**, Madison, v.64, p.1681-1689, 2000.
- HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7 ed. New Jersey: Pearson, 2005. 515 p.
- HOROWITZ, N. **Eficiência de dois fosfatos naturais afetado pelo tamanho de partícula**. Porto Alegre, 1998. 68f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- HUE, N.V. Effect of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogy. **Soil Science**, Baltimore, v.6, p.463-471, 1991.
- HUGUENIN-ELIE, O.; KIRK, G.J.D.; FROSSARD, E. Phosphorus uptake by rice from soil that is flooded, drained or flooded then drained. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.54, p. 77-90, 2003.
- KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. **Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo**. Santa Maria: NRS-SBCS, 1997. 31p. (Boletim Técnico, 3).
- KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.30, p. 159-206, 1978.
- KROTH, P.L. **Disponibilidade de fósforo no solo para plantas e fatores que afetam a extração por resina de troca em membrana**. 1998. 168f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- LINDSAY, W.L. **Chemical equilibrium in soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979. 449p.

- LINDSAY, W.L.; MORENO, E.C. Phosphate phase equilibrium in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v.24, p.177-182, 1960.
- LOPES, M.S.; BACHA, R.E.; CABRAL, J.T. Efeito da substituição gradativa de fosfato solúvel por fosfato natural sobre o rendimento de grãos de arroz irrigado. In: **Reunião da cultura do arroz**, 12, 1983, Porto Alegre. Anais... Pelotas, RS: Instituto Rio Grandense do Arroz – UPEAE, 1983. p.133-135.
- LOPES, S.I.G. **Eficiência da adubação potássica e distribuição radicular do arroz irrigado**. 1991. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- LOPEZ, A.S.; WIETHOLTER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A.S. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo, ANDA, 2004. 110p.
- MACHADO, A. **Winstat - Sistema de análises estatísticas para o Windows**. Versão 1.0, Pelotas : NIA – Núcleo de Informática Aplicada, Universidade Federal de Pelotas, 2001, CD-ROM.
- MACHADO, M.I.C.; BRAUNER, J.L.; VIANNA, A.C.T. Formas de fósforo na camada arável de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.3, p.331-336, 1993.
- MARIANO, I.O.S.; FERNANDES, L.A.; FAQUIN, V.; ANDRADE, T.A. Phosphorus critical levels and availability in lowland soils cultivated with flooded rice. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, p.113-120, 2002.
- MARSCHNER, H. Root-induced changes in the availability of micronutrients in the rhizosphere. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A. & KAFKAI, U., eds., **Plant roots**. The hidden half. New York, Marcel Dekker, p.503-528, 1991.
- MARWAHA, B.C. Rock phosphates holds the key to productivity in acid soils: a review. **Fertilizer news**, New Dehli, v.34, p.23-29, 1989.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; MORAES, A.L.C. Eficiência de fontes e doses de fósforo na alafafa e centrosema em Latossolo Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p.1459-1466, 2002.
- MURPHY, J.; RILLEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, v.27, p.31-36, 1962.
- MUZILLI, O. Influência do sistema plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 7, p.95-102, 1983.

- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais.** 1. ed. Viçosa - MG, 1999. 399p.
- PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, New York, v.30, p.1-50, 1978.
- PATELLA, J.F. Arroz: adubação fosfatada em solos alagados. **Agrisul**, Pelotas, p. 14-15, 20-32, Setembro, 1965.
- PERUZZO, G. Fosfatos Naturais e plantio direto. In: **Curso sobre aspectos básicos de fertilidade e microbiologia do solo no sistema plantio direto**, Resumos de palestras. Editora Aldeia Norte. Passo Fundo, p.66-75, 1980.
- PHEAV, S.; BELL, R.W.; KIRK, G.J.D.; WHITE, P.F. Phosphorus cycling in rainfed lowland rice ecosystems on sandy soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.269, p.89-98, 2005.
- PIERZYNSKI, G.M.; McDOWEL, R.W.; SIMS, J.T. Chemistry, Cicling, and Potential Movement of Inorganic Phosphorus: Agriculture and the Environment Agronomy Monograph. n.46. 2005. 53-86p.
- PINTO L.F.S.; NETO, J.A.L.; PAULETTO E.A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES JR, A.M. (eds.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil.** 1º ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. p. 75-96.
- POCOJESKI, E. **Estimativa do estado nutricional de arroz irrigado por alagamento.** 2007. 97f. Dissertação (Mestrado em Solos) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.24, p.29-96, 1972.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.24, p.29-96, 1972.
- RAIJ, B. Van. **Fertilidade do Solo e adubação.** Ed. Ceres. 1991. 343p.
- RAIJ, B. Van; QUAGGIO, J.A.; SILVA, M.N. Extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soil by anion-exchange resin procedure. **Science of Plant Analysis**, New York, v.17, p.547-566, 1986.
- RAIJ, B. Van. Métodos de diagnose de fósforo no solo em uso no brasil. In: RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, J.H.; SINCLAIR, A.G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.57, p.77-157, 1996.

- RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, J.H.; SINCLAIR, A.G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.57, p.77-157, 1996.
- RANNO, S.K.; SILVA, L.S.; MALLMANN, F.J.K. Fracionamento do fósforo inorgânico em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira Agrociência**, Pelotas, v.13, n.1, p.47-54, 2007.
- REIN, T.A.; SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Eficiência agronômica do fosfato natural da Carolina do Norte em solo de cerrado. In: **Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas**, 21, 1994, Petrolina. Anais... Petrolina EMBRAPA CPATSA, 1994. p.38-40.
- RHEINHEIMER, D.S. ANGHINONI, I; CONTE, E. Fósforo da biomassa em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.3, p.589-597, 2000a.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.24, p.345-354, 2000.
- RHEINHEIMER, D.S.; CONTE, E.; ANGHINONI, I. Formas de acumulação de fósforo pela aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.893-900, 2003.
- RICHART, A.; LANA, M. do C.; LOIVO, R.S.; BERTOLINI, J.C.; BRACCINI, A.de L. Disponibilidade de fósforo e enxofre para a cultura da soja na presença de fosfato natural reativo, superfosfato triplo e enxofre elementar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.30, p.695-705, 2006.
- RUIZ, J.M.; DELGADO, A.; TORRENT, J. Iron-related phosphorus in overfertilized European soils. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 26, p.1548-1554, 1997.
- SÁ, J.C.M. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S., ed. **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba, POTAPOS, 2004, p.201-222.
- SÁ, J.C.M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIM, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G., eds. **Inter-relações fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/ Universidade Federal de Lavras, 1999. p.267-319.

- SALEQUE, M.A.; NAHER, U.A.; ISLAM, A.; PATHAN, A.B.M.B.U.; HOSSAIN, A.T.M.S.; MEISNER, C.A. Inorganic and organic phosphorus fertilizer effects on the phosphorus fractionation in wetland rice soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, p.1635-1644, 2004.
- SANCHES, P.A.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. **The Role of Phosphorus in Agriculture**, Madison, p.471-516, 1980.
- SANTOS, D.R. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SANTOS, D.R.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.34, n.15/16, p.2339-2354, 2003.
- SANTOS, D.R.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.34, n.15/16, p.2339-2354, 2003.
- SANTOS, D.R.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.24, p.345-354, 2000.
- SANTOS, J.Z.L.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A.V.; CURI, N.; CARNEIRO, L.F.; COSTA, S.E.V.G.A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.32, p.705-714, 2008.
- SELLES, F.; ZENTNER, R.P.; KOCHHANN, R.A.; FAGANELLO, A.; DENARDIN, J.E. Effects of tillage on the forms distribution of P in oxisol in Southern Brasil. In: **International Workshop on Conservation Tillage Systems**, 1990, Passo Fundo. Proceedings. Passo Fundo: EMBRAPA/CNPT, 1990. p.86-95.
- SHERER, C.H., BACHA, R.E. Eficiência de fosfatos naturais na cultura do arroz irrigado. In: **Reunião geral da cultura do arroz irrigado**, 2, 1972, Cachoeirinha. Anais... Porto Alegre RS: Instituto Rio Grandense do Arroz – IPEAS, 1972. p.71-72.
- SILVA, F.C.; RAIJ, B.V. Avaliação da disponibilidade de fósforo por diversos extratores em amostras de solo cultivados com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.83-90, 1996.

SILVA, L.S.; RANNO, S.K.; RHODEN, C.; SANTOS, D.R.; GRAUPE, A. Avaliação de métodos para estimativa da disponibilidade de fósforo para arroz em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.207-216, 2008.

SILVA, W.M.; FABRÍCIO, A.C.; MARCHETTI, M.E.; KURIHARA, C.H.; MAEDA, S.; HERNANI, L.C. Eficiência de extractores de fósforo em dois Latossolos do mato Grosso do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2277-2285, 1999.

SILVA, W.M.; FABRÍCIO, A.C.; MARCHETTI, M.E.; KURIHARA, C.H.; MAEDA, S.; HERNANI, L.C. Eficiência de extractores de fósforo em dois Latossolos do mato Grosso do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2277-2285, 1999.

SIMS, J.T.; JOHSON, G.V. Micronutrient soil test. In: MORTVEDT, J.J; GIORDANO, P.M; LINDSAY, W.L. **Micronutrient in agriculture**, Madison, Wisconsin: SSSA, 1991. p.427-476.

SIMS, J.T; PIERZYUSKI, G.M. Chemistry of Phosphorus in Soils. In: TABATABAI, M.A.; SPARKS, D.L. **Chemical Processes in Soils**. Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America, Inc. 2005. p.151-192.

SKOGEY, O.; DOBERMANN, A. Synthetic ion-exchange resins: soil and environmental studies. **Journal Environmental Quality**, Madison, v.25, p.13-24, 1996.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO, **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI, 2007. 154p.

SOMADO, E.A.; BECKER, M.; KUEHNE, R.F.; SAHRAWAT, K.L.; VLEK, P.L.G. Combined effects of legumes with rock phosphates on rice in West Africa. **Soil Science Society of American Journal**, Madson, v.95, p.1172-1178, 2003.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 277p.

STEVENSON, F.J. **Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. New York, John Wiley & Sons, 1986. 380p.

STEWART, J.W.B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, Netherlands, v.4, p.41-60, 1987.

- STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. As principais classes de solos identificadas no Rio Grande do Sul. In: **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. revista e ampliada. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR. 2008. 222p.
- TATE, K.R.; NEWMAN, R.K. Phosphorus fractions of a climosequence of soils in New Zealand tussock grassland. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.14, p.191-196, 1982.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLK WEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. revista e ampliada. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS. 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, n.5).
- TIESSEN, H.; STEWART, W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of American Jurnal**, Madison, v.48, p.853-858, 1984.
- TISDALE, L.S.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Lehigh Press, 1993. 633p.
- TOKURA, A.M.; NETO, A.E.F.; CURI, N.; FAQUIN, V. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p.1467-1476, 2002.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Métodos of chemical analysis for water and wastes. Cincinnati, 1971. 312p.
- VAHL, L.C. O Fósforo na Cultura do Arroz Irrigado. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004, p.419-434.
- VAHL, L.C. **Toxidez de ferro em genótipos de arroz irrigado por alagamento**. Porto Alegre - RS. 1991. 140f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- VAHL, L.C. **Toxidez de ferro em genótipos de arroz irrigado por alagamento**. Porto Alegre - RS. 1991. 140f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- VAHL, L.C.; SOUSA, R.O. Aspectos físico-químico de solos alagados. In: GOMES, A.da.S.; MAGALHÃES Jr, A.M. de (Eds.) **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.97-118.

ZHANG, T.K.; MACKENZIE, A.F. Changes of soil phosphorus fractions under long-term corn monoculture. **Soil Science of American Journal**, Madison, v.61, p.485-493, 1997.

ZIMMERMANN, F.J.P. **Estatística aplicada à pesquisa agrícola**. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, 2004. 402p.

## **7. APÊNDICES**

**Apêndice 1.** Resultados do P extraído por Mehlich-1 e Resina de troca aniônica em mg kg<sup>-1</sup> na área de resteva de milho em 2 profundidades em sistema plantio direto.

Adubação	Reaplicação	Repetição	Mehlich 0-10cm	Mehlich 0-20 cm	Resina 0-10 cm	Resina 0-20 cm
0	—	1	3,8	4,5	4,3	6,2
0	—	2	4,5	3,4	7,0	5,7
0	—	3	3,5	2,3	4,9	5,1
0	—	4	3,8	2,3	8,1	6,5
<b>Média</b>			<b>3,9</b>	<b>2,7</b>	<b>6,7</b>	<b>5,8</b>
SFT	Sem	1	3,5	2,8	6,5	6,8
SFT	Sem	2	4,7	3,5	8,1	8,1
SFT	Sem	3	3,8	2,6	7,0	9,5
SFT	Sem	4	5,0	3,4	9,2	9,5
<b>Média</b>			<b>4,2</b>	<b>3,1</b>	<b>7,7</b>	<b>8,5</b>
FNA	Sem	1	4,7	3,4	9,2	11,1
FNA	Sem	2	6,2	4,0	10,8	9,2
FNA	Sem	3	4,9	3,4	8,1	6,6
FNA	Sem	4	5,0	3,5	8,7	7,2
<b>Média</b>			<b>5,2</b>	<b>3,6</b>	<b>9,2</b>	<b>8,5</b>
SFT	Com	1	4,9	3,9	42,8	27,7
SFT	Com	2	6,4	4,8	41,2	25,5
SFT	Com	3	5,7	3,8	22,8	15,7
SFT	Com	4	5,7	4,2	31,4	23,5
<b>Média</b>			<b>5,7</b>	<b>4,2</b>	<b>34,5</b>	<b>23,1</b>
FNA	Com	1	6,1	4,2	43,9	25,1
FNA	Com	2	5,7	4,6	50,4	29,5
FNA	Com	3	7,1	4,9	46,1	26,5
FNA	Com	4	4,3	3,7	50,9	29,5
<b>Média</b>			<b>6,1</b>	<b>4,3</b>	<b>43,7</b>	<b>27,6</b>

**Apêndice 2.** Resultados do P extraído por Mehlich-1 e Resina de troca aniônica em mg kg<sup>-1</sup> na área de resteva de soja em 2 profundidades em sistema plantio direto.

Adubação	Reaplicação	Repetição	Mehlich 0-10cm	Mehlich 0-20 cm	Resina 0-10 cm	Resina 0-20 cm
0	—	1	2,7	2,0	5,6	8,9
0	—	2	3,2	2,4	5,6	8,3
0	—	3	3,5	3,0	6,2	8,6
0	—	4	3,8	2,6	6,2	8,6
Média			3,3	2,5	5,9	8,6
SFT	Sem	1	3,7	3,2	6,2	8,0
SFT	Sem	2	4,0	3,1	7,8	10,0
SFT	Sem	3	4,8	3,6	11,2	14,2
SFT	Sem	4	3,5	2,6	6,2	8,0
Média			4,0	3,1	7,8	10,0
FNA	Sem	1	2,8	2,4	7,8	10,9
FNA	Sem	2	3,8	2,6	6,2	7,1
FNA	Sem	3	4,3	3,1	11,6	11,6
FNA	Sem	4	4,8	3,6	14,0	13,7
Média			4,0	2,9	9,9	10,8
SFT	Com	1	2,8	6,5	19,5	15,9
SFT	Com	2	3,8	8,2	33,6	22,6
SFT	Com	3	4,3	7,6	27,5	23,8
SFT	Com	4	4,8	7,5	32,4	23,5
Média			4,0	7,5	28,2	21,5
FNA	Com	1	11,9	7,5	51,9	33,6
FNA	Com	2	7,2	4,9	51,9	30,8
FNA	Com	3	10,4	6,8	45,8	30,5
FNA	Com	4	9,7	6,4	38,5	26,3
Média			9,8	6,4	47,0	30,3

**Apêndice 3.** Resultados da concentração de P na folha bandeira (P FB) em mg kg<sup>-1</sup>, P acumulado nas plantas (parte aérea, colmo e grãos) em g m<sup>-2</sup>, massa de matéria seca em g e rendimento de grãos em kg ha<sup>-1</sup> em sistema plantio direto na área de resteva de milho.

Adubação	Reaplicação	Repetição	Teor P FB	Teor P planta	Massa seca	P acumulado	Rendimento
0	—	1	1,17	1,09	135,5	1,69	6100
0	—	2	1,23	1,59	202,8	3,69	6753
0	—	3	1,09	1,34	185,5	2,85	7699
0	—	4	1,13	1,08	195,5	2,41	7350
<b>Média</b>			<b>1,15</b>	<b>1,28</b>	<b>179,8</b>	<b>2,66</b>	<b>6975</b>
SFT	Sem	1	1,76	1,36	217,0	3,36	6855
SFT	Sem	2	1,35	2,01	270,9	6,23	7151
SFT	Sem	3	1,47	1,87	205,5	4,38	7233
SFT	Sem	4	1,40	1,30	145,4	2,16	7870
<b>Média</b>			<b>1,50</b>	<b>1,63</b>	<b>209,7</b>	<b>4,03</b>	<b>7277</b>
FNA	Sem	1	1,51	1,92	199,3	4,37	6828
FNA	Sem	2	1,40	2,26	187,3	4,85	7964
FNA	Sem	3	1,82	1,50	190,4	3,26	7144
FNA	Sem	4	1,27	1,58	207,7	3,74	6643
<b>Média</b>			<b>1,50</b>	<b>1,81</b>	<b>196,2</b>	<b>4,05</b>	<b>7145</b>
SFT	Com	1	2,25	3,39	184,6	7,15	8001
SFT	Com	2	1,94	2,88	314,5	10,34	6511
SFT	Com	3	2,06	3,76	298,8	12,83	8035
SFT	Com	4	1,83	4,04	204,6	9,44	8536
<b>Média</b>			<b>2,02</b>	<b>3,52</b>	<b>250,6</b>	<b>9,94</b>	<b>7771</b>
FNA	Com	1	1,95	2,91	290,4	9,67	7170
FNA	Com	2	1,88	2,45	192,0	5,38	8422
FNA	Com	3	2,11	3,47	258,9	10,28	7088
FNA	Com	4	2,15	4,73	236,8	12,81	9009
<b>Média</b>			<b>1,99</b>	<b>3,39</b>	<b>244,5</b>	<b>9,54</b>	<b>7613</b>

**Apêndice 4.** Resultados da concentração de P na folha bandeira (P FB) em mg kg<sup>-1</sup>, P acumulado nas plantas (parte aérea, colmo e grãos) em g m<sup>-2</sup>, massa de matéria seca em g e rendimento de grãos em k ha<sup>-1</sup> em sistema plantio direto na área de resteva de soja.

Adubação	Reaplicação	Repetição	Teor P FB	Teor P planta	Massa seca	P acumulado	Rendimento
0	—	1	1,25	1,80	191,3	3,94	7546
0	—	2	1,29	1,73	216,9	4,30	7877
0	—	3	1,45	1,80	169,4	3,49	9070
0	—	4	1,22	1,64	236,3	4,44	7747
<b>Média</b>			<b>1,30</b>	<b>1,75</b>	<b>203,5</b>	<b>4,04</b>	<b>8060</b>
SFT	Sem	1	1,58	2,75	188,2	5,90	9920
SFT	Sem	2	1,51	1,85	274,2	5,81	8666
SFT	Sem	3	1,27	2,27	265,7	6,91	8221
SFT	Sem	4	1,70	2,42	202,9	5,61	8394
<b>Média</b>			<b>1,51</b>	<b>2,32</b>	<b>232,7</b>	<b>6,06</b>	<b>8800</b>
FNA	Sem	1	1,34	1,38	157,1	2,48	7654
FNA	Sem	2	1,67	2,30	177,6	4,67	8437
FNA	Sem	3	1,62	2,27	194,4	5,05	8369
FNA	Sem	4	1,41	1,83	164,4	3,44	7819
<b>Média</b>			<b>1,51</b>	<b>1,95</b>	<b>173,4</b>	<b>3,91</b>	<b>8070</b>
SFT	Com	1	2,14	3,06	143,5	5,01	8210
SFT	Com	2	1,90	3,16	305,6	11,04	7298
SFT	Com	3	2,01	3,47	236,0	9,36	7389
SFT	Com	4	2,12	4,20	214,1	10,27	7072
<b>Média</b>			<b>2,05</b>	<b>3,47</b>	<b>224,8</b>	<b>8,92</b>	<b>7492</b>
FNA	Com	1	2,26	2,69	185,7	5,72	10179
FNA	Com	2	1,29	2,96	189,9	6,43	7873
FNA	Com	3	2,14	3,46	142,6	5,64	7057
FNA	Com	4	2,01	2,71	231,7	7,17	8490
<b>Média</b>			<b>1,93</b>	<b>2,96</b>	<b>187,5</b>	<b>6,24</b>	<b>8150</b>

**Apêndice 5. Resultados do P inorgânico em mg kg<sup>-1</sup>na área de resteva  
de milho em 3 profundidades no sistema plantio direto.**

Aadubação	Reaplicação	Repetição	RTA	Pi bic 0,5 mol L <sup>-1</sup>	Pi hid 0,1 mol L <sup>-1</sup>	P HCl 1,0 mol L <sup>-1</sup>	Pi hid 0,5 mol L <sup>-1</sup>
0,0-2,5 cm							
0	—	1	5,4	8,3	24,3	2,92	14,5
0	—	2	8,0	9,4	21,1	2,60	23,4
0	—	3	6,3	12,3	21,5	1,83	21,1
0	—	4	6,1	8,1	16,8	2,38	28,7
<b>Média</b>			<b>6,5</b>	<b>9,5</b>	<b>20,9</b>	<b>2,4</b>	<b>21,9</b>
SFT	Sem	1	8,5	9,2	24,7	3,45	29,0
SFT	Sem	2	19,6	20,3	30,5	3,46	33,5
SFT	Sem	3	7,6	11,8	27,0	2,46	24,2
SFT	Sem	4	9,2	11,7	18,9	3,27	30,4
<b>Média</b>			<b>11,2</b>	<b>13,2</b>	<b>25,3</b>	<b>3,2</b>	<b>29,3</b>
FNA	Sem	1	6,3	10,5	26,5	3,32	23,3
FNA	Sem	2	8,5	12,8	28,4	2,93	29,3
FNA	Sem	3	13,0	13,4	29,1	2,46	22,5
FNA	Sem	4	11,0	9,5	26,8	2,86	23,8
<b>Média</b>			<b>9,7</b>	<b>11,5</b>	<b>27,7</b>	<b>2,9</b>	<b>24,7</b>
SFT	Com	1	52,8	27,0	41,4	5,17	33,9
SFT	Com	2	66,0	26,2	39,1	4,80	33,2
SFT	Com	3	51,4	45,4	47,8	4,70	30,0
SFT	Com	4	51,8	38,9	52,1	6,06	35,3
<b>Média</b>			<b>55,5</b>	<b>34,4</b>	<b>45,1</b>	<b>5,2</b>	<b>33,1</b>
FNA	Com	1	47,0	25,2	39,0	4,84	35,5
FNA	Com	2	30,3	17,1	23,8	4,93	31,4
FNA	Com	3	46,1	31,6	52,1	4,98	30,0
FNA	Com	4	49,6	29,5	49,0	7,29	34,0
<b>Média</b>			<b>44,7</b>	<b>25,9</b>	<b>41,0</b>	<b>5,5</b>	<b>32,7</b>
2,5-5,0 cm							
0	—	1	3,6	6,8	22,2	3,05	13,5
0	—	2	5,8	9,1	21,7	2,40	17,8
0	—	3	5,8	11,5	14,1	1,40	17,7
0	—	4	4,4	7,5	16,4	1,84	25,4
<b>Média</b>			<b>5,1</b>	<b>9,1</b>	<b>19,3</b>	<b>2,3</b>	<b>16,3</b>
SFT	Sem	1	8,5	7,4	22,2	2,72	18,1
SFT	Sem	2	5,4	10,2	25,6	2,66	32,1
SFT	Sem	3	5,8	11,2	24,2	1,68	21,1
SFT	Sem	4	6,1	9,2	17,1	2,38	31,7
<b>Média</b>			<b>6,2</b>	<b>9,5</b>	<b>22,8</b>	<b>2,3</b>	<b>21,9</b>
FNA	Sem	1	5,8	8,6	22,2	2,65	18,2
FNA	Sem	2	5,4	10,4	25,6	2,26	26,9
FNA	Sem	3	7,2	11,2	24,2	1,75	21,1
FNA	Sem	4	4,4	7,5	17,1	2,18	24,1
<b>Média</b>			<b>6,1</b>	<b>9,9</b>	<b>23,7</b>	<b>2,3</b>	<b>22,0</b>
SFT	Com	1	11,2	11,1	29,2	3,05	29,9
SFT	Com	2	9,8	12,6	27,2	2,93	33,2
SFT	Com	3	18,8	22,1	33,4	2,53	25,2
SFT	Com	4	14,9	24,7	33,5	4,02	31,7
<b>Média</b>			<b>11,5</b>	<b>13,9</b>	<b>28,4</b>	<b>2,7</b>	<b>27,6</b>
FNA	Com	1	18,4	17,2	26,5	3,58	27,6
FNA	Com	2	10,7	13,1	26,2	3,00	30,4
FNA	Com	3	17,0	15,1	36,5	2,74	26,6
FNA	Com	4	13,2	24,5	39,0	6,13	28,7
<b>Média</b>			<b>14,4</b>	<b>14,8</b>	<b>29,4</b>	<b>3,0</b>	<b>28,0</b>
5,0-15,0 cm							
0	—	1	2,7	6,5	20,4	2,25	10,2
0	—	2	4,9	7,2	18,9	1,80	21,6
0	—	3	5,4	11,8	12,3	1,33	12,9
0	—	4	3,5	6,7	15,2	1,70	22,4
<b>Média</b>			<b>4,1</b>	<b>8,0</b>	<b>16,7</b>	<b>1,8</b>	<b>16,8</b>
SFT	Sem	1	8,5	7,1	19,2	2,45	15,8
SFT	Sem	2	2,7	9,4	22,6	2,26	20,2
SFT	Sem	3	5,8	11,2	23,0	1,75	20,8
SFT	Sem	4	6,1	8,3	16,7	2,18	19,8
<b>Média</b>			<b>5,8</b>	<b>9,0</b>	<b>20,4</b>	<b>2,2</b>	<b>19,2</b>
FNA	Sem	1	6,3	8,6	21,6	2,45	14,4
FNA	Sem	2	8,5	9,9	25,0	2,00	26,9
FNA	Sem	3	6,7	10,4	25,4	1,68	18,7
FNA	Sem	4	4,4	7,5	18,3	1,91	23,1
<b>Média</b>			<b>6,5</b>	<b>9,1</b>	<b>22,6</b>	<b>2,0</b>	<b>20,8</b>
SFT	Com	1	4,9	8,9	24,6	2,79	21,3
SFT	Com	2	3,6	9,4	22,0	2,40	22,7
SFT	Com	3	11,2	13,4	17,2	1,97	24,5
SFT	Com	4	12,3	13,9	20,4	2,72	28,1
<b>Média</b>			<b>8,0</b>	<b>11,4</b>	<b>21,0</b>	<b>2,5</b>	<b>24,1</b>
FNA	Com	1	5,8	9,5	20,7	2,92	31,9
FNA	Com	2	5,4	11,8	23,5	2,46	29,7
FNA	Com	3	16,5	12,9	32,8	1,75	23,2
FNA	Com	4	12,3	15,6	18,3	2,66	29,7
<b>Média</b>			<b>10,0</b>	<b>12,4</b>	<b>23,8</b>	<b>2,4</b>	<b>28,6</b>

**Apêndice 6.** Resultados do P orgânico em mg kg<sup>-1</sup> na área de resteva de milho em 3 profundidades no sistema plantio direto.

Adubação	Reaplicação	Repetição	Po bic 0,5 mol L <sup>-1</sup>	Po hid 0,1 mol L <sup>-1</sup>	Po hid 0,5 mol L <sup>-1</sup>
<i>0-2,5 cm</i>					
0	—	1	41,2	30,3	14,7
0	—	2	23,7	26,3	13,2
0	—	3	20,9	32,0	13,9
0	—	4	17,3	43,4	11,7
<b>Média</b>			<b>25,8</b>	<b>33,0</b>	<b>13,4</b>
SFT	Sem	1	35,9	37,9	1,5
SFT	Sem	2	25,2	43,6	9,3
SFT	Sem	3	26,1	33,0	11,8
SFT	Sem	4	23,1	35,6	7,2
<b>Média</b>			<b>27,6</b>	<b>37,5</b>	<b>7,5</b>
FNA	Sem	1	41,6	34,3	2,5
FNA	Sem	2	32,7	34,1	8,2
FNA	Sem	3	25,3	27,2	10,7
FNA	Sem	4	23,4	32,4	20,4
<b>Média</b>			<b>30,8</b>	<b>32,0</b>	<b>10,5</b>
SFT	Com	1	43,3	35,0	4,9
SFT	Com	2	39,0	46,7	9,7
SFT	Com	3	24,7	40,7	7,8
SFT	Com	4	40,0	45,7	10,7
<b>Média</b>			<b>36,8</b>	<b>42,0</b>	<b>8,3</b>
FNA	Com	1	48,6	38,3	19,0
FNA	Com	2	46,3	57,5	7,9
FNA	Com	3	35,7	34,6	11,5
FNA	Com	4	35,4	45,9	10,2
<b>Média</b>			<b>41,5</b>	<b>44,1</b>	<b>12,1</b>
<i>2,5-5,0 cm</i>					
0	—	1	34,0	29,0	10,5
0	—	2	25,7	32,8	19,7
0	—	3	20,8	39,4	14,6
0	—	4	16,9	36,2	12,2
<b>Média</b>			<b>24,4</b>	<b>34,3</b>	<b>14,2</b>
SFT	Sem	1	34,3	30,7	2,2
SFT	Sem	2	26,4	31,5	1,8
SFT	Sem	3	22,9	24,7	12,1
SFT	Sem	4	21,8	37,5	4,0
<b>Média</b>			<b>26,4</b>	<b>31,1</b>	<b>5,0</b>
FNA	Sem	1	42,6	35,1	4,9
FNA	Sem	2	32,4	27,9	10,6
FNA	Sem	3	19,2	22,8	15,8
FNA	Sem	4	18,8	37,5	12,6
<b>Média</b>			<b>28,3</b>	<b>30,8</b>	<b>11,0</b>
SFT	Com	1	42,8	34,2	7,0
SFT	Com	2	30,3	36,2	7,9
SFT	Com	3	20,3	34,9	12,6
SFT	Com	4	27,0	41,7	12,5
<b>Média</b>			<b>30,1</b>	<b>36,7</b>	<b>10,0</b>
FNA	Com	1	35,7	35,2	24,1
FNA	Com	2	29,8	38,9	4,5
FNA	Com	3	40,2	28,1	10,3
FNA	Com	4	24,4	37,1	3,2
<b>Média</b>			<b>32,5</b>	<b>34,8</b>	<b>10,5</b>
<i>5,0-15,0 cm</i>					
0	—	1	32,6	35,2	8,3
0	—	2	22,2	34,7	12,3
0	—	3	18,7	34,8	21,2
0	—	4	15,9	32,7	8,6
<b>Média</b>			<b>22,4</b>	<b>34,3</b>	<b>12,6</b>
SFT	Sem	1	32,0	31,2	6,4
SFT	Sem	2	24,6	33,7	14,6
SFT	Sem	3	20,2	23,1	11,5
SFT	Sem	4	18,0	26,5	8,4
<b>Média</b>			<b>23,7</b>	<b>28,6</b>	<b>10,2</b>
FNA	Sem	1	32,2	36,5	6,8
FNA	Sem	2	24,9	32,1	8,8
FNA	Sem	3	21,0	21,6	16,3
FNA	Sem	4	16,0	26,8	9,8
<b>Média</b>			<b>23,5</b>	<b>29,3</b>	<b>10,4</b>
SFT	Com	1	35,4	32,6	1,8
SFT	Com	2	23,7	29,8	16,6
SFT	Com	3	23,5	48,3	10,5
SFT	Com	4	18,1	46,3	3,9
<b>Média</b>			<b>25,1</b>	<b>39,3</b>	<b>8,2</b>
FNA	Com	1	33,9	32,3	18,0
FNA	Com	2	25,7	33,6	6,9
FNA	Com	3	24,0	19,8	11,9
FNA	Com	4	10,8	41,9	8,8
<b>Média</b>			<b>23,6</b>	<b>31,9</b>	<b>11,4</b>

**Apêndice 7.** Resultados do P Total em mg kg<sup>-1</sup> na área de resteva de milho em 3 profundidades no sistema plantio direto.

Adubação	Reaplicação	Repetição	P <sub>i</sub> TOTAL	P <sub>o</sub> TOTAL	P-res	P TOTAL
<i>0-2,5 cm</i>						
0	—	1	55,4	86,2	42,5	184,1
0	—	2	64,4	63,2	46,3	173,9
0	—	3	63,0	66,9	50,2	180,1
0	—	4	62,1	72,4	67,7	202,1
<b>Média</b>			<b>61,2</b>	<b>72,2</b>	<b>51,7</b>	<b>185,0</b>
SFT	Sem	1	74,8	75,3	48,3	198,4
SFT	Sem	2	107,4	78,2	57,3	242,9
SFT	Sem	3	73,0	70,8	58,0	201,8
SFT	Sem	4	73,4	65,9	72,5	211,8
<b>Média</b>			<b>82,1</b>	<b>72,6</b>	<b>59,0</b>	<b>213,7</b>
FNA	Sem	1	69,8	78,5	42,5	190,8
FNA	Sem	2	82,0	75,0	57,3	214,3
FNA	Sem	3	80,5	63,2	52,2	195,8
FNA	Sem	4	73,8	76,2	67,7	217,8
<b>Média</b>			<b>76,5</b>	<b>73,2</b>	<b>54,9</b>	<b>204,6</b>
SFT	Com	1	160,3	83,2	67,6	311,1
SFT	Com	2	169,2	95,3	63,9	328,5
SFT	Com	3	179,3	73,3	69,6	322,1
SFT	Com	4	184,1	96,4	72,5	353,0
<b>Média</b>			<b>173,2</b>	<b>87,1</b>	<b>68,4</b>	<b>328,7</b>
FNA	Com	1	151,5	105,8	63,8	321,1
FNA	Com	2	107,6	111,6	61,7	280,9
FNA	Com	3	164,8	81,8	61,8	308,4
FNA	Com	4	169,3	91,4	67,7	328,4
<b>Média</b>			<b>148,3</b>	<b>97,7</b>	<b>63,8</b>	<b>309,7</b>
<i>2,5-5,0 cm</i>						
0	—	1	49,1	73,6	40,6	163,2
0	—	2	56,7	78,2	55,1	190,1
0	—	3	50,5	74,8	48,3	173,6
0	—	4	55,6	65,3	67,7	188,5
<b>Média</b>			<b>53,0</b>	<b>73,0</b>	<b>52,9</b>	<b>178,9</b>
SFT	Sem	1	58,9	67,2	42,5	168,6
SFT	Sem	2	75,9	59,8	55,1	190,8
SFT	Sem	3	64,0	59,7	52,2	175,9
SFT	Sem	4	66,4	63,3	67,7	197,4
<b>Média</b>			<b>66,3</b>	<b>62,5</b>	<b>54,4</b>	<b>183,2</b>
FNA	Sem	1	57,5	82,6	40,6	180,6
FNA	Sem	2	70,6	71,0	61,7	203,3
FNA	Sem	3	65,4	57,8	56,0	179,3
FNA	Sem	4	55,2	68,8	65,3	189,3
<b>Média</b>			<b>62,2</b>	<b>70,1</b>	<b>55,9</b>	<b>188,1</b>
SFT	Com	1	84,4	83,9	59,9	228,2
SFT	Com	2	85,6	74,4	66,2	226,2
SFT	Com	3	102,0	67,8	56,0	225,8
SFT	Com	4	108,8	81,1	54,1	244,0
<b>Média</b>			<b>95,2</b>	<b>76,8</b>	<b>59,1</b>	<b>231,1</b>
FNA	Com	1	93,2	95,0	48,3	236,5
FNA	Com	2	83,4	73,1	57,3	213,9
FNA	Com	3	97,9	78,6	58,0	234,5
FNA	Com	4	111,4	64,8	70,1	246,3
<b>Média</b>			<b>96,5</b>	<b>77,9</b>	<b>58,4</b>	<b>232,8</b>
<i>5,0-15,0 cm</i>						
0	—	1	42,0	76,0	44,4	162,5
0	—	2	54,5	69,2	55,1	178,8
0	—	3	43,7	74,6	50,2	168,5
0	—	4	49,6	57,1	65,3	172,0
<b>Média</b>			<b>47,4</b>	<b>69,2</b>	<b>53,8</b>	<b>170,4</b>
SFT	Sem	1	53,0	69,5	44,4	167,0
SFT	Sem	2	57,1	72,8	52,9	182,9
SFT	Sem	3	62,5	54,8	56,0	173,4
SFT	Sem	4	53,2	52,8	67,7	173,7
<b>Média</b>			<b>56,5</b>	<b>62,5</b>	<b>55,3</b>	<b>174,2</b>
FNA	Sem	1	53,3	75,6	46,4	175,3
FNA	Sem	2	72,3	65,9	57,3	195,5
FNA	Sem	3	62,9	58,9	56,0	177,9
FNA	Sem	4	55,2	52,6	70,1	177,9
<b>Média</b>			<b>60,9</b>	<b>63,2</b>	<b>57,5</b>	<b>181,6</b>
SFT	Com	1	62,5	69,8	61,8	194,2
SFT	Com	2	60,0	70,1	59,5	189,6
SFT	Com	3	68,3	82,3	56,0	206,6
SFT	Com	4	77,4	68,3	67,7	213,3
<b>Média</b>			<b>67,0</b>	<b>72,6</b>	<b>61,3</b>	<b>200,9</b>
FNA	Com	1	70,9	84,1	48,3	203,2
FNA	Com	2	72,8	66,3	55,1	194,2
FNA	Com	3	87,1	55,7	61,8	204,6
FNA	Com	4	78,5	61,4	67,7	207,6
<b>Média</b>			<b>77,3</b>	<b>66,9</b>	<b>58,2</b>	<b>202,4</b>

**Apêndice 8.** Resultados do P inorgânico em mg kg<sup>-1</sup> na área de resteva de soja em 3 profundidades no sistema plantio direto.

Adubação	Reaplicação	Repetição	RTA	Pi bic 0,5 mol L <sup>-1</sup>	Pi hid 0,1 mol L <sup>-1</sup>	P HCl 1,0 mol L <sup>-1</sup>	Pi hid 0,5 mol L <sup>-1</sup>
<i>0-2,5 cm</i>							
0	—	1	6,7	7,7	25,6	3,18	31,6
0	—	2	6,2	11,8	26,6	2,86	28,3
0	—	3	8,1	13,7	19,6	2,45	30,0
0	—	4	9,2	8,9	20,1	2,04	25,4
<b>Média</b>			<b>7,6</b>	<b>10,5</b>	<b>23,0</b>	<b>2,6</b>	<b>28,8</b>
SFT	Sem	1	11,2	9,8	27,7	4,64	22,4
SFT	Sem	2	12,5	11,8	26,2	3,80	29,7
SFT	Sem	3	9,4	14,8	20,2	2,67	37,1
SFT	Sem	4	10,5	9,7	19,8	2,86	34,7
<b>Média</b>			<b>10,9</b>	<b>11,5</b>	<b>23,5</b>	<b>3,5</b>	<b>31,0</b>
FNA	Sem	1	6,7	9,8	25,9	3,91	21,4
FNA	Sem	2	9,8	12,3	24,4	3,13	34,2
FNA	Sem	3	8,5	12,3	24,2	2,59	32,4
FNA	Sem	4	11,8	9,5	29,5	2,52	36,3
<b>Média</b>			<b>9,2</b>	<b>11,0</b>	<b>26,0</b>	<b>3,0</b>	<b>31,1</b>
SFT	Com	1	46,1	30,4	35,6	6,50	25,0
SFT	Com	2	54,4	34,5	43,9	5,73	32,5
SFT	Com	3	47,0	33,6	45,7	5,33	27,6
SFT	Com	4	48,7	28,1	42,3	5,11	33,7
<b>Média</b>			<b>49,0</b>	<b>31,6</b>	<b>41,9</b>	<b>5,7</b>	<b>29,7</b>
FNA	Com	1	39,4	20,6	46,0	6,30	23,7
FNA	Com	2	33,0	23,5	28,7	5,20	22,0
FNA	Com	3	42,5	30,0	39,5	5,05	30,3
FNA	Com	4	40,8	16,1	30,8	5,93	34,7
<b>Média</b>			<b>38,9</b>	<b>22,5</b>	<b>36,2</b>	<b>5,6</b>	<b>27,7</b>
<i>2,5-5,0 cm</i>							
0	—	1	4,5	7,1	22,8	2,52	24,7
0	—	2	4,0	9,9	23,2	1,26	23,0
0	—	3	4,9	12,3	14,7	1,68	26,6
0	—	4	7,9	8,1	18,9	1,70	29,1
<b>Média</b>			<b>5,3</b>	<b>9,3</b>	<b>19,9</b>	<b>1,8</b>	<b>25,8</b>
SFT	Sem	1	5,4	9,5	25,9	3,51	17,8
SFT	Sem	2	8,0	10,7	22,9	3,06	28,6
SFT	Sem	3	6,7	13,7	15,0	1,75	30,0
SFT	Sem	4	9,7	7,0	16,8	1,84	22,5
<b>Média</b>			<b>7,4</b>	<b>10,2</b>	<b>20,1</b>	<b>2,5</b>	<b>24,7</b>
FNA	Sem	1	4,9	7,4	22,5	2,92	16,5
FNA	Sem	2	7,1	11,2	21,1	2,40	32,8
FNA	Sem	3	5,8	10,6	14,4	1,68	32,4
FNA	Sem	4	11,0	7,8	28,3	2,04	32,4
<b>Média</b>			<b>7,2</b>	<b>9,3</b>	<b>21,6</b>	<b>2,3</b>	<b>28,5</b>
SFT	Com	1	14,8	20,0	31,0	4,71	23,0
SFT	Com	2	27,7	24,3	37,2	4,66	29,0
SFT	Com	3	23,3	17,6	29,7	2,81	25,6
SFT	Com	4	33,8	15,3	21,6	3,61	34,0
<b>Média</b>			<b>24,9</b>	<b>19,3</b>	<b>29,9</b>	<b>3,9</b>	<b>27,9</b>
FNA	Com	1	23,3	15,7	34,1	4,18	23,3
FNA	Com	2	17,4	12,3	25,3	2,53	22,3
FNA	Com	3	30,9	17,6	26,7	2,88	25,2
FNA	Com	4	23,7	12,2	26,8	4,15	32,7
<b>Média</b>			<b>23,8</b>	<b>14,5</b>	<b>28,2</b>	<b>3,4</b>	<b>25,9</b>
<i>5,0-15,0 cm</i>							
0	—	1	3,6	7,4	21,9	2,39	16,1
0	—	2	3,6	8,3	23,8	2,06	22,3
0	—	3	4,5	11,8	15,6	2,47	24,2
0	—	4	6,6	7,2	18,6	1,57	27,7
<b>Média</b>			<b>4,6</b>	<b>8,7</b>	<b>20,0</b>	<b>2,1</b>	<b>22,6</b>
SFT	Sem	1	4,9	9,2	23,7	2,98	15,8
SFT	Sem	2	5,8	9,9	20,4	2,40	19,2
SFT	Sem	3	6,3	13,4	15,0	1,61	20,4
SFT	Sem	4	7,5	6,4	16,1	1,91	17,2
<b>Média</b>			<b>6,1</b>	<b>9,7</b>	<b>18,8</b>	<b>2,2</b>	<b>18,2</b>
FNA	Sem	1	4,5	6,8	21,0	2,52	15,1
FNA	Sem	2	3,6	9,1	20,1	2,26	29,7
FNA	Sem	3	4,9	12,0	14,1	1,54	29,3
FNA	Sem	4	7,5	7,2	26,8	1,84	29,1
<b>Média</b>			<b>5,1</b>	<b>8,8</b>	<b>20,5</b>	<b>2,0</b>	<b>25,8</b>
SFT	Com	1	8,5	17,2	23,4	3,05	19,7
SFT	Com	2	25,9	17,7	30,2	3,53	22,7
SFT	Com	3	14,8	13,2	17,2	2,11	27,6
SFT	Com	4	9,7	10,8	18,9	2,45	30,4
<b>Média</b>			<b>14,7</b>	<b>14,7</b>	<b>22,4</b>	<b>2,8</b>	<b>25,1</b>
FNA	Com	1	9,4	10,1	27,4	2,92	16,5
FNA	Com	2	11,6	11,2	22,0	2,33	31,1
FNA	Com	3	6,7	11,2	21,5	1,83	25,9
FNA	Com	4	8,3	8,6	20,4	2,72	28,1
<b>Média</b>			<b>9,0</b>	<b>10,3</b>	<b>22,8</b>	<b>2,5</b>	<b>25,4</b>

**Apêndice 9.** Resultados do P orgânico em mg kg<sup>-1</sup>na área de resteva de soja em 3 profundidades no sistema plantio direto.

Adubação	Reaplicação	Repetição	Po bic 0,5 mol L <sup>-1</sup>	Po hid 0,1 mol L <sup>-1</sup>	Po hid 0,5 mol L <sup>-1</sup>
<i>0-2,5 cm</i>					
0	—	1	40,1	47,4	8,1
0	—	2	33,8	37,7	11,9
0	—	3	23,2	35,7	5,1
0	—	4	24,0	36,3	17,8
<b>Média</b>			<b>30,3</b>	<b>39,3</b>	<b>10,7</b>
SFT	Sem	1	56,1	44,4	21,0
SFT	Sem	2	36,5	52,3	7,8
SFT	Sem	3	25,7	49,9	11,8
SFT	Sem	4	25,0	47,9	1,0
<b>Média</b>			<b>35,8</b>	<b>48,6</b>	<b>10,4</b>
FNA	Sem	1	41,4	43,6	7,2
FNA	Sem	2	35,9	45,2	6,9
FNA	Sem	3	20,9	39,4	12,3
FNA	Sem	4	28,1	34,4	8,8
<b>Média</b>			<b>31,6</b>	<b>40,6</b>	<b>8,8</b>
SFT	Com	1	33,8	39,9	40,6
SFT	Com	2	48,5	65,9	17,5
SFT	Com	3	36,5	42,9	29,6
SFT	Com	4	42,4	44,1	14,3
<b>Média</b>			<b>40,3</b>	<b>48,2</b>	<b>25,5</b>
FNA	Com	1	54,9	50,4	17,9
FNA	Com	2	49,7	41,0	26,2
FNA	Com	3	36,5	37,9	7,5
FNA	Com	4	51,5	46,3	14,2
<b>Média</b>			<b>48,2</b>	<b>43,9</b>	<b>16,4</b>
<i>2,5-5,0 cm</i>					
0	—	1	39,8	32,7	6,7
0	—	2	28,5	36,6	14,5
0	—	3	18,1	35,1	5,7
0	—	4	20,1	29,0	7,8
<b>Média</b>			<b>26,6</b>	<b>33,4</b>	<b>8,7</b>
SFT	Sem	1	35,6	36,6	6,2
SFT	Sem	2	34,8	50,3	8,9
SFT	Sem	3	18,6	45,9	6,0
SFT	Sem	4	25,0	45,3	8,0
<b>Média</b>			<b>28,5</b>	<b>44,5</b>	<b>7,3</b>
FNA	Sem	1	38,6	33,9	11,3
FNA	Sem	2	33,4	41,5	8,3
FNA	Sem	3	18,9	30,8	4,5
FNA	Sem	4	27,9	28,1	9,9
<b>Média</b>			<b>29,7</b>	<b>33,6</b>	<b>8,5</b>
SFT	Com	1	51,2	41,0	1,9
SFT	Com	2	44,4	50,3	7,6
SFT	Com	3	20,2	32,1	20,6
SFT	Com	4	19,5	49,8	2,9
<b>Média</b>			<b>33,8</b>	<b>43,3</b>	<b>8,2</b>
FNA	Com	1	45,1	42,3	28,4
FNA	Com	2	32,3	43,4	16,1
FNA	Com	3	23,9	28,7	8,0
FNA	Com	4	21,6	30,5	14,4
<b>Média</b>			<b>30,7</b>	<b>36,2</b>	<b>16,7</b>
<i>5,0-15,0 cm</i>					
0	—	1	39,5	27,6	13,4
0	—	2	26,5	35,1	12,5
0	—	3	17,8	26,8	9,9
0	—	4	20,0	23,7	2,7
<b>Média</b>			<b>26,0</b>	<b>28,3</b>	<b>9,6</b>
SFT	Sem	1	36,8	36,2	1,8
SFT	Sem	2	31,2	40,3	12,1
SFT	Sem	3	18,8	44,9	11,8
SFT	Sem	4	15,2	44,9	11,4
<b>Média</b>			<b>25,5</b>	<b>41,6</b>	<b>9,3</b>
FNA	Sem	1	35,8	32,0	11,7
FNA	Sem	2	29,3	39,7	6,9
FNA	Sem	3	14,7	29,3	5,8
FNA	Sem	4	24,7	15,5	4,8
<b>Média</b>			<b>26,1</b>	<b>29,1</b>	<b>7,3</b>
SFT	Com	1	32,3	33,0	6,1
SFT	Com	2	36,8	43,9	11,2
SFT	Com	3	20,0	32,6	13,0
SFT	Com	4	19,2	34,7	5,3
<b>Média</b>			<b>27,1</b>	<b>36,1</b>	<b>8,9</b>
FNA	Com	1	41,1	36,8	12,2
FNA	Com	2	31,6	42,3	6,4
FNA	Com	3	15,6	23,7	8,2
FNA	Com	4	18,6	30,3	5,1
<b>Média</b>			<b>26,7</b>	<b>33,3</b>	<b>8,0</b>

**Apêndice 10.** Resultados do P Total em mg kg<sup>-1</sup>na área de resteva de soja em 3 profundidades no sistema plantio direto.

Adubação	Reaplicação	Repetição	P <sub>i</sub> TOTAL	P <sub>o</sub> TOTAL	P-res	P TOTAL
<i>0-2,5 cm</i>						
0	—	1	74,7	95,5	46,4	216,6
0	—	2	75,7	83,4	48,5	207,6
0	—	3	73,8	64,0	52,2	189,9
0	—	4	65,7	78,1	67,7	211,4
<b>Média</b>			<b>72,5</b>	<b>80,2</b>	<b>53,7</b>	<b>206,4</b>
SFT	Sem	1	75,7	121,5	52,2	249,4
SFT	Sem	2	84,0	96,6	55,1	235,7
SFT	Sem	3	84,3	87,4	54,1	225,7
SFT	Sem	4	77,6	73,9	70,1	221,6
<b>Média</b>			<b>80,4</b>	<b>94,9</b>	<b>57,9</b>	<b>233,1</b>
FNA	Sem	1	67,7	92,2	50,2	210,1
FNA	Sem	2	83,9	88,0	57,3	229,2
FNA	Sem	3	80,0	72,6	58,0	210,5
FNA	Sem	4	89,7	71,3	67,7	228,6
<b>Média</b>			<b>80,3</b>	<b>81,0</b>	<b>58,3</b>	<b>219,6</b>
SFT	Com	1	143,6	114,3	65,7	323,6
SFT	Com	2	171,1	131,9	68,4	371,4
SFT	Com	3	159,1	109,0	61,8	329,9
SFT	Com	4	157,9	100,8	77,4	336,0
<b>Média</b>			<b>157,9</b>	<b>114,0</b>	<b>68,3</b>	<b>340,2</b>
FNA	Com	1	135,9	123,2	61,8	320,9
FNA	Com	2	112,4	116,9	63,9	293,2
FNA	Com	3	147,3	81,9	65,7	294,9
FNA	Com	4	128,3	112,0	72,5	312,8
<b>Média</b>			<b>131,0</b>	<b>108,5</b>	<b>66,0</b>	<b>305,5</b>
<i>2,5-5,0 cm</i>						
0	—	1	61,6	79,3	48,3	189,1
0	—	2	61,4	79,6	55,1	196,1
0	—	3	60,2	58,9	54,1	173,2
0	—	4	65,6	57,0	62,8	185,4
<b>Média</b>			<b>62,2</b>	<b>68,7</b>	<b>55,1</b>	<b>186,0</b>
SFT	Sem	1	62,0	78,5	48,3	188,8
SFT	Sem	2	73,3	94,0	52,9	220,3
SFT	Sem	3	67,2	70,4	46,4	184,0
SFT	Sem	4	57,6	78,3	67,7	203,6
<b>Média</b>			<b>65,0</b>	<b>80,3</b>	<b>53,8</b>	<b>199,1</b>
FNA	Sem	1	54,2	83,8	48,3	186,3
FNA	Sem	2	74,6	83,1	55,1	212,9
FNA	Sem	3	64,9	54,2	59,9	179,0
FNA	Sem	4	81,5	65,9	72,5	219,9
<b>Média</b>			<b>68,8</b>	<b>71,8</b>	<b>59,0</b>	<b>199,5</b>
SFT	Com	1	93,5	94,1	58,0	245,6
SFT	Com	2	122,9	102,3	61,7	286,9
SFT	Com	3	99,0	72,8	58,0	229,8
SFT	Com	4	108,3	72,2	72,5	253,0
<b>Média</b>			<b>105,9</b>	<b>85,4</b>	<b>62,5</b>	<b>253,8</b>
FNA	Com	1	100,5	115,8	52,2	268,5
FNA	Com	2	79,9	91,8	57,3	229,0
FNA	Com	3	103,2	60,6	58,0	221,8
FNA	Com	4	99,5	66,5	65,3	231,3
<b>Média</b>			<b>95,8</b>	<b>83,7</b>	<b>58,2</b>	<b>237,6</b>
<i>5,0-15,0 cm</i>						
0	—	1	51,4	80,5	44,4	176,3
0	—	2	60,1	74,1	55,1	189,3
0	—	3	58,5	54,5	50,2	163,2
0	—	4	61,7	46,4	65,3	173,4
<b>Média</b>			<b>57,9</b>	<b>63,9</b>	<b>53,8</b>	<b>175,6</b>
SFT	Sem	1	56,6	74,7	44,4	175,8
SFT	Sem	2	57,7	83,5	52,9	194,2
SFT	Sem	3	56,8	75,6	56,0	188,4
SFT	Sem	4	49,1	71,6	67,7	188,3
<b>Média</b>			<b>55,1</b>	<b>76,3</b>	<b>55,3</b>	<b>186,7</b>
FNA	Sem	1	49,9	79,4	46,4	175,6
FNA	Sem	2	64,7	75,9	57,3	198,0
FNA	Sem	3	61,9	49,7	56,0	167,6
FNA	Sem	4	72,4	45,0	70,1	187,4
<b>Média</b>			<b>62,2</b>	<b>62,5</b>	<b>57,5</b>	<b>182,2</b>
SFT	Com	1	71,9	71,4	61,8	205,1
SFT	Com	2	100,0	92,0	59,5	251,4
SFT	Com	3	74,8	65,7	56,0	196,5
SFT	Com	4	72,2	59,2	67,7	199,1
<b>Média</b>			<b>79,7</b>	<b>72,1</b>	<b>61,3</b>	<b>213,0</b>
FNA	Com	1	66,3	90,1	48,3	204,7
FNA	Com	2	78,2	80,4	55,1	213,7
FNA	Com	3	67,1	47,5	61,8	176,5
FNA	Com	4	68,1	54,1	67,7	189,9
<b>Média</b>			<b>69,9</b>	<b>68,0</b>	<b>58,2</b>	<b>196,2</b>

## **8. ANEXOS**

**Anexo 1.** Esquema simplificado da análise de variância de um ensaio fatorial  $2^2 + 1$  delineado em blocos ao acaso com quatro repetições.

Fonte de variação	Graus de liberdade (GL)
Fatorial vs testemunha	1
Fonte de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1
Reaplicação	1
Fonte de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> vs Reaplicação	1
Erro experimental	15
Total	19

**Anexo 2.** Coeficientes de correlação entre as variáveis fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz (colmo, folhas e grãos) em g m<sup>-2</sup> e as frações inorgânicas de fósforo (Pi) em mg kg<sup>-1</sup> na área de resteva de milho e soja em sistema plantio direto em função de fontes de adubação fosfatada (Superfosfato Triplo - SFT e Fosfato Natural Reativo de Arad - FNA).

Variáveis	Pi RTA	Pi NaHCO <sub>3</sub>	Pi NaOH 0,1	Pi HCl	Pi NaOH 0,5	P residual
----- Área Resteva Milho -----						
P acumulado	0,90**	0,92**	0,91**	0,84**	0,67**	0,51*
----- Área Resteva Soja -----						
P acumulado	0,75**	0,73**	0,64**	0,55*	ns	0,54*

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

ns Não Significativo

**Anexo 3.** Coeficientes de correlação entre as variáveis fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz (colmo, folhas e grãos) em g m<sup>-2</sup> e as frações orgânicas de fósforo (Po) em mg kg<sup>-1</sup> na área de resteva de milho e soja em sistema plantio direto em função de fontes de adubação fosfatada (Superfosfato Triplo - SFT e Fosfato Natural Reativo de Arad - FNA).

Variáveis	Po NaHCO <sub>3</sub>	Po NaOH 0,1	Po NaOH 0,5
----- Área Resteva Milho -----			
P acumulado	ns	0,46*	ns
----- Área Resteva Soja -----			
P acumulado	ns	0,58**	ns

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

ns Não Significativo

**Anexo 4.** Coeficientes de correlação entre as variáveis fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz (colmo, folhas e grãos) em g m<sup>-2</sup> e as frações inorgânicas de fósforo (Pi) em mg kg<sup>-1</sup> nas áreas de resteva de milho e soja em sistema plantio direto em função de fontes de adubação fosfatada (Superfosfato Triplo - SFT e Fosfato Natural Reativo de Arad - FNA).

Variáveis	Pi RTA	Pi NaHCO <sub>3</sub>	Pi NaOH 0,1	Pi HCl	Pi NaOH 0,5	P residual
----- Testemunha S/Adub. -----						
P acumulado	ns	ns	ns	ns	ns	ns
----- Dose recomendada S/Reap. -----						
P acumulado	ns	ns	ns	ns	ns	ns
----- Dose recomendada C/Reap. -----						
P acumulado	0,63**	0,60*	0,64**	ns	ns	ns

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

ns Não Significativo.

**Anexo 5.** Coeficientes de correlação entre as variáveis fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz (colmo, folhas e grãos) em g m<sup>-2</sup> e as frações de P lável (P RTA e P NaHCO<sub>3</sub>); P pouco lável (P NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>) e P não lável (P NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P HCl e P residual) em mg kg<sup>-1</sup> nas áreas de resteva de milho e soja em sistema plantio direto em função de fontes de adubação fosfatada (Superfosfato Triplo - SFT e Fosfato Natural Reativo de Arad - FNA).

Variáveis	P lável	P pouco lável	P não lável
<i>Área Resteva Milho</i>			
P acumulado	ns	ns	ns
P acumulado	0,73*	0,89**	ns
<i>Área Resteva Soja</i>			
P acumulado	ns	ns	ns
P acumulado	ns	ns	ns
P acumulado	0,79*	ns	ns

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

nsNão Significativo.

**Anexo 6.** Coeficientes de correlação entre as variáveis fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz (colmo, folhas e grãos) em g m<sup>-2</sup> e as frações de P lábil (P RTA e P NaHCO<sub>3</sub>); P pouco lábil (P NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>) e e P não lábil (P NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P HCl e P residual) em mg kg<sup>-1</sup> nas áreas de resteva de milho e soja em sistema plantio direto em função de fontes de adubação fosfatada (Superfosfato Triplo - SFT e Fosfato Natural Reativo de Arad - FNA). Tratamentos, áreas e frações de P juntas.

Variáveis	P lábil	P pouco lábil	P não lábil
P acumulado	0,82**	0,83**	0,60**

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

<sup>ns</sup>Não Significativo.

**Anexo 7.** Coeficientes de correlação entre as variáveis fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz (colmo, folhas e grãos) em g m<sup>-2</sup> e as frações de P inorgânico (Pi) em mg kg<sup>-1</sup> nas áreas de resteva de milho e soja em sistema plantio direto em função de fontes de adubação fosfatada (Superfosfato Triplo - SFT e Fosfato Natural Reativo de Arad - FNA).

Variáveis	Pi RTA	Pi NaHCO <sub>3</sub>	Pi NaOH 0,1	Pi HCl	Pi NaOH 0,5	P residual
----- Área Resteva Milho -----						
----- Testemunha S/Adub. -----						
P acumulado	0,96**	ns	ns	ns	ns	ns
----- Dose recomendada S/Reap. -----						
P acumulado	ns	ns	ns	ns	ns	ns
----- Dose recomendada C/Reap. -----						
P acumulado	ns	ns	ns	ns	ns	ns
----- Área Resteva Soja -----						
----- Testemunha S/Adub. -----						
P acumulado	ns	ns	ns	ns	ns	ns
----- Dose recomendada S/Reap. -----						
P acumulado	ns	ns	ns	ns	ns	ns
----- Dose recomendada C/Reap. -----						
P acumulado	ns	ns	ns	ns	ns	ns

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

ns Não Significativo.

**Anexo 8 - Fracionamento do fósforo do solo (HEDLEY et al., 1982 com modificações de Condron et al., 1985).**

Soluções utilizadas:

$\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 42 g de  $\text{NaHCO}_3$  para becker de 1000 ml e adicionar 900 ml de água destilada. Ajustar o pH a 8,5 com o uso de NaOH ou HCl. Transferir para balão de 1000 ml e completar o volume. Preparar a solução imediatamente antes do uso.

$\text{NaCl}$  0,5 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 29,25 g de  $\text{NaCl}$  para becker de 1000 ml e adicionar 900 ml de água destilada. Transferir para balão de 1000 ml e completar o volume.

$\text{NaOH}$  0,1 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 4 g de  $\text{NaOH}$  para becker de 1000 ml e adicionar 900 ml de água destilada. Transferir para balão de 1000 ml e completar o volume.

$\text{HCl}$  1,0 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar 84 ml de HCl concentrado em becker de 1000 ml contendo 700 ml de água destilada. Transferir para balão de 1000 ml e completar o volume.

$\text{HCl}$  0,5 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar 42 ml de HCl concentrado em becker de 1000 ml contendo 700 ml de água destilada. Transferir para balão de 1000 ml e completar o volume.

$\text{NaOH}$  0,5 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 20 g de  $\text{NaOH}$  para becker de 1000 ml e adicionar 900 ml de água destilada. Transferir para balão de 1000 ml e completar o volume.

Procedimento de análise:

**Etapa 1: Extração com Resina**

- a) Pesar 1,5 gramas de solo para tubo de centrífuga;
- b) Adicionar 30 ml de água destilada;
- c) Adicionar 1 lâmina de RTA saturada com  $\text{NaHCO}_3$ , de acordo com Tedesco (1995);
- d) Agitar por 16 horas no end-over-end; (*Procurar colocar para agitar sempre no final de uma tarde*).
- d) Retirar a RTA do tubo com auxílio de uma pinça;
- e) Lavar o excesso de solo da Resina com água destilada com uma pisceta;
- f) Colocar a resina em snapcap contendo 30 ml de  $\text{HCl}$  0,5 mol L<sup>-1</sup>;
- g) Deixar em repouso por 90 minutos com a tampa aberta para evolução do  $\text{CO}_2$ ;
- h) Agitar por 30 minutos em agitador horizontal (100 -110 rpm);
- i) Retirar a Resina com auxílio de uma pinça;
- j) Determinar fósforo inorgânico no extrato de  $\text{HCl}$  0,5 mol L<sup>-1</sup> pelo **Anexo A**.

**Etapa 2: Extração com  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup>**

- a) Adicionar 30 ml de  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup>;
- b) Agitar manualmente para soltar o solo do fundo do tubo;
- c) Agitar por 16 horas no end-over-end;
- d) Centrifugar à 3000 rpm por 15 minutos (*Depende da textura do solo, se for muito argilosa talvez precise mais tempo ou mais rpm*);
- e) Reservar o sobrenadante para análise de fósforo inorgânico conforme **Anexo C** e para análise de fósforo total conforme **Anexo D** e **Anexo B**;
- f) Adicionar 30 ml de  $\text{NaCl}$  0,5 mol L<sup>-1</sup> com cuidado para não mexer o solo;

- g) Centrifugar a 3000 rpm por 5 minutos e adicionar o sobrenadante ao extrato anterior.  
*(O NaCl serve como uma solução de limpeza entre um extrator e outro, não esquecer que terá uma diluição na quantidade de P nesse e nos demais extratos).*

**Etapa 3:** Extração com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>

- a) Adicionar 30 ml de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>;
- b) Agitar manualmente para soltar o solo do fundo do tubo;
- c) Agitar por 16 horas no end-over-end;
- d) Centrifugar à 3000 rpm por 15 minutos;
- e) Reservar o sobrenadante para análise de fósforo inorgânico conforme **Anexo C** e para análise de fósforo total conforme **Anexo D** e **Anexo B**;
- f) Adicionar 30 ml de NaCl 0,5 mol L<sup>-1</sup> com cuidado para não mexer o solo;
- g) Centrifugar a 3000 rpm por 5 minutos e adicionar o sobrenadante ao extrato anterior.

**Etapa 4:** Extração com HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>

- a) Adicionar 30 ml de HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>;
- b) Agitar manualmente para soltar o solo do fundo do tubo;
- c) Agitar por 16 horas no end-over-end;
- d) Centrifugar a 6000 rpm por 15 minutos;
- e) Reservar o sobrenadante para análise de fósforo inorgânico conforme **Anexo B**;
- f) Adicionar 30 ml de NaCl 0,5 mol L<sup>-1</sup> com cuidado para não mexer o solo;
- g) Centrifugar a 3000 rpm por 5 minutos e adicionar o sobrenadante ao extrato anterior.

**Etapa 5:** Extração com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>

- a) Adicionar 30 ml de NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>;
- b) Agitar manualmente para soltar o solo do fundo do tubo;
- c) Agitar por 16 horas no end-over-end;
- d) Centrifugar a 3000 rpm por 15 minutos;
- e) Reservar o sobrenadante para análise de fósforo inorgânico conforme **Anexo C** e para análise de fósforo total conforme **Anexo D** e **Anexo B**;
- f) Adicionar 30 ml de NaCl 0,5 mol L<sup>-1</sup> com cuidado para não mexer o solo;
- g) Centrifugar a 3000 rpm por 5 minutos e adicionar o sobrenadante ao extrato anterior.

**Etapa 6:** Extração do fósforo residual

- a) Secar o solo em estufa a 50°C (*Pode deixar o solo secar no próprio tubo de centrifuga com tampa aberta, depois retira e passa para um pequeno Becker para desmanchar os torrõesinhos*) e digerir o solo conforme **Anexo E** e **Anexo B**.

**Anexo 9.** Curvas padrões utilizadas para análise das frações de fósforo.

Curva padrão para extratos ácidos (Adaptado de Santos, 2000).

Parte-se de uma solução padrão de  $100 \text{ mg L}^{-1}$  de P, pipeta-se alíquotas para balões volumétricos constituindo-se os padrões de 0,0; 0,1; 0,2; 0,4  $\text{mg L}^{-1}$  (*sempre com a mesma solução que fez a extração do solo, Ex.: HCl*). Destes padrões, pipeta-se 8 ml para copos de cafezinho, adicionando-se em seguida 8 ml de água destilada, duas gotas de p-nitrofenol e NaOH 10 mol  $\text{L}^{-1}$  até o aparecimento da cor amarela. Em seguida, adiciona-se 1 ml da solução de Murphy e Riley e após 30 minutos lê-se a absorbância em 882 nm.

Curva padrão para extratos alcalinos (Adaptado de Santos, 2000).

Parte-se de uma solução padrão de  $100 \text{ mg L}^{-1}$  de P, prepara-se um padrão de 0,8  $\text{mg L}^{-1}$  (*sempre com a mesma solução que fez a extração do solo, Ex.: NaOH*). Deste padrão, pipeta-se 0; 1; 2; 4 e 6 ml para copos de cafezinho contendo 10 ml da solução A. Em seguida adiciona-se 2 ml da solução B e 5 ml da solução C. Completa-se o volume para 25 ml com água destilada e após 15 minutos lê-se a absorbância em 700 nm.

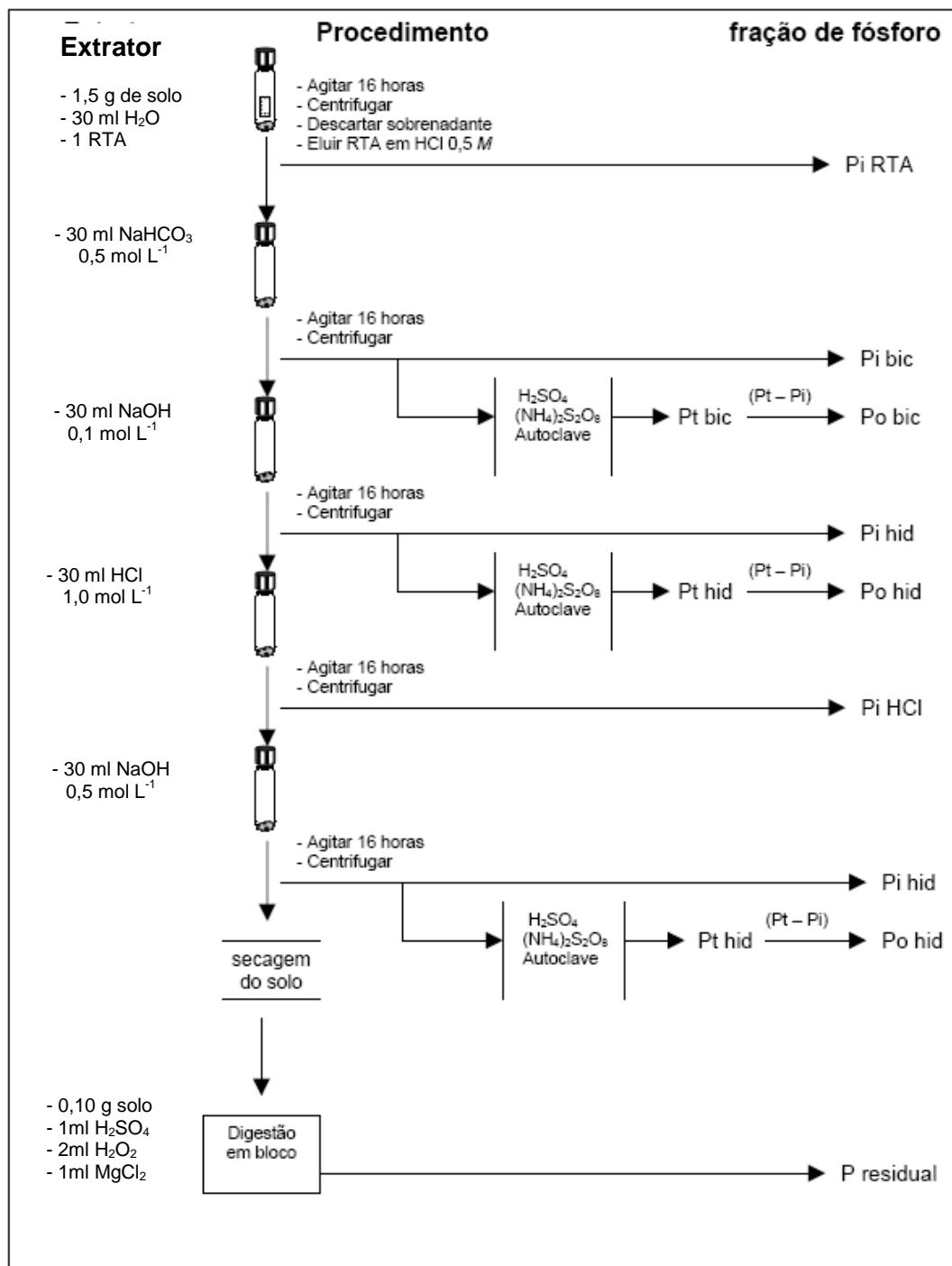
**Anexo 10.** Preparo e recuperação das resinas trocadoras de ânions (RTA).

- O preparo das RTA deve ser realizado quando as mesmas forem novas (Ver Tedesco et al, 1995).

**\* Recuperação:**

- Eluir as RTA com HCl 0,5 mol L<sup>-1</sup> (1000 ml, 2 vezes, meia hora por vez);
- Lavar com água destilada (1000 ml, 2 vezes, meia hora por vez). Deixar em água destilada até o dia de uso.
- Saturar com NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> (1000 ml, 2 vezes, 1 hora por vez) no dia de uso, agitando intermitentemente (pH 8,5).
- Lavar com água destilada (3 vezes), e as resinas estarão prontas para o uso.

**Anexo 11.** Técnica de fracionamento de fósforo.



Esquema da técnica do fracionamento de fósforo proposto por Hedley et al. (1982) com modificações de Condron et al. (1985). Adaptado de Gatiboni (2005).

**Anexo 12.** Algumas observações relevantes para a realização das análises de fósforo pelo fracionamento.

Sempre que possível utilizar materiais (vidrarias, tubos de centrífuga etc.) novos para evitar contaminações. Caso não seja possível, procure lavar o material com solução de limpeza HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> e água destilada, nunca utilize sabão ou detergentes pois contêm fósforo e contaminará as amostras.

O processo de fracionamento do solo é lento, então faça um cronograma semanal tendo em vista que a análise é contínua. No início quando não se tem prática pode-se fazer a extração e guardar os extratos na geladeira para analisar na semana seguinte. Procure trabalhar com no máximo 30 amostras de solo por vez, pois ao final elas se multiplicarão para 270 extratos para analisar, no caso de quatro blocos, neste trabalho, foram 1080 extratos para analisar.

**Anexo A.** Fósforo disponível pela Resina (TEDESCO et al., 1995).

*Procedimento de análise:*

- a) Pipetar 3 ml do extrato de eluição, em copo plástico;
- b) Adicionar 3 ml do molibdato de amônio;
- c) Adicionar 3 gotas da solução P-C;
- d) Determinar a absorbância em 660 nm, após 15 minutos.

**Anexo B.** Determinação de fósforo em extratos ácidos do solo (MURPHY e RILEY, 1962).

Soluções: Prepará-las na capela.

Solução A: Dissolver 15,35 g de  $(\text{NH}_4)\text{MO}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  com 200 ml de água destilada em becker de 500 ml. Dissolver 0,3511 g de  $\text{K}(\text{SbO})\text{H}_4\text{C}_4\text{O}_6 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$  com 100 ml de água destilada em becker de 200 ml. Colocar 300 ml de água destilada em becker de 1000 ml e adicionar lentamente 178 ml de ácido sulfúrico concentrado (*Cuidado pode causar sérias queimaduras*). Após esfriar, transferir para balão volumétrico de 1000 ml, adicionarem as soluções de molibdato de amônio e antimoniato de potássio e ajustar o volume com água destilada.

Solução B: Dissolver 1,356 g  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$  (ácido ascórbico) com 100 ml de solução A em balão volumétrico. (*Esta solução deve ser preparada no momento de uso*).

$\text{NaOH } 10 \text{ mol L}^{-1}$ : Dissolver 400 g de  $\text{NaOH}$  em 600 ml de água destilada em becker de 1000 ml. Após esfriar, transferir para balão volumétrico 1000 ml e completar o volume com água destilada. Armazenar em frasco plástico.

p-nitrofenol 0,25%: pesar 0,25 g de p-nitrofenol e dissolver em 100 ml de água destilada em balão volumétrico. Armazenar em geladeira em frasco escuro.

Procedimento de análise:

- a) Pipetar uma alíquota do extrato para copo de cafezinho;
- b) Adicionar água destilada para atingir volume de 8 ml;
- c) Adicionar duas gotas de p-nitrofenol 0,25%;
- d) Neutralizar a solução com  $\text{NaOH } 10 \text{ mol L}^{-1}$  gota a gota (*Pode usar um conta-conta-gota de plástico. A neutralização parcial do extrato ocorre quando há mudança de cor do extrato, geralmente passando de transparente para amarelo*);
- e) Adicionar 1 ml de solução B;
- f) Ler a absorbância em 882 nm após 30 minutos.

**Anexo C.** Determinação de fósforo inorgânico em extratos alcalinos do solo (DICK e TABATABAI, 1977).

Soluções:

Solução A: Dissolver 8,80 g de  $C_6H_8O_6$  (ácido ascórbico) e 41,0 g de ácido tricloroacético com 400 ml de água destilada em Becker de 500 ml. Transferir para balão volumétrico de 500 ml e completar o volume com água destilada (*Esta solução deve ser preparada no momento de uso*).

Solução B: Dissolver 6,20 g de  $(NH_4)MO_7O_{24} \cdot 4H_2O$  com 400 ml de água destilada em Becker de 500 ml. Transferir para balão volumétrico de 500 ml e completar o volume com água destilada.

Solução C: Dissolver 29,40 g de citrato de sódio (*dissolver bem em 300 ml de água destilada*) e 26 g de arsenito de sódio (*dissolver separadamente em 300 ml de água destilada*) passar para um Becker de 1000 ml. Adicionar 50 ml de ácido acético glacial (99%). Transferir para balão volumétrico de 1000 ml e completar o volume com água destilada.

Procedimento de análise:

- a) Adicionar 10 ml de solução A em copo de cafezinho;
- b) Adicionar uma alíquota de 5 ml do extrato;
- c) Adicionar 2 ml de solução B;
- d) Adicionar 5 ml de solução C;
- e) Completar o volume até 25 ml;
- f) Ler a absorbância no colorímetro em 700 nm após 15 minutos

**Anexo D.** Digestão dos extratos alcalinos do solo (extraídos com NaOH e NaHCO<sub>3</sub>) para análise do fósforo total (USEPA, 1971)

Soluções:

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1:1: Adicionar, vagarosamente, 500 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado em 500 ml de água destilada. Esperar esfriar, transferir para balão volumétrico de 1000 ml e completar o volume com água destilada.

Persulfato de amônio 7,5%: Dissolver 75 g de persulfato de amônio em 800 ml de água destilada. Transferir para balão volumétrico de 1000 ml e completar o volume com água destilada.

Procedimento de análise:

- a) Pipetar uma alíquota de 4 ml do extrato alcalino em snapcap; ;
- b) Adicionar 10 ml de persulfato de amônio 7,5%;
- c) Adicionar 1 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1:1;
- d) Cobrir o snap com papel alumínio (*Pode ser só na parte superior, não esquecer de identificar cada amostra com etiquetas escritas a lápis, pois com o vapor a tinta de caneta pode borrar*);
- e) Autoclavar a 121°C e 103 kPa por +/- 2 horas (*Atenção: acompanhar de perto a subida da temperatura até 121°C e passar para o “médio” só então sair do laboratório. Retornar periodicamente para ver se está tudo certo*).
- f) Deixar esfriar e completar o volume para 20 ml utilizando proveta;
- g) Determinar fósforo conforme **Anexo B**.

**Anexo E.** Digestão do resíduo do solo para análise do fósforo total (BROOKES e POWLSON, 1982).

Soluções:

Solução MgCl<sub>2</sub> saturado: Adicionar MgCl<sub>2</sub> em água destilada até a saturação da solução (*É visual, vai colocando MgCl<sub>2</sub> até que parte não se dissolva mais no fundo do Becker, fica meio cristalizado*). Tendo uma boa quantidade de MgCl<sub>2</sub> já é suficiente, pois ele serve para não deixar o P volatilizar na forma de fosfina.

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado.

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrado.

Procedimento de análise:

- a) Pesar 0,10 g de solo em tubo de digestão;
- b) Adicionar 1 ml de MgCl<sub>2</sub> saturado;
- c) Adicionar 1 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado;
- d) Colocar funil de refluxo no tubo de digestão;
- e) Aquecer por 1 hora no bloco digestor a 200°C (*Se o solo for muito arenoso a temperatura não deve ultrapassar 150°C, pois a sílica presente no solo faz o funil de refluxo saltar e poderá ocorrer contaminação entre as amostras*);
- f) Deixar esfriar e adicionar 2 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrado;
- g) Aquecer por 1 hora no bloco digestor a 100°C;
- h) Deixar esfriar e completar o volume a 50 ml;
- i) Determinar conforme **Anexo B**.