

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

EDUARDO STAUFFER

**FERTILIZANTE DE EFICIÊNCIA AUMENTADA: ADSORÇÃO E FLUXO  
DIFUSIVO DE FÓSFORO**

ALEGRE - ES

2016

EDUARDO STAUFFER

**FERTILIZANTE DE EFICIÊNCIA AUMENTADA: ADSORÇÃO E FLUXO  
DIFUSIVO DE FÓSFORO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal na área de concentração de Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Sc. Felipe Vaz Andrade

ALEGRE - ES

2016

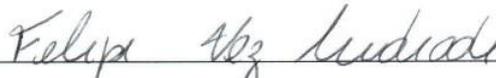
EDUARDO STAUFFER

**FERTILIZANTE DE EFICIÊNCIA AUMENTADA: ADSORÇÃO E FLUXO  
DIFUSIVO DE FÓSFORO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal na área de concentração Solos e Nutrição de Plantas.

Aprovada em 19 de fevereiro de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA



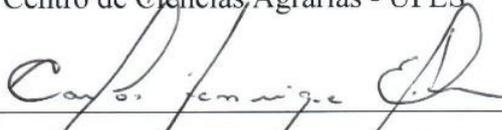
Prof. Dr. Sc. Felipe Vaz Andrade  
Centro de Ciências Agrárias - UFES  
Orientador



Prof. PhD. Sc. Eduardo de Sá Mendonça  
Centro de Ciências Agrárias - UFES  
Coorientador



Prof. Dr. Sc. Renato Ribeiro Passos  
Centro de Ciências Agrárias - UFES



Prof. Dr. Sc. Carlos Henrique Eiterer de Souza  
Centro Universitário de Patos de Minas - UNIPAM



Pesquisador Dr. Sc. José Carlos Polidoro  
Embrapa Solos

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

S798f Stauffer, Eduardo, 1990-  
Fertilizantes de eficiência aumentada: adsorção e fluxo difusivo de fósforo / Eduardo Stauffer. - 2016.  
79 f. : il.

Orientador: Felipe Vaz Andrade.

Coorientador: Eduardo de Sá Mendonça.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Fertilizantes de liberação lenta. 2. Fertilizantes fosfatados. 3. Adsorção.  
I. Andrade, Felipe Vaz. II. Mendonça, Eduardo de Sá. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDU: 63

---

## **DEDICO**

A Deus;

Aos meus pais, Israel e Luzimar, pelo exemplo de vida e dedicação na minha educação.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, que é a razão do nosso viver e está presente em todos os dias da minha vida, guiando meus passos e mostrando o melhor caminho a seguir;

Aos meus pais, Israel e Luzimar, pelo incentivo e por não medir esforços em me proporcionar uma educação de qualidade;

À minha namorada Laís, pelo carinho, companheirismo, compreensão e por tornar minha vida mais feliz;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da bolsa;

A Universidade Federal do Espírito Santo, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade de realização deste curso;

Ao professor e orientador Felipe Vaz Andrade pela amizade, confiança e dedicação aos ensinamentos que contribuíram para meu treinamento, desde o período de graduação;

Aos pesquisadores da Embrapa Solos, Guilherme Kangussú Donagemma, José Carlos Polidoro e Davi, e à funcionária Bianca Braz Mattos, pelas contribuições nesse trabalho;

Aos professores, Eduardo de Sá Mendonça e Renato Ribeiro Passos, pela amizade, ensinamentos e colaborações prestadas para a elaboração deste trabalho;

Ao professor Carlos Henrique Eiterer de Souza pelas contribuições para a elaboração deste trabalho;

Aos estudantes e amigos, Lucas Santos Satiro, Amanda Faé Sartori, Lais Lemos, Ingrid, Danilo, Pedro e Fabiano, pelas contribuições na montagem dos experimentos e nas análises laboratoriais desse trabalho;

Aos funcionários do Centro de Ciências Agrárias da UFES, em especial aos que atuam no Laboratório de Física e Química do Solo;

Aos amigos de pós-graduação Paulo Roberto, Victor Maurício, Ramires, Paulo Henrique, Abel, Cristiano, Marjorie, Kelly, Ariany, Lucas, Paula Mauri e tantos outros, pela convivência e amizade;

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de um modo ou de outro, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO GERAL

STAUFFER, Eduardo. Universidade Federal do Espírito Santo. Fevereiro de 2016.  
**Fertilizante de eficiência aumentada: adsorção e fluxo difusivo de fósforo.**  
Orientador: Dr. Sc. Felipe Vaz Andrade. Coorientador: PhD. Sc. Eduardo de Sá Mendonça.

Objetivou-se nesse trabalho avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados polimerizado e organofosfatados aplicados ao solo, em diferentes potenciais matriciais e sua relação com a adsorção e o fluxo difusivo de fósforo (P). Para tal, foram montados dois experimentos. O primeiro experimento seguiu esquema de parcelas subdivididas no tempo, sendo a parcela principal composta por quatro fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônico convencional - MAP; fosfato monoamônico revestido com polímero - POL; fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro - TF; e fosfato monoamônico granulado com composto suíno - CS) e dois potenciais matriciais (- 10 e - 50 kPa); e a subparcela composta por seis tempos de contato (2, 4, 6, 8, 10 e 14 dias após a adição dos fertilizantes), com quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância, sendo que os efeitos dentro dos fatores qualitativos foram desdobrados em contrastes ortogonais e para o fator quantitativo foram ajustados modelos de regressão. Os fertilizantes organofosfatados proporcionaram liberação mais lenta de P para a solução do solo, em que o CS promoveu a liberação mais lenta de P. O CS apresentou as menores reduções nos teores de P disponível ao longo dos tempos de contato, seguidos do TF, POL e MAP. Os potenciais matriciais permitiram a diferenciação dos fertilizantes fosfatados estudados na disponibilidade de P, onde o MAP foi mais influenciado pelos potenciais. O segundo experimento seguiu esquema fatorial 4x2x4 em que os fatores em estudo foram: quatro fertilizantes fosfatados (MAP, POL, TF e CS), dois potenciais matriciais (- 10 e - 50 kPa) e quatro distâncias de inserção da resina de troca aniônica (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 cm distantes dos grânulos dos fertilizantes fosfatados), com quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e desdobrados em contrastes ortogonais. O MAP apresentou os maiores valores de fluxo difusivo de P, seguidos do POL, TF e CS. As tecnologias controlaram melhor a liberação de P para ambos os potenciais, onde o MAP foi mais influenciado pelos potenciais. Em condições de maior umidade (potencial matricial de - 10 kPa) houve maior fluxo difusivo de P em relação ao potencial matricial de - 50 kPa.

**Palavras-Chave:** difusão, fertilizante fosfatado, fertilizantes de liberação lenta.

## GENERAL ABSTRACT

STAUFFER, Eduardo. Federal University of Espírito Santo. February of 2016.  
**Increased efficiency fertilizer: phosphorus adsorption and diffusive flux.** Advisor:  
Dr. Sc. Felipe Vaz Andrade. Co-advisor: PhD. Sc. Eduardo de Sá Mendonça.

This work aimed to evaluate the effect of phosphate fertilizers and polymerized organophosphate applied to the soil at different matric potentials and its relationship with adsorption and diffusive flux of P. To this end, were mounted two experiments. The first experiment was split plot in time, the main portion consists of four phosphate fertilizers (conventional monoammonium phosphate - MAP, monoammonium phosphate coated with polymer - POL, monoammonium phosphate pelletized with filter cake - TF, and monoammonium phosphate granules with composed pig - CS) and two matric potentials (- 10 and - 50 kPa); and subplot comprises six contact times (2, 4, 6, 8, 10 and 14 days after addition of fertilizer), with four replications. Data were submitted to analysis of variance, and the effects with in the qualitative factors were broken down into orthogonal contrasts and the quantitative factor regression models were adjusted. The organophosphate fertilizers provided slower release of P to the soil solution, wherein the CS promoted slower release P. CS had the lowest reduction in P content available over the contact times, followed TF, POL and MAP. The matric potentials allowed differentiation of phosphate fertilizers studied the availability of P, where the MAP was more influenced by the potential. The second experiment followed a factorial 4x2x4 in which the factors studied were: four phosphate fertilizers (MAP, POL, TF and CS), two matric potentials (- 10 and - 50 kPa) and four resin insertion distances anion exchange (0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 cm distant from beads of phosphate fertilizers), with four replications. Data were submitted to analysis of variance and broken down into orthogonal contrasts. MAP showed the largest diffusive flux values of P, followed by POL, TF and CS. The best controlled release technologies R for both potential, where MAP is more influenced by the potential. In higher humidity conditions (matric potential of - 10 kPa) was higher diffusive flux of P in relation to the matric potential of - 50 kPa.

**Keywords:** diffusion, phosphate fertilizer, slow release fertilizer.

# FERTILIZANTE DE EFICIÊNCIA AUMENTADA: ADSORÇÃO E FLUXO DIFUSIVO DE FÓSFORO

## SUMÁRIO

RESUMO GERAL .....	iii
GENERAL ABSTRACT.....	iv
CAPÍTULO 1 - ADSORÇÃO DE FÓSFORO E TECNOLOGIAS EM FERTILIZANTES FOSFATADOS .....	11
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. ADSORÇÃO DE FÓSFORO .....	12
3. FATORES QUE INTERFEREM NA ADSORÇÃO DE FÓSFORO .....	14
3.1. Matéria orgânica .....	14
3.2. Tempo de contato .....	16
3.3. Fontes de fósforo .....	17
4. TRANSPORTE DE FÓSFORO .....	19
5. TECNOLOGIAS EM FERTILIZANTES FOSFATADOS .....	21
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	26
CAPÍTULO 2 - FERTILIZANTE FOSFATADO POLIMERIZADO E ORGANOFOSFATADOS E A ADSORÇÃO DE FÓSFORO NO SOLO .....	33
RESUMO .....	33
ABSTRACT .....	34
1. INTRODUÇÃO.....	35
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
4. CONCLUSÕES .....	50
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	51
APÊNDICE .....	56

CAPÍTULO 3 - FERTILIZANTE FOSFATADO POLIMERIZADO E ORGANOFOSFATADOS E O FLUXO DIFUSIVO DE FÓSFORO NO SOLO .....	61
RESUMO .....	61
ABSTRACT .....	62
1. INTRODUÇÃO.....	63
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	64
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	67
4. CONCLUSÕES .....	73
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74
APÊNDICE .....	78

## CAPÍTULO 1

### ADSORÇÃO DE FÓSFORO E TECNOLOGIAS EM FERTILIZANTES FOSFATADOS

#### 1. INTRODUÇÃO

Nos solos de regiões tropicais, de maneira geral, o fósforo (P) é considerado um dos nutrientes mais limitantes para a produção agrícola. Esses solos são altamente intemperizados, predominando argilominerais 1:1 e óxidos de ferro (Fe) e de alumínio (Al). Estes minerais possuem elevada capacidade de adsorção de P, sendo esta característica um dos fatores que controla a disponibilidade deste nutriente.

As reações de troca de ligantes OH da superfície dos óxidos de Fe e de Al por fosfato da solução, são conhecidas como adsorção específica (Novais et al., 2007), e promovem a baixa disponibilidade de P na solução do solo.

Geralmente, o teor total de P dos solos varia de 200 e 3.000 mg kg<sup>-1</sup> de P, entretanto menos de 0,1 % desse total encontra-se na solução do solo. Segundo Fardeau (1996), os teores de P em solução nos solos agrícolas estão, com frequência, entre 0,002 e 2 mg L<sup>-1</sup> de P. Em condições extremas de intemperismo, como em alguns Latossolos com mineralogia mais oxídica, o solo pode adsorver mais de 2 mg cm<sup>-3</sup> de P (Ker et al., 1996). Este valor equivale a 4.000 kg ha<sup>-1</sup> de P, ou 9.200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, incorporados na profundidade de 0 a 20 cm.

Além da composição mineralógica, a adsorção de P também é influenciada pela umidade do solo, densidade do solo, pH do solo, teor de matéria orgânica, assim como, o tipo de fertilizante fosfatado utilizado.

Em relação aos fertilizantes fosfatados, têm-se buscado alternativas tecnológicas para aumentar a eficiência das fontes de P utilizadas para que seja possível diminuir a intensidade de adsorção de P no solo, tornando-o mais disponível para as plantas. Os fertilizantes revestidos com polímeros têm por finalidade disponibilizar por um maior período de tempo os nutrientes para as plantas e aumentar a eficiência de absorção (Trenkel, 2010), e no caso específico do P, reduzir as perdas por adsorção.

O revestimento de fertilizante fosfatado (fosfato monoamônico, superfosfato triplo, superfosfato simples) pode ser realizado com até três camadas de aditivos especiais, que envolvem os grânulos dos fertilizantes, adicionando-se na última camada um corante para diferenciá-lo do convencional (Ferreira, 2010). Segundo o autor, esse

revestimento possibilita uma liberação lenta do nutriente contido no grânulo, diminuindo as perdas por adsorção.

Outra alternativa que tem sido estudada para diminuir a intensidade do fenômeno de adsorção de P é a utilização de fertilizantes organofosfatados. A mistura do fertilizante fosfatado com material orgânico previne o contato direto do P com a fase sólida do solo (óxidos de Fe e Al e argilas silicatadas), podendo reduzir as perdas por adsorção (Souza, 2014).

## **2. ADSORÇÃO DE FÓSFORO**

Os solos tropicais são altamente intemperizados e caracterizam-se pela predominância de argilominerais 1:1 e óxidos de Fe e de Al. Estes minerais possuem elevada capacidade de adsorção de P, ocasionando a baixa disponibilidade desse nutriente na solução do solo. O termo adsorção é aqui empregado englobando os fenômenos de adsorção e precipitação, como tem sido mais usado na literatura (Novais e Smyth, 1999).

A precipitação do P no solo ocorre quando o P em solução reage com as formas iônicas de Al e de Fe, em solos ácidos ou com Ca em solos básicos, formando compostos pouco solúveis (Novais et al., 2007).

A adsorção de P à superfície dos minerais de argilas é denominada de adsorção específica e ocorre por troca de ligantes que se dá nos sítios ácidos de Lewis, em que os grupos OH e OH<sub>2</sub>, previamente coordenados aos cátions Fe ou Al são deslocados pelos íons fosfatos em solução (Goldberg e Sposito, 1985; Tiecher et al., 2012).

Esse fenômeno acontece inicialmente com uma fase rápida, caracterizada pela atração eletrostática entre o ânion fosfato e a superfície adsorvente. Com a aproximação do fosfato à superfície adsorvente, há a troca de ligantes, com a formação de ligações coordenadas simples (Novais e Smyth, 1999). Nessa fase, o fosfato adsorvido que se encontra em equilíbrio com o fosfato em solução (P-solução) é denominado P-lábil. Com o envelhecimento dessa ligação, dois oxigênios do fosfato se ligam ao metal, sendo essa ligação denominada de bidentada. Essa ligação é feita com uma força que não permite que o P fique em equilíbrio com a solução (P não lábil), desta maneira a reposição do P pela fase sólida não ocorrerá, diminuindo assim a concentração de P na solução do solo (Novais et al., 2007; Fernández et al., 2008).

Vários fatores afetam a adsorção de P nos solos intemperizados, tais como: pH (Chaves et al., 2009), umidade (Bastos et., 2008), matéria orgânica (Andrade et al., 2003), tipo de fertilizantes fosfatados utilizados, assim como, a mineralogia da fração argila dos solos (Gonçalves et al., 2011).

Os óxidos de Fe e de Al são os constituintes da fração argila que mais influenciam na adsorção de P (Almeida et al., 2003), sendo a goethita considerada o principal componente da fração argila responsável por este fenômeno (Bahia Filho, 1983). A ordem preferencial dos constituintes mineralógicos da fração argila responsáveis pela adsorção de P em solos ácidos é a seguinte: goethita > hematita > gibbsita > caulinita (Souza et al. 1991).

Ker et al. (1996) observaram que a influência da caulinita no processo de adsorção de P é secundária, em comparação aos óxidos de Fe e Al. Os autores verificaram que o aumento do caráter caulínítico em diversos Latossolos brasileiros ocasionava a redução da capacidade de adsorção de P.

Com relação aos óxidos de Fe, minerais determinantes na capacidade de adsorção de P, a presença de hematita nos solos determina menor adsorção de P do que solos com alta quantidade de goethita, devido à baixa acessibilidade aos sítios de adsorção da hematita (Colombo et al., 1991).

Motta et al. (2002), estudando a influência da mineralogia na adsorção de P em Latossolos, verificaram que à medida que a mineralogia dos solos estudados tornou-se mais oxídica a adsorção de P aumentou, e conseqüentemente diminuiu os teores de P disponível. Comportamento semelhante foi observado por Souza et al. (2006) estudando a adsorção de P em quatro solos com diferentes texturas e mineralogias.

Eberhardt et al. (2008), avaliando a influência da mineralogia na adsorção de P em Latossolos, observaram que os óxidos de Fe e Al foram os componentes mineralógicos que mais influenciaram na adsorção de P, diminuindo a disponibilidade desse nutriente.

Estudando a adsorção de P em solos do Alto do Paranaíba em Minas Gerais, Rolin Neto et al. (2004) observaram que a percentagem e a área superficial dos óxidos de Fe e Al, respectivamente goethita e gibbsita, têm participação no aumento da adsorção de P. Tem sido constatado na literatura que a goethita, pelos seus teores, e principalmente, pela sua área específica mais elevada, assume papel preponderante na adsorção de P, devido à presença de maior número de grupamentos OH, aumentando as reações da superfície desse mineral com o P (Parfitt, 1989).

### **3. FATORES QUE INTERFEREM NA ADSORÇÃO DE FÓSFORO**

#### **3.1. Matéria orgânica**

Vários trabalhos na literatura comprovam que a matéria orgânica diminui a adsorção de P (Andrade et al., 2003; Abdala et al., 2012), podendo acontecer pela liberação de compostos orgânicos oriundos de sua mineralização, que são adsorvidos com alta energia à fase mineral do solo, competindo com os sítios de adsorção de P, principalmente nos óxidos de Fe e Al (Silva et al., 1997; Pavinato e Rosolem, 2008); ou pela complexação de elementos como Fe, Al e Ca, impedindo assim a ligação deles com P, evitando a formação de compostos insolúveis como exemplo variscita (fosfato de alumínio) e strengita (fosfato de ferro) (Sample et al., 1980).

Os ácidos orgânicos são provenientes da decomposição da matéria orgânica, exsudados de plantas e síntese de microrganismos (Melo et al., 2008). De modo geral, eles podem ser classificados de acordo com o peso molecular e sua capacidade de complexação, que é em função do arranjo dos grupos funcionais carboxílicos, hidroxílicos e fenólicos, sendo: baixo peso molecular e fraco ou moderado poder de complexação (ácido aspártico e salicílico); baixo peso molecular e alto poder de complexação (ácido málico, cítrico e tartárico); e alto peso e poder de complexação (ácidos taninos, fúlvicos e húmicos) (Inoue e Huang, 1986).

A capacidade dos ácidos orgânicos em reduzir a adsorção de P pela competição dos mesmos sítios de adsorção é controlada pela estrutura e carga que possuem, sendo assim, moléculas com maior número de grupos funcionais como COOH e OH são mais efetivas na competição pelos sítios de adsorção que aquelas com menor número (Van Hees et al., 2000; Guppy et al., 2005).

Nesse contexto, Andrade et al. (2003) avaliaram o efeito da aplicação de ácidos orgânicos na adsorção de P. Os autores concluíram que o efeito dos ácidos estudados na redução da adsorção de P seguiu a ordem crescente: salicílico < húmicos < oxálico < cítrico. Esses resultados foram atribuídos à disposição das cargas do ácido cítrico, em que o grupamento OH está no meio da molécula ao lado de um dos grupamentos COOH, favorecendo sua interação com a fração mineral do solo, sendo mais eficiente na competição pelo sítio de adsorção que o ácido oxálico.

Souza et al. (2014), estudando a adsorção competitiva entre P e citrato em solos, observaram o valor máximo de adsorção de P na testemunha, e que houve redução da adsorção de P em todos os tratamentos que foi aplicado o citrato. Os autores verificaram

que o P diminui a adsorção de citrato, e que a dessorção de P foi maior quando utilizaram o citrato como extrator do que água, corroborando com a hipótese de que esses ânions competem pelos mesmos sítios de adsorção.

A decomposição dos ácidos orgânicos no solo é controlada por três fatores: atividade microbiana, disponibilidade de carbono e a força com que é adsorvido nos colóides do solo (Guppy et al., 2005).

Quando adsorvidos na fase mineral, os ácidos orgânicos ficam protegidos da atividade microbiana, reduzindo assim a sua degradação. A formação dessa ligação é considerada a mais importante no processo de estabilização desses compostos (Marschner e Kalbitz, 2003). A atividade microbiana é influenciada pela temperatura, pela aeração, pela umidade, pelos nutrientes disponíveis, pela presença de elementos tóxicos e pelo pH do solo, que influenciam indiretamente na taxa de decomposição desses compostos (Kusel e Drake, 1998).

A reposição constante dos ácidos orgânicos no solo seja pelo incremento de material orgânico, pela reposição natural desses ácidos pela exsudação das raízes e sínteses de microrganismos manteria o bloqueio dos sítios de adsorção de maneira mais contínua e, portanto mais efetiva (Novais e Smyth, 1999).

Como mencionado, a matéria orgânica além de diminuir a adsorção de P por bloqueio dos sítios de adsorção, também pode diminuir a intensidade desse fenômeno pela atuação de ácidos orgânicos de alto peso molecular (húmicos e fúlvicos), que podem complexar o Al e/ou Fe em solução ou na superfície dos colóides. Segundo Stevenson (1986), ácidos fúlvicos e húmicos possuem estrutura mais complexa e são mais estáveis que os ácidos orgânicos de cadeia curta, e podem formar verdadeiras "capas" ou "superfícies protetoras" ao redor dos óxidos de Fe e Al.

Os ácidos húmicos e fúlvicos também podem causar efeito contrário, diminuindo a disponibilidade de P. Isso é possível porque esses compostos aumentam a superfície de adsorção de P, devido a reações com cátions como Fe e Al que reteriam o P por ligações de pontes metálicas, deixando esse nutriente previamente indisponível (Guppy et al., 2005), pelo menos em curto prazo.

Azevedo et al. (2004), avaliando a disponibilidade de P para a cultura do arroz inundado em solos com níveis de esterco de curral curtido (com e sem), obtiveram no Gleissolo Melânico a menor disponibilidade de P, e atribuíram esse resultado à maior presença de matéria orgânica nesse solo, que reteria o P por ligações de pontes de cátions (Fe, Al e Ca), formando compostos organometálicos.

A formação desses compostos pode ser tão importante que aumenta consideravelmente a adsorção de P, restringindo sua ciclagem, o que pode ser desejável em solos altamente intemperizados que possuem elevada capacidade máxima de adsorção de P. Esses compostos formados podem funcionar como fonte gradual de P, liberando esse nutriente de acordo com a sua decomposição, diminuindo o tempo de contato do P com as superfícies de adsorção.

Nesse sentido, Guppy et al. (2005), logo após a adição de ácidos húmicos e fúlvicos, obtiveram menor adsorção de P, porém dez dias após a aplicação, a eficiência dessa competição diminuiu. Os autores atribuíram duas possíveis causas que levariam a diminuição da eficiência dos compostos orgânicos em aumentar a disponibilidade de P: a decomposição dos compostos orgânicos, diminuindo seu efeito; e a participação dos ácidos húmicos ou fúlvicos como superfícies de adsorção de P via formação de pontes metálicas com Fe, Al ou outros elementos, diminuindo sua disponibilidade em curto prazo.

Souza et al. (2010) estudaram a influência da adubação orgânica sobre o efeito residual de P para *Brachiaria brizanta* cultivada após o feijoeiro, e concluíram que a adubação orgânica influenciou positivamente na produção de matéria seca e acúmulo de P na parte aérea das gramíneas. Porém, nas maiores doses de esterco aplicado houve redução na disponibilidade de P, devido à sua adsorção aos compostos húmicos, que por meio de pontes de cátions (Al, Fe e Ca) diminuiria a disponibilidade desse nutriente, pelo menos em curto prazo.

### **3.2. Tempo de contato**

Os fertilizantes fosfatados solúveis quando são adicionados ao solo, ao se dissolverem, ligam-se à fase sólida do solo através da troca de ligantes, onde os grupos OH e OH<sub>2</sub> ligados coordenadamente ao metal são trocados com o íon fosfato, principalmente nos óxidos de Fe e de Al, diminuindo a disponibilidade de P no solo (Novais e Smyth, 1999; Sims e Pierzyuski, 2005).

O íon fosfato ligado a apenas um oxigênio na superfície mineral forma um complexo monodentado, e é considerado uma forma lábil de P (Tisdale et al., 1993). Com o passar do tempo, ocorre um envelhecimento dessa ligação, e o íon fosfato passa a se ligar em dois pontos na superfície mineral, formando complexos bidentados ou pode penetrar nas imperfeições dos óxidos, ambas consideradas formas não lábeis de P (Novais e Smyth, 1999), contribuindo para os baixos teores de P disponível nos solos.

Quando se aplica uma fonte solúvel de P em um solo, normalmente mais de 90 % do aplicado é adsorvido na primeira hora de contato com o solo (Gonçalves et al., 1985). Harvey e Rhue (2008), avaliando a adsorção de P em óxidos de Fe e Al, observaram que as três primeiras horas de adsorção foram responsáveis por 80 a 90 % do P adsorvido nestes minerais.

O efeito do tempo de contato do fertilizante fosfatado com o solo na adsorção de P é dependente da solubilidade/reatividade deste fertilizante e das características do solo (menor ou maior capacidade de adsorção).

Avaliando a disponibilidade de P em Latossolos, Freitas et al. (2013) utilizaram um fertilizante fosfatado solúvel e fosfatos naturais reativo e não reativo, em diferentes doses de P e tempos de contato. Os autores verificaram, de modo geral, redução no teor de P nos solos com o aumento do tempo de contato das fontes de P com o solo, sendo essas reduções dos teores de P mais pronunciadas quando se utilizou o superfosfato triplo, o fosfato de Gafsa e o fosfato de Araxá, respectivamente.

Moreira et al. (1991), estudando o efeito do tempo de contato do fósforo com amostras de três solos sob cerrado (Latosolos Vermelho-Amarelos) sobre sua disponibilidade para mudas de *Eucalyptus grandis*, concluíram que a disponibilidade de P para o crescimento das mudas diminuiu com o aumento do tempo de contato do fertilizante fosfatado com o solo, particularmente naqueles cujas características indicam maior capacidade tampão de fosfatos.

Em experimento realizado em casa de vegetação, Broggi et al. (2014) estudaram as relações entre a adsorção de P no solo e os níveis críticos desse nutriente na parte aérea de plantas de milho cultivado em dois solos e cinco tempos de contato. Os autores verificaram que houve redução nos teores de P nas plantas de milho com o tempo de incubação em ambos os solos, e atribuíram esses resultados ao decréscimo dos teores de P disponível em função do tempo de contato fosfato-solo.

### **3.3. Fontes de fósforo**

As principais fontes de P utilizadas na agricultura são obtidas industrialmente pelo tratamento de rochas fosfáticas com ácidos. Dentre as fontes de P disponíveis no mercado brasileiro estão: fosfatos naturais, termofosfatos e fosfatos acidulados (Prochnow et al., 2004).

Os principais fosfatos acidulados pertencem ao grupo dos superfosfatos, constituído pelo superfosfato simples (SSP), superfosfato triplo (TSP), fosfato

monoamônico (MAP) e diamônico (DAP). Entre estes, o SSP, o TSP e o MAP são os mais utilizados na agricultura para fornecer P para as plantas (Lopes et al., 2004).

O SSP é produzido através do tratamento de acidulação da rocha fosfática com ácido sulfúrico, resultando em uma mistura de fosfato monocálcico ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ) com gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Este fertilizante contém 18 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em citrato neutro de amônio (CNA) + água. Adicionalmente, apresenta em torno de 11 % de enxofre e 19 % de CaO. O TSP é obtido através da reação do ácido fosfórico com a rocha fosfática. Esta formulação apresenta concentrações maiores de P solúvel em água (43 %  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em CNA + água) do que o SSP (Novais et al., 2007).

O MAP possui em torno 11 % de N amoniacal e 54 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , sendo produzido pela reação da amônia com ácido fosfórico. O DAP contém maior quantidade de N e menor quantidade de P (18 % de N e 46 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ).

Conforme observado, a composição química desses fertilizantes é distinta, e quando aplicados ao solo estão sujeitos a reações que têm a capacidade de alterar a adsorção do P no solo (Hedley e McLaughlin, 2005). Após a solubilização dos fertilizantes fosfatos solúveis no solo, as reações que se sucedem, incluindo alterações no pH do solo, na precipitação e na adsorção de P, variam significativamente entre eles (Oliveira et al., 2014), influenciando a disponibilidade de P.

A solução saturada que se produz na região de aplicação do fertilizante pode ter característica ácida ou alcalina, conforme o íon acompanhante do fosfato (Silva, 2013), gerando variações nas cargas das superfícies dos colóides do solo (Pardo et al., 1992). Por isso, qualquer alteração na força iônica da solução do solo interfere na disponibilidade do íon fosfato, devido às mudanças geradas nas superfícies de reação, aumentando ou reduzindo a concentração do íon fosfato na solução do solo (Ernani, 2008).

A disponibilidade de P para as plantas pode ser afetada por estas alterações químicas, tendo em vista que o DAP, inicialmente após a sua aplicação ao solo eleva o pH ao redor de seus grânulos precipitando o Al trocável nas adjacências dos grânulos, e resultando em maior disponibilidade de P no solo. Enquanto que o SSP, o TSP e o MAP podem diminuir o pH nas adjacências dos grânulos, e assim aumentar a atividade do íon Al, em decorrência da diminuição do pH promovida pela dissolução desses fertilizantes, e diminuindo a concentração do P na solução do solo (Ernani et al., 2002).

Silva (2013), estudando a dinâmica do P e as reações no solo após a aplicação de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada observaram que o MAP e o SSP

promoveram a acidificação no solo na região mais próxima dos mesmos após a dissolução do grânulo, entretanto este fato não foi observado para o DAP. Comportamento similar para o MAP, com diminuição significativa do pH na região mais próxima do grânulo também foi observado por Lombi et al. (2004).

Costa et al. (2009), avaliando o efeito de fontes de P, com níveis de umidade sobre o fluxo difusivo deste elemento em solos, observaram que o fosfato monoamônico proporcionou o maior fluxo difusivo de P, seguido do fosfato de potássio e de cálcio. Os valores de fluxo difusivo de P encontrados nos Latossolos variam de 1,75 a 2,0 mg dm<sup>-3</sup> de P, quando utilizado o fosfato monoamônico.

#### 4. TRANSPORTE DE FÓSFORO

Água e nutrientes são componentes fundamentais que definem, em grande parte, a produtividade das culturas. Além da água ser componente fundamental para atividades fisiológicas das plantas, no solo desempenha outro papel importante, funcionando como meio de transporte de nutrientes, que pode se dar por fluxo de massa ou fluxo difusivo (Procópio et al., 2002).

O principal mecanismo de transporte do P no solo é o fluxo difusivo (difusão), e ocorre devido a um gradiente de concentração, que provoca maior movimento de íons fosfato em direção aos pontos de menor concentração (Novais et al., 2007).

Adaptando-se a primeira Lei de Fick para estudos em solos, o fluxo difusivo de P passou a ser matematicamente definido pela equação (Nye, 1979):

$$D = D_1 \theta f dC_1/dC$$

em que: D é o coeficiente de difusão de P no solo, em cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>; D<sub>1</sub> é o coeficiente de difusão de P em uma solução aquosa (0,89 x 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, a 25 °C); θ é o conteúdo volumétrico de água no solo, em cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>; f é um fator de impedância, adimensional, variável conforme a tortuosidade da trajetória da difusão; dC<sub>1</sub>/dC é o inverso do fator capacidade tampão do solo; C<sub>1</sub> é a concentração de P na solução do solo, correspondente ao fator intensidade (I), em mol cm<sup>-3</sup>, e C é a concentração de P adsorvido-lábil, correspondente ao fator quantidade (Q), em mol cm<sup>-3</sup>.

O fluxo difusivo de P no solo é influenciado por vários fatores, tais como a concentração do nutriente na solução do solo, o conteúdo volumétrico de água no solo (Ruiz et al., 1988), a distância a ser percorrida até as raízes (Wild, 1981) e a interação do P com os componentes da fase sólida (Bastos et al., 2008).

A interação do P com os minerais de argila do solo diminui o transporte de P no solo, especialmente em solos tropicais muito intemperizados. Essa interação diminui quando a quantidade de água no solo aumenta, favorecendo assim o fluxo difusivo de P (Figura 1). Isso ocorre porque o ânion fosfato fica mais distante da superfície do mineral de argila, o que é proporcionado por um filme de água mais espesso (Novais e Smyth, 1999).

Segundo Barber (1995), o maior conteúdo de água no solo favorece o fluxo difusivo de P pelo seu efeito direto sobre o coeficiente de difusão e por reduzir a tortuosidade do caminho difusivo, aumentando o fator de impedância e, conseqüentemente, o valor do coeficiente de difusão.

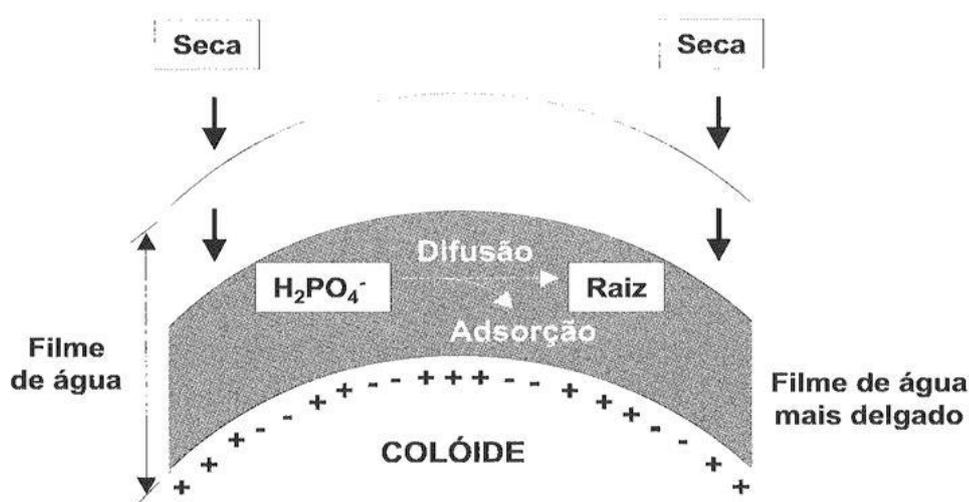


Figura 1. Efeito do teor de água em solo altamente intemperizado sobre o fluxo difusivo de P no solo (Fonte: Novais e Smyth, 1999).

Ruiz et al. (1988), estudando o efeito de potenciais matriciais de água do solo e doses de P, encontraram respostas mais acentuadas às alterações nos potenciais matriciais de água no solo que às doses de P, sendo esse efeito mais crítico no solo mais arenoso utilizado no experimento. Os autores concluíram que a incorporação de doses menores de P com manejo adequado de água apresenta efeito positivo mais acentuado que o decorrente da aplicação de doses maiores de P, com restrição de água.

Avaliando o acúmulo de P em tecidos de sorgo em resposta à potenciais matriciais de água em dois Latossolos, Ruiz-Eraso (2009) observou que as plantas de sorgo tiveram maior produção de matéria seca em resposta aos maiores potenciais de água nos dois solos, sendo que o solo de textura média apresentou maiores valores em relação ao de textura argilosa.

Em experimento realizado em casa de vegetação, Oliveira et al. (2010) avaliaram o desenvolvimento de plantas de milho em resposta a potenciais de água do solo. Os autores verificaram que o aumento na disponibilidade de água favoreceu o transporte de nutrientes no solo, e proporcionou maiores produções de matéria seca de raízes, caule e folhas para as plantas.

Para o efeito de fontes de P e níveis de umidade sobre o fluxo difusivo deste nutriente no solo, Costa et al. (2009) relataram que houve uma tendência de aumento no fluxo difusivo de P com o maior conteúdo de água no solo, principalmente no mais arenoso. Os autores observaram que os maiores valores de fluxo difusivo de P foram nos solos mais arenosos, nos quais, o transporte de P foi maior, em comparação com os solos mais argilosos, que apresentaram maior capacidade máxima de adsorção de P.

Costa et al. (2006) estudaram o efeito de níveis de umidade e doses de P sobre o fluxo difusivo deste nutriente em Latossolos. Os autores observaram que o fluxo difusivo de P aumentou com o incremento do conteúdo de água aplicado para qualquer dose de P, em todos os solos estudados, e concluíram que os maiores níveis de umidade foram os mais eficientes no fluxo difusivo de P.

## **5. TECNOLOGIAS EM FERTILIZANTES FOSFATADOS**

Alternativas tecnológicas têm sido buscadas para que seja possível aumentar a eficiência dos fertilizantes fosfatados utilizados. Uma alternativa para aumentar a eficiência destes é o recobrimento do fertilizante (solúvel em água) por camadas de material insolúvel em água, semipermeável ou impermeáveis contendo microfissuras (Figura 2). Com essa técnica, o acesso da água ao grânulo fica restrito, o que causa uma

solubilização mais lenta do fertilizante, proporcionando uma liberação lenta dos nutrientes (Borsari, 2013), sendo denominados de fertilizantes de liberação lenta.

O Comitê Europeu de Normalização (CEN) para fertilizantes de liberação lenta (Slow-Release-Fertilizer) propôs que um fertilizante pode ser descrito como de liberação lenta se atender os seguintes critérios, a uma temperatura de 25 °C (Kloth, 1996, citado por Trenkel, 2010):

- não mais de 15 % do nutriente liberado em 24 horas;
- não mais de 75 % do nutriente liberado em 28 dias;
- pelo menos cerca de 75 % do nutriente liberado no tempo de liberação declarado.

O recobrimento desses fertilizantes pode ser por substâncias orgânicas, inorgânicas ou resinas sintéticas. Tais substâncias são, em sua maioria, derivadas da uréia, como poliamidas, enxofre elementar e polímeros das mais diversas naturezas (Trenkel, 2010). A espessura e a natureza química destas substâncias de recobrimento, a quantidade de microfissuras em sua superfície e o tamanho do grânulo do fertilizante contribuem para determinar a taxa de liberação dos nutrientes ao longo do tempo (Trenkel, 1997; Girardi e Mourão Filho, 2003).

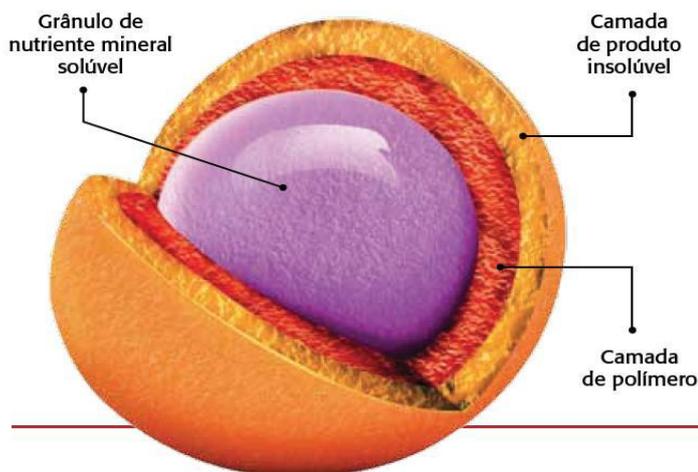


Figura 2. Recobrimento utilizado em fertilizantes de liberação lenta (Fonte: Borsari, 2013).

Nos fertilizantes revestidos com polímeros, usam-se membranas impermeáveis ou semipermeáveis com poros finos (poliuretanos, poliésteres, resinas) e a maior parte desses decompõe-se muito lentamente (Aouada, 2008; Zavaschi, 2010). A tecnologia de fabricação varia entre empresas, relativamente ao material utilizado no revestimento (tipo de polímero) e à técnica de revestimento. De acordo com Trenkel (1997), a liberação de nutrientes fica dependente da temperatura e da permeabilidade da membrana à água.

O revestimento com polímeros nos fertilizantes fosfatados solúveis promove proteção física da fonte de P, reduzindo a ação da umidade, da temperatura do solo, e de fatores químicos, como ação do pH e a dissociação da fonte (Lana et al., 2010), que podem aumentar a intensidade do fenômeno de adsorção de P. No processo de fabricação dos fertilizantes fosfatados revestidos com polímeros, o grânulo pode ser revestido por três camadas de aditivos, sendo que na última camada é adicionado um corante para diferenciar do convencional (Ferreira, 2010).

Sousa (2012) avaliou a eficiência da aplicação do MAP revestido com polímero e sem revestimento em duas lavouras de cana-de-açúcar e uma lavoura de milho, e concluiu que no experimento com milho, o MAP revestido por polímeros apresentou melhor resultado em relação ao MAP sem revestimento, proporcionando uma redução na dose de  $P_2O_5$  de 31 % sem alteração na produtividade da cultura. Em relação aos experimentos realizados com cana-de-açúcar, os resultados mostraram que somente em uma usina o MAP polimerizado proporcionou um aumento de produtividade em relação ao MAP convencional. O autor descreveu que a tecnologia de revestimento aplicada em fertilizantes fosfatados é promissora, porém há uma carência no conhecimento sobre o comportamento destes fertilizantes em diferentes ambientes produtivos.

Em experimento realizado em campo em uma lavoura de milho, Figueiredo et al. (2012) avaliaram o efeito da aplicação do MAP convencional e MAP revestido com polímero associado à calagem, em um Latossolo Vermelho Amarelo de textura argilosa. Os autores concluíram que o MAP revestido com polímero promoveu maior produtividade em relação ao MAP convencional, e observaram que as maiores diferenças foram verificadas nas saturações por bases de 40 e 50 %, nas quais o MAP revestido promoveu o incremento na produtividade de grãos de 3,40 e 3,48 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, em relação ao MAP convencional.

Comparando épocas e doses de aplicação do superfosfato triplo e cloreto de potássio com e sem revestimento por polímero no desempenho produtivo da soja,

Guareschi et al. (2011) encontraram diferença entre as fontes revestidas por polímeros e as sem revestimento quanto à época de aplicação. Segundo os autores, os fertilizantes revestidos proporcionaram uma maior produtividade da soja que o sem revestimento quando a adubação foi realizada 15 dias antes da semeadura. Porém, quando a adubação foi realizada na época do plantio, as fontes não diferiram quanto à produtividade.

Vieira e Texeira (2004) relataram que as fontes revestidas por polímeros, comparadas a fontes sem revestimento, não diferem quanto à época de aplicação. Segundo Zahrani (2000), as diferenças ocorrem quanto à eficiência da adubação, pelo fato dos fertilizantes polimerizados proporcionarem menores perdas de nutrientes por lixiviação, volatilização e adsorção, possibilitando a redução na dose aplicada e um melhor aproveitamento do nutriente liberado.

Outra alternativa utilizada para aumentar a eficiência do uso dos fertilizantes fosfatados é o recobrimento desses com algum tipo de material orgânico (por exemplo, torta de filtro, composto suíno e cama de aviário), denominados de fertilizantes organominerais.

Na legislação brasileira, o fertilizante organomineral é definido por meio da INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 23, DE 31 DE AGOSTO DE 2005 como: “produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos”. No CAPÍTULO III da INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 25, DE 23 DE JULHO DE 2009, SEÇÃO V, Art.8º, § 1º, são estabelecidas as atuais especificações, garantias e características dos fertilizantes organominerais sólidos para aplicação no solo. Segundo a referida INSTRUÇÃO NORMATIVA, os fertilizantes organominerais sólidos devem apresentar, no mínimo: 8 % de carbono orgânico; 80 mmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> de CTC; 10 % de macronutrientes primários isolados (N, P, K) ou em misturas (NP, NK, PK ou NPK); 5 % de macronutrientes secundários; e 30 % de umidade máxima.

Quando comparados às fontes minerais de P, os fertilizantes organominerais podem aumentar a disponibilidade de P no solo, devido à possibilidade de redução da intensidade do fenômeno da adsorção (Sousa et al., 2013), e, conseqüentemente, a transformação de P em formas não lábeis (Khiari et al., 2005).

Segundo Kiehl (2008), o fertilizante organomineral apresenta um potencial químico reativo relativamente inferior ao fertilizante mineral, porém sua solubilização é gradativa no decorrer do período de desenvolvimento das culturas, quando sua eficiência agrônômica pode se tornar maior em relação às fontes minerais solúveis.

Em experimentos realizados na cultura da cana-de-açúcar em condições de campo, Souza (2014) concluiu que o fertilizante organomineral mostrou-se mais eficiente que o fertilizante mineral tanto em cana planta quanto em cana soca, apresentando maior produção de colmos de cana-de-açúcar e lucratividade por hectare quando comparado ao fertilizante mineral.

O autor atribuiu esses resultados ao fornecimento contínuo de nutrientes à cultura ao longo do ciclo da cana proporcionado pela liberação lenta dos nutrientes do fertilizante organomineral. O efeito da liberação lenta de nutrientes deste organomineral está relacionado às condições de temperatura, pressão e umidade empregadas na transformação do mesmo em pellets. Desta forma, a fase mineral do fertilizante organomineral se encontra protegida dentro de uma matriz orgânica porosa, o que previne o contato direto do P com os óxidos presentes no solo, prevenindo, assim, a perda por adsorção.

Santos et al. (2010), estudando o enriquecimento da adubação fosfatada com torta de filtro na cana-de-açúcar em experimento de campo, concluíram que a produtividade de colmos e o perfilhamento foram influenciados pelas doses do resíduo aplicadas ao solo.

Teixeira et al. (2014) observaram que o fertilizante organomineral, produzido pela mistura entre torta de filtro e fertilizantes minerais convencionais posteriormente peletizados, pode ser usado no cultivo de cana-de-açúcar com alta eficiência, apresentando até 15 % a mais de eficiência na produção de colmos de cana-de-açúcar em relação ao fertilizante mineral.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdala DB, Ghosha AK, Silva IR, Novais RF, Alvarez V. VH. Phosphorus saturation of a tropical soil and related P leaching caused by poultry litter addition. *Agric Ecosyst Environ.* 2012;162:15-23.
- Almeida JA, Torrent J, Barrón V. Cor de Solo, Formas de Fósforo e Adsorção de Fosfatos em Latossolos Desenvolvidos de Basalto do Extremo - Sul do Brasil. *R Bras Ci Solo.* 2003;27:985-1002.
- Andrade FV, Mendonça ES, Alvarez V. VH, Novais RF. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *R Bras Ci Solo.* 2003;27:1003-11.
- Aouada FA, Moura MR, Menezes EA, Nogueira ARA, Mattoso LHC. Síntese de hidrogéis e cinética de liberação de amônio e potássio. *R Bras Ci Solo.* 2008;32:1643-49.
- Azevedo WR, Faquin V, Fernandes LA, Oliveira Júnior AC. Disponibilidade de fósforo para o arroz inundado sob efeito residual de calcário, gesso e esterco de curral aplicados na cultura do feijão. *R Bras Ci Solo.* 2004;28:995-1004.
- Bahia Filho AFC, Braga JM, Resende M, Ribeiro AC. Relação entre adsorção de P e componentes mineralógicos da fração argila de Latossolo do planalto central com diferentes características texturais e mineralógicas. *R Bras Ci Solo.* 1983;7:221-26.
- Barber SA. Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 1995. p. 330-38.
- Bastos LA, Costa JP, Silva IF, Raposo RWC, Souto JS. Influência de doses de fósforo no fluxo difusivo em solo de alagoas. *R Bras Eng Agríc Ambient.* 2008;12:136-142.
- Borsari F. Fertilizantes inteligentes: As novas tecnologias permitem o consumo dos nutrientes pelas plantas de forma gradativa, lenta e controlada. *Agro DBO.* 2013; 54-7.
- Broggi F, Oliveira AC, Freire FJ, Oliveira ECA, Rocha AT, Freire MBGS. Níveis críticos de fósforo em milho cultivado em solos de diferentes mineralogias. *R Caatinga.* 2014;27:164-170.
- Chaves LHG, Chaves IB, Nascimento AKS, Sousa AEC. Características de adsorção de fósforo em Argissolos, Plintossolos e Cambissolos do Estado da Paraíba. *Eng Ambient.* 2009;6:130-39.

- Colombo C, Buondonno A, Violante A, Torrent J. The contrasting effect of goethite and hematite on phosphate sorption and desorption by terre rosse. *J Plant Nutr Soil Sci.* 1991;154:301-05.
- Costa JPV, Bastos AL, Reis LS, Martins GO, Santos AF. Difusão de fósforo em solos de alagoas influenciada por fontes do elemento e pela umidade. *R Caatinga.* 2009;22:229-35.
- Costa JPV, Barros NF, Albuquerque AW, Moura Filho G, Santos JR. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. *R Bras Eng Agric Ambient.* 2006;10:828-35.
- Eberhardt D N, Vendrame PRS, Becquer T, Guimarães MF. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em latossolos sob pastagens no cerrado. *R Bras Ci Solo.* 2008;32:1009-16.
- Ernani PR. Química do solo e disponibilidade de micronutrientes. Lages. 2008.
- Ernani PR, Bayer C, Maestri L. Corn yield affected by liming and tillage system on an acid Brazilian Oxisol. *Agronomy Journal.* 2002;94:305-09.
- Fardeau JC. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. *Fert Res.* 1996;45:91-100.
- Ferreira EV. Vamos economizar fertilizantes mantendo a nutrição das plantas? [internet]. 2010 [acesso em 10 dez 2015]. Disponível em: <http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Newsletter.asp?data=27/05/2010&id=21626&secao=Colunas%20Assinadas>.
- Fernández RIE, Novais RF, Nunes FN, Ker JC. Reversibilidade de fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbiana e química. II - extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. *R Bras Ci Solo.* 2008;32:2319-30.
- Figueiredo CC, Barbosa DV, Oliveira SA, Fagioli M, Sato JH. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho. *R Ci Agron.* 2012;43:446-52.
- Freitas IF, Novais RF, Villani EMA, Villani, Novais SV. Phosphorus extracted by ion exchange resins and mehlich-1 from oxisols (latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. *R Bras Ci Solo.* 2013;37:667-77.
- Girardi EA, Mourão Filho FAA. Emprego de fertilizantes de liberação lenta na formação de pomares de citros. *R Laranja.* 2003;24:507-18.

- Goldberg S, Sposito G. On the mechanism of specific phosphate - adsorption by hydroxylated mineral surfaces - a review. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 1985;16:801-21.
- Gonçalves JLM, Firme DJ, Novais RF, Ribeiro AC. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. *R Bras Ci Solo.* 1985;9:107-111.
- Gonçalves GK, Meurer EJ, Bortolon L, Gonçalves DRN. Relação entre óxidos de ferro e de manganês e a sorção de fósforo em solos no Rio Grande do Sul. *R Bras Ci Solo.* 2011;35:1633-39.
- Guareschi RF, Gazolla PR, Perin A, Santini JMK. Adubação antecipada na cultura da soja com superfosfato triplo e cloreto de potássio revestidos por polímeros. *Ci Agrotec.* 2011;35:643-48.
- Guppy CNN, Menzies W, Moody PW, Blamey FPC. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. *Aust J Soil Res.* 2005;43:189-202.
- Harvey OR, Rhue RD. Kinetics and energetics of phosphate sorption in a multi-component Al(III)-Fe(III) hydr(oxide) sorbent system. *J Colloid Interf Sci.* 2008;322:384-93.
- Hedley MJ, Mclaughlin MJ. Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soils. In: Sims TJ, Sharpley AN. editors. *Phosphorus: agriculture and the environment.* Madison: ASA, CSSA, SSSA, 2005. p. 181-252.
- Inoue K, Huang PM. Influence of selected organic ligands on the formation of allophane and imogolite. *Soil Sci Soc Am J.* 1986;50:1623-33.
- Ker JC, Fontes MPF, Souza AR, Resende M. Adsorção de fósforo em alguns solos latossólicos: relação entre mineralogia e efeito da calagem. *R Ceres.* 1996;43:216-26.
- Khiari L, Parent LE. Phosphorus transformations in acid light-textured soils treated with dry swine manure. *Can J Soil Sci.* 2005;85:75-87.
- Kiehl EJ. *Fertilizantes organominerais.* 4. ed. Piracicaba: Degaspari; 2008.
- Kloth B. Aglukon Spezialdünger GmbH: Reply to the request on controlled release fertilizers. Personal communication. 1996. In: Trenkel ME. *Slow- and Controlled Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Efficiency in Agriculture.* Second edition, IFA, Paris, France, 2010.
- Kusel K, Drake HL. Microbial turnover of low molecular weight organic acids during leaf litter decomposition. *Soil Biol Biochem.* 1998;31:107-18.

- Lana RMQ, Junior, ACS, Silva AA, Lana AMQ. Teores de fósforo remanescente após aplicação de doses crescentes de MAP revestido com polímero de liberação gradual. In: Anais da Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água; 2010; Teresina. Teresina: Embrapa meio-norte, 2010.
- Lombi E, McLaughlin MJ, Johnston C, Armstrong RD, Holloway RE. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. *Soil Sci Soc Am J.* 2004;68:682-89.
- Lopes AS, Silva CAP, Bastos ARR. Reservas de fosfatos e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo. In: Anais Simpósio sobre fósforo na agricultura brasileira; 2004. São Pedro-SP. São Paulo: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do fosfato, 2004. p. 11-34.
- Marschner B, Kalbitz K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils. *Geoderma.* 2003;113:211-35.
- Melo LCA, Silva CA, Dias BO. Caracterização da matriz orgânica de resíduos de origens diversificadas. *R Bras Ci Solo.* 2008;32:101-10.
- Moreira JF, Barros NF, Novais RF, Neves JCL, Leal PGL. Efeito do tempo de contato do fósforo com o solo sobre sua disponibilidade para mudas de eucalipto. *R Bras Ci Solo.* 1991;15:303-08.
- Motta PEF, Curi N, Siqueira JO, Van Raij B, Furtini Neto AE, Lima JM. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influência da mineralogia e histórico de uso. *R Bras Ci Solo.* 2002;26:349-59.
- Novais RF, Smyth TJ. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. 1ª ed. Viçosa; Universidade Federal de Viçosa; 1999.
- Novais RF, Smith TJ, Nunes FNP. In: Novais R, Alvarez V. VH, Barros NF, Fontes RL, Cantarutti RB, Neves JCL editors. Fertilidade do solo. 1ª ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p.472-547.
- Nye PH. Diffusions of ions and uncharged solutes in soil and soil clays. *Adv Agron.* 1979;31:225-72.
- Oliveira EMM, Ruiz HA, Alvarez V. VH, Ferreira PA, Costa FO, Almeida ICC. Nutrient supply by mass flow and diffusion to maize plants in response to soil aggregate size and water potential. *R Bras Ci Solo.* 2010;34:317-27.
- Oliveira JPM, Ernani PR, Gatiboni LC, Pegoraro A. Alterações químicas e avaliação de p disponível na região adjacente aos grânulos de superfosfato triplo e diamônio fosfato em solos ácidos. *R Bras Ci Solo.* 2014;38:1526-36.

- Pardo MT, Guadalix ME, Garcia-Gonzalez MT. Effect of pH and background electrolyte on P sorption by variable charge soils. *Geoderma*. 1992;54:275-84.
- Parfitt RL. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *J Soil Sci*. 1989;40:359-69.
- Pavinato PC, Rosolem CA. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. *R Bras Ci Solo*. 2008;32:911-20.
- Prochnow LI, Alcarde JC, Chien SH. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: *Anais Simpósio sobre fósforo na agricultura brasileira, 2004*. São Pedro-SP. São Paulo: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do fosfato, 2004. p. 605-63.
- Procópio SO, Santos JB, Silva AA, Costa LC. Análise do crescimento e eficiência no uso da água pelas culturas de soja e feijão e por plantas daninhas. *Acta Sci*. 2002; 24:1345-51.
- Rolin Neto FCC, Schaefer EGR, Costa LM, CORRÊA MM, Fernandes Filho EI, Ibraimo MM. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto do Paraíba. *R Bras Ci Solo*. 2004;28:953-64.
- Ruiz HA, Fernandes B, Novais RF, Alvarez V. VH, Ferreira PA. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois Latossolos. *R Bras Ci Solo*. 1988;12:43-8.
- Ruiz-Eraso MH. Crescimento e acúmulo de fósforo em sorgo em resposta à localização de fosfato, ao potencial da água do solo e à frequência de irrigação [tese]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2009.
- Sample EC, Soper RJ, Racz GJ. Reactions of phosphate in soils. In.: Khasawneh FE, Sample EC, Kamprath EJ. editors. *The role of phosphorus in agriculture*. Madison: Am Soc Agron, 1980. p. 263-310.
- Santos DH, Tiritan CS, Foloni JSS, Fabris LB. Produtividade de cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. *Pesq Agropec Trop*. 2010;40:454-61.
- Silva MLN, Curi N, Blancaneaux P, Lima JM, Carvalho AM. Rotação adubo verde-milho e adsorção de fósforo em Latossolo Vermelho Escuro. *Pesq Agropec Bras*. 1997;32:649-54.

- Silva RC. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada [tese]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; 2013.
- Sims JT, Pierzyuski GM. Chemistry of Phosphorus in Soils. In: Tabatabai MA, Sparks DL editors. Chemical Processes in Soils. Madison: Wisconsin. 2005. p. 151-92.
- Souza CHE. Fosfato monoamônio revestido com polímeros no plantio das culturas de milho irrigado e cana-de-açúcar [tese]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. 2012.
- Souza JA, Curi N, Guedes GAA. Relação entre mineralogia e adsorção de fósforo em alguns latossolos sob cerrado do planalto central. Ci Prat. 1991;15:103-11.
- Souza MF, Soares EMB, Silva IR, Novais RF, Silva MFOS. Competitive sorption and desorption of phosphate and citrate in clayey and sandy loam soils. R Bras Ci Solo. 2014;38:1153-61.
- Souza BRF. Efeito residual da adubação orgânica e mineral nos atributos de produtividade e agroindustriais na cana-soca [dissertação]. Aquidauana: Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. 2013.
- Souza RF, Faquin V, Torres PRF, Baliza DP. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. R Bras Ci Solo. 2006;30:975-83.
- Souza RF, Faquin V, Lima Sobrinho RR, Oliveira EAB. Influência de esterco bovino e calcário sobre o efeito residual da adubação fosfatada para a *Brachiaria brizantha* cultivada após o feijoeiro. R Bras Ci Solo. 2010;34:143-50.
- Sousa RTX. Fertilizante organomineral para a produção de cana-de-açúcar [tese]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. 2014.
- Stevenson FJ. Cycles of carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur, micronutrients. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- Teixeira WG, Sousa RTX, Korndorfer GH. Resposta da cana-de-açúcar a doses de fósforo fornecidas por fertilizante organomineral. Biosci J. 2014;30:1729-36.
- Tiecher T, Santos DR, Kaminski J, Calegari A. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. R Bras Ci Solo. 2012;36:271-82.
- Tisdale LS, Nelson WL, Beaton JD. Soil fertility and fertilizers. New York: Lehig Press, 1993.
- Trenkel ME. Improving fertilizer use efficiency. Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture. International Fertilizer Industry Association, Paris, 1997.

- Trenkel ME. Slow and controlled-release and stabilized fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Efficiency in Agriculture. 2nd ed, Paris: IFA; 2010.
- Van Hees, PAW, Ludstrom US, Giesler R. Low molecular weight organic acids and their Al-complex in soil solution - composition, distribution and seasonal variation in three podzolized soils. *Geoderma*. 2000;94:173-200.
- Vieira BARM, Teixeira MM. Adubação de liberação controlada chega como solução. *R Camp Negoc*. 2004;41:04-08.
- Zahrani S. Utilization of polyethylene and paraffin waxes as controlled delivery systems for different fertilizers. *Ind Engin Chemist Res*. 2000;39:367-71.
- Zavaschi E, Faria LA, Vitti GCV, Nascimento CAC, Moura TA, Vale DW, Mendes FL, Kamogawa MY. Ammonia volatilization and yield components after application of polymer-coated urea to maize. *R Bras Ci Solo*. 2014;38:1200-06.
- Wild A. Mass flow and diffusion. In: Greenland DJ, Haynes MHB editors. *The chemistry of soil processes*. Chichester: John Wiley, 1981. p. 37-80.

## CAPÍTULO 2

### FERTILIZANTE FOSFATADO POLIMERIZADO E ORGANOFOSFATADOS E A ADSORÇÃO DE FÓSFORO NO SOLO

#### RESUMO

Atualmente, têm-se buscado alternativas tecnológicas para aumentar a eficiência das fontes de fósforo (P) utilizadas para que seja possível diminuir a intensidade do fenômeno de adsorção de P no solo, tornando-o mais disponível para as plantas. Objetivou-se nesse trabalho avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados polimerizado e organofosfatados aplicados ao solo, em diferentes potenciais matriciais e tempos de contato e sua relação com a adsorção de P. O experimento foi conduzido em laboratório, e seguiu delineamento em blocos casualizados, distribuídos em esquema de parcelas subdivididas no tempo, sendo a parcela principal composta por quatro fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônico convencional - MAP; fosfato monoamônico revestido com polímero - POL; fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro - TF; e fosfato monoamônico granulado com composto suíno - CS) e dois potenciais matriciais (- 10 e - 50 kPa); e a subparcela composta por seis tempos de contato (2, 4, 6, 8, 10 e 14 dias após a adição dos fertilizantes), com quatro repetições. Os teores de P disponível foram extraídos por Mehlich-1 e por água, e determinados por colorimetria. Os dados foram submetidos à análise de variância, sendo que os efeitos dentro dos fatores qualitativos foram desdobrados em contrastes ortogonais e para o fator quantitativo foram ajustados modelos de regressão. A menor liberação de P no Latossolo argiloso foi proporcionada pelos fertilizantes organofosfatados, sendo que o CS promoveu a liberação mais lenta de P. Ocorreu diminuição dos teores de P disponível com o aumento dos tempos de contato em função do fertilizante fosfatado utilizado, em que o CS apresentou as menores reduções. Os potenciais matriciais permitiram a diferenciação dos fertilizantes fosfatados estudados na disponibilidade de P, onde o MAP foi mais influenciado pelos potenciais.

**Palavras-chave:** tecnologia em fertilizante, disponibilidade de P, fosfato monoamônico.

## CHAPTER 2

### FERTILIZER PHOSPHATE POLYMERIZED AND ORGANOPHOSPHORUS AND PHOSPHORUS ADSORPTION IN SOIL

#### ABSTRACT

Currently, it has been sought alternative technologies to increase the efficiency of phosphorus sources (P) used to be possible to reduce the intensity of P adsorption phenomena in the soil, making it more available to plants. This study aimed to evaluate the effect of phosphate polymerized and organophosphate fertilizers applied to the soil at different matric potentials and contact times and its relationship with P adsorption. The experiment was conducted in the laboratory and followed a randomized block design distributed in split plot in time, the main portion consists of four phosphate fertilizers (conventional monoammonium phosphate - MAP, monoammonium phosphate coated with polymer - POL, monoammonium phosphate pelletized with filter cake - TF, and monoammonium phosphate granules with compound pig - CS) and two matric potentials (- 10 and - 50 kPa); and subplot comprises six contact times (2, 4, 6, 8, 10 and 14 days after addition of fertilizer), with four replications. The available P contents were extracted by Mehlich-1 and water, and determined by colorimetry. Data were submitted to analysis of variance, and the effects with in the qualitative factors were broken down into orthogonal contrasts and the quantitative factor regression models were adjusted. The minor release of P in clayey oxisol was provided by organophosphate fertilizers, and the CS promoted slower release P. Occurred decrease in available P levels with increasing contact time depending on the fertilizer used in the CS had smaller reductions. The matric potentials allowed differentiation of phosphate fertilizers studied the availability of P, where the MAP was more influenced by the potential.

**Keywords:** fertilizer technology, availability of P, monoammonium phosphate.

## 1. INTRODUÇÃO

Em regiões tropicais, onde ocorrem acentuado grau de intemperismo, os solos possuem elevada capacidade de adsorver fosfato, em função do predomínio de óxidos de Fe e Al, ocasionando baixa disponibilidade do íon na solução do solo (Novais et al., 2007). A adsorção do íon fosfato também é influenciada pelo pH do solo (Ernani et al., 2001), conteúdo volumétrico de água no solo (Ruiz et al., 1988), fonte de fertilizante fosfatado utilizada (Guareschi et al., 2011), assim como o teor de matéria orgânica (Korndorfer e Melo, 2009).

A decomposição da matéria orgânica libera ácidos orgânicos que bloqueiam os sítios de adsorção de fósforo (P), diminuindo a intensidade de adsorção deste nutriente (Andrade et al., 2003). Esses ácidos orgânicos também podem complexar Fe e Al presentes na solução, diminuindo a precipitação de compostos com P e tornando-o mais disponível (Guppy et al., 2005). Compostos orgânicos fosfatados também podem funcionar como fonte gradual de P, diminuindo o tempo de contato do P com as superfícies de adsorção, possibilitando maior absorção desse nutriente pelas plantas (Pavinato e Roselem, 2008).

A diminuição do conteúdo de água no solo também interfere na intensidade de adsorção de P. A redução do conteúdo de água aumenta a adsorção de P por aproximar o íon fosfato presente na solução do solo à superfície do colóide, ao passo que o filme de água mais espesso aumenta essa distância, diminuindo a intensidade desse fenômeno (Novais e Smyth, 1999; Costa et al., 2009).

Outro fator que influencia a adsorção de P é o tipo de fertilizante fosfatado utilizado (Souza et al., 2004). Os fertilizantes de maior solubilidade (p.e. superfosfatos simples e triplo, fosfato monoamônico e diamônico) possuem maior velocidade de liberação de P para a solução do solo em relação aos fosfatos de menor solubilidade. Entretanto, a eficiência agronômica dos fertilizantes fosfatados mais solúveis é diminuída com o aumento do tempo de contato do P com os colóides do solo (Lana et al., 2004; Costa et al., 2008), reduzindo a disponibilidade desse nutriente para as plantas.

Atualmente, têm-se utilizado fertilizantes fosfatados revestidos com polímeros na tentativa de aumentar a eficiência do fertilizante. Esses fertilizantes têm por finalidade disponibilizar por um maior período de tempo os nutrientes para as plantas

(Trenkel, 2010) e no caso específico do P, reduzir a intensidade do fenômeno de adsorção.

Silva et al. (2012) constataram que os fertilizantes polimerizados aplicados diminuíram a adsorção de P, proporcionando disponibilização gradual de P, sem reduzir a eficiência na absorção desse nutriente pela planta de milho. Figueiredo et al. (2012), avaliando o efeito da aplicação de fertilizante fosfatado revestido com polímero na produção da cultura do milho, constataram que a fonte polimerizada promoveu o incremento de 3,48 t ha<sup>-1</sup> em relação à fonte convencional.

No entanto, resultados contraditórios também são encontrados na literatura (Valderama et al., 2011). Gazola et al. (2013) avaliando a produtividade do milho em função da aplicação de quatro fertilizantes fosfatados (uma convencional e três com tecnologias de revestimento), não observaram diferença entre os fertilizantes. Os autores concluíram que não houve liberação gradual de P dos grânulos revestidos, e justificaram esses resultados pela rápida degradação dos polímeros.

Outra técnica utilizada é o recobrimento do fertilizante fosfatado com algum tipo de material orgânico, denominados de fertilizantes organofosfatados, como cama de aviário (Fernandes et al., 2007), torta de filtro (Souza, 2014), e composto suíno (Ferreira, 2014).

Estes fertilizantes podem aumentar a disponibilidade de P (Parent et al., 2003), devido aos benefícios causados pela matéria orgânica presente, que podem reduzir a transformação de P em formas menos lábeis para as plantas (Khiari e Parent, 2005).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados polimerizados e organofosfatados aplicados ao solo, em diferentes potenciais matriciais e tempos de contato e sua relação com a adsorção de P.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

Utilizaram-se amostras subsuperficiais (20 - 40 cm) de um Latossolo Vermelho Amarelo textura argilosa para a condução do experimento. As amostras de solo foram secas e passadas em peneira de 2 mm para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA), e posteriormente foi realizada a caracterização química, física (Tabela 1) e mineralógica (Figura 1).

Tabela 1. Caracterização física e química do Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) na profundidade de 20 - 40 cm

Característica	LVA
Argila ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) <sup>1/</sup>	0,437
Densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) <sup>2/</sup>	1,10
Retenção de água ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) <sup>3/</sup>	
- 10 kPa	0,281
- 50 kPa	0,232
- 1500 kPa	0,166
pH-H <sub>2</sub> O <sup>4/</sup>	4,96
Al <sup>3+</sup> ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) <sup>5/</sup>	0,80
Ca <sup>2+</sup> ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) <sup>5/</sup>	0,45
Mg <sup>2+</sup> ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) <sup>5/</sup>	0,32
H+Al ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) <sup>6/</sup>	5,70
T ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) <sup>7/</sup>	6,55
K ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) <sup>8/</sup>	20,50
P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) <sup>8/</sup>	0,61
P-rem ( $\text{mg L}^{-1}$ ) <sup>9/</sup>	14,30
CMAP ( $\text{mg cm}^{-3}$ ) <sup>10/</sup>	1,60

<sup>1/</sup> Método da pipeta (Almeida et al., 2012); <sup>2/</sup> Método da proveta (Embrapa, 1997); <sup>3/</sup> Extrator de placa porosa (Richards, 1949); <sup>4/</sup> Relação solo-água 1:2,5; <sup>5/</sup> Extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; <sup>6/</sup> Extrator acetato de cálcio 0,5 mol/L pH 7,0; <sup>7/</sup> CTC a pH 7,0; <sup>8/</sup> Extrator Mehlich-1; <sup>9/</sup> Fósforo remanescente (Alvarez V. et al., 2000); <sup>10/</sup> Capacidade máxima de adsorção de fósforo (Olsen e Watanabe, 1957).

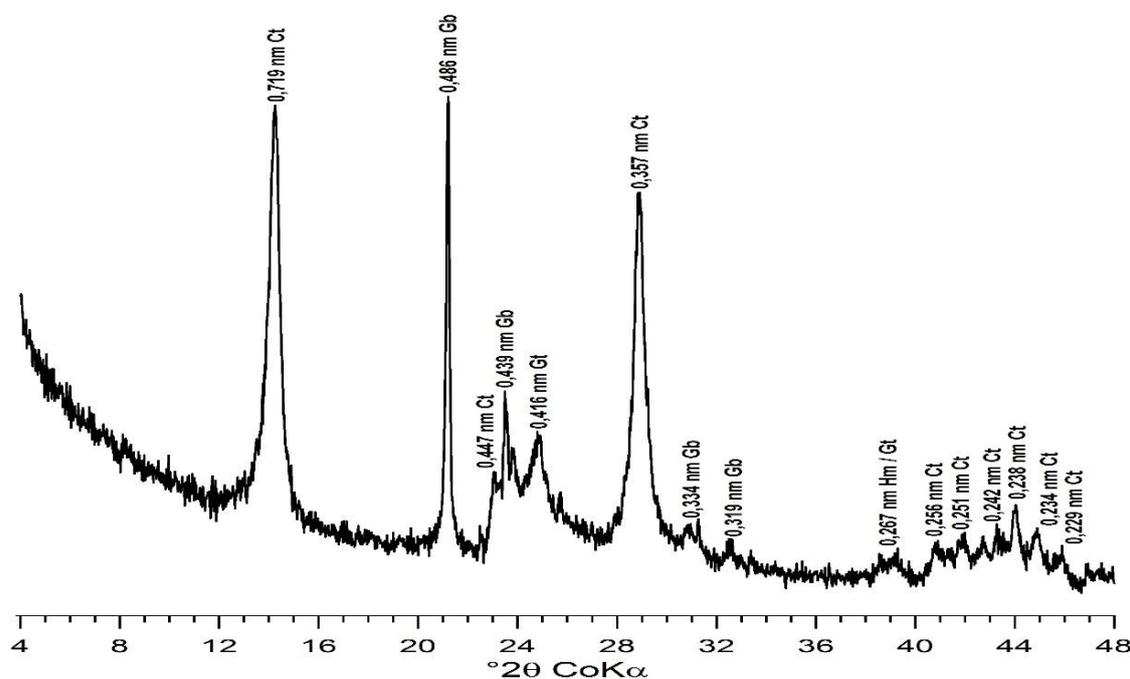


Figura 1. Difratograma de raios-X da fração argila do Latossolo Vermelho Amarelo.

Após a caracterização química do solo, o pH foi ajustado para 6,0 utilizando o método padrão da neutralização do pH, baseado na curva de incubação com carbonato de cálcio.

O experimento foi conduzido em condições de laboratório com temperatura controlada a  $25 \pm 2$  °C. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições, distribuídos em um esquema de parcelas subdivididas no tempo, sendo a parcela principal composta por quatro fertilizantes fosfatados e dois potenciais matriciais (- 10 e - 50 kPa); e a subparcela composta por seis tempos de contato (2, 4, 6, 8, 10 e 14 dias após a adição dos fertilizantes), totalizando 192 unidades experimentais.

Os fertilizantes fosfatados utilizados foram: fosfato monoamônico convencional (MAP); fosfato monoamônico revestido com polímero (POL); fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro (TF); e fosfato monoamônico granulado com composto suíno (CS). A caracterização química desses fertilizantes é apresentada na tabela 2.

O POL utilizado foi o KimCoat P. O CS foi produzido na proporção de 48,75 % de composto suíno, 48,75 % de fosfato monoamônico e 2,5 % de silicato de sódio, que é utilizado para aumentar a resistência dos grânulos à quebra ou à abrasão, sendo denominado de aglutinantes. O composto suíno utilizado na mistura com o fosfato monoamônico foi produzido pela compostagem de dejetos suínos com gramínea.

A fabricação do TF foi através do processo de peletização após a mistura de torta de filtro, fosfato monoamônico e um polímero orgânico biodegradável. A torta de filtro foi utilizada após o processo de compostagem.

Como unidade experimental foram utilizadas caixas plásticas tipo gerbox (11 cm de comprimento, 11 cm de largura e 3 cm de altura), onde as amostras de solo ( $100 \text{ cm}^3$ ) foram adicionadas. Em seguida, foi adicionada a quantidade de água necessária para atingir os potenciais matriciais desejados.

Tabela 2. Caracterização química dos fertilizantes fosfatados utilizados no experimento

Fertilizantes	N <sup>1</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>2</sup>	K <sub>2</sub> O <sup>3</sup>	C <sup>4</sup>	CTC <sup>5</sup>	C/P	pH <sup>6</sup>
	----- % -----		-----		mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>		
MAP	11,0	46,2	0	-	-	-	4,1
POL	9,0	44,3	0	-	-	-	3,7
TF	6,0	30,0	0	8,0	80,0	0,3	5,1
CS	6,9	26,0	1,6	12,7	339,1	0,5	4,9

<sup>1</sup>N total (Mapa, 2015); <sup>2</sup>P total (Mapa, 2015); <sup>3</sup>K = Potássio solúvel em água (Mapa, 2015); <sup>4</sup>C = Carbono orgânico total (Mapa, 2015); <sup>5</sup>CTC = Capacidade de Troca Catiônica (Mapa, 2015); <sup>6</sup>pH em CaCl<sub>2</sub> (Mapa, 2015).

A dose de P aplicada foi de 20 % da CMAP, correspondendo a uma dose de 320 mg dm<sup>-3</sup> de P. Como os fertilizantes contêm diferentes teores de P, foram selecionados grânulos cujo peso correspondeu a quantidade de P desejada. Os fertilizantes fosfatados utilizados foram padronizados em peneira de 2 a 4 mm a fim de homogeneizar sua granulometria.

Ao final de cada tempo de contato, os grânulos foram retirados. Em seguida foram retiradas amostras de solo na forma de retângulos nas distâncias 0,0 - 0,5; 0,5 - 1,0; 1,0 - 1,5; e 1,5 - 2,0 cm distante do grânulo do fertilizante fosfatado, iniciando-se pela região central. As subamostras retiradas foram secas a 40 °C até massa constante, para posterior determinação da concentração de P. Foi realizada a extração de P disponível por Mehlich-1 (Embrapa, 1997) e por água, e a determinação por colorimetria (Tedesco et al., 1995).

Os dados foram submetidos à análise de variância utilizando o programa SISVAR (Ferreira, 2008). Os tratamentos foram avaliados por meio da comparação de médias por contrastes ortogonais (Alvarez V. e Alvarez, 2006) e testados pelo teste F nos níveis de 1 e 5 % de probabilidade. Os tempos de contato foram avaliados por regressão.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os teores de P disponível, extraídos por Mehlich-1 e por água, apresentaram comportamento semelhante, com magnitudes distintas (Tabela 3).

A maior quantidade de P extraído pelo Mehlich-1 relaciona-se ao fato deste além de extrair P da solução (Fator I), também extrai parte do P dos colóides (Fator Q) por dissolução ácida e quantificar, em ordem crescente de efetividade, as formas precipitadas com Ca, Al e Fe (Schlindwein e Gianello, 2008; Oliveira et al., 2014), enquanto que o extrator água quantifica o P que está na solução do solo.

Os fertilizantes fosfatados influenciaram os teores de P disponível, extraídos por Mehlich-1 e por água, a partir de sua aplicação nas amostras de solo, independente dos potenciais matriciais, das distâncias e dos tempos de contato (Tabela 3), como demonstrado pelos contrastes C1, C2 e C3 (Tabela 4).

Tabela 3. Teores médios de P disponível (mg dm<sup>-3</sup>), extraídos por Mehlich-1 e por água, considerando as distâncias (Dist), os potenciais matriciais ( $\Psi_m$ ) e os tempos de contato para os diferentes fertilizantes fosfatados (Fert)

Fert	$\Psi_m$ (kPa)	Dist (cm)	Mehlich-1						Água					
			Tempos de contato (dias)											
			2	4	6	8	10	14	2	4	6	8	10	14
MAP	- 10	0,0 - 0,5	6160,1	5407,0	4579,0	4263,6	4151,6	3664,2	2913,4	2277,2	1851,2	1555,0	1427,2	1278,1
		0,5 - 1,0	543,2	841,1	1164,0	1241,7	1356,4	1424,9	35,7	302,1	376,3	410,7	469,0	503,8
		1,0 - 1,5	8,7	35,8	46,4	134,1	155,8	200,4	0,1	1,7	3,5	11,1	19,0	37,0
		1,5 - 2,0	1,1	1,1	1,4	1,6	1,8	2,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3
	- 50	0,0 - 0,5	5646,7	5549,6	5431,3	4739,4	4637,6	4235,2	2563,1	2394,0	2178,4	1858,4	1711,9	1543,3
		0,5 - 1,0	209,5	641,6	767,1	922,5	1098,9	1312,1	24,1	173,3	216,5	321,6	365,3	380,8
		1,0 - 1,5	5,2	14,6	22,0	41,7	45,6	53,3	0,1	0,3	0,6	1,1	1,3	3,6
		1,5 - 2,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
POL	- 10	0,0 - 0,5	5507,5	4362,3	4297,6	3830,0	3773,6	3521,4	2875,9	1741,4	1427,3	1323,8	1270,3	1088,7
		0,5 - 1,0	388,0	740,0	819,3	1000,1	1231,5	1348,0	28,0	238,3	282,6	328,9	363,7	406,5
		1,0 - 1,5	8,0	28,0	32,9	105,8	139,1	166,9	0,1	1,0	1,4	9,2	16,4	28,4
		1,5 - 2,0	1,0	1,1	1,3	1,4	1,7	2,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	- 50	0,0 - 0,5	5429,2	5565,0	5267,1	4800,8	4583,6	3610,2	2535,0	2211,8	1970,7	1676,4	1636,3	1202,3
		0,5 - 1,0	187,2	640,6	741,3	875,0	940,9	992,7	20,6	196,9	272,8	295,0	308,7	315,6
		1,0 - 1,5	4,3	9,6	23,0	26,0	29,1	32,0	0,1	0,5	0,5	0,9	1,2	1,6
		1,5 - 2,0	0,9	0,9	1,1	1,2	1,4	1,6	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
TF	- 10	0,0 - 0,5	5020,2	4740,1	3969,2	3995,0	3812,1	3814,7	2200,3	1946,8	1356,2	1349,8	1247,1	1257,7
		0,5 - 1,0	322,4	624,3	653,7	685,8	714,7	885,3	43,5	222,3	224,9	228,8	290,4	318,2
		1,0 - 1,5	4,1	23,7	29,2	32,4	45,4	60,9	0,1	1,0	1,8	1,7	2,3	7,9
		1,5 - 2,0	0,8	1,0	1,2	1,2	1,3	1,4	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	- 50	0,0 - 0,5	5455,3	5210,4	4723,7	4144,7	4043,6	3714,3	2394,2	2166,1	1637,9	1491,4	1395,3	1257,7
		0,5 - 1,0	152,1	388,8	430,4	466,2	517,0	560,1	17,9	104,3	135,8	145,8	162,1	178,5
		1,0 - 1,5	2,7	7,0	8,9	9,2	10,1	13,2	0,1	0,3	0,3	0,4	0,9	1,3
		1,5 - 2,0	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
CS	- 10	0,0 - 0,5	3177,8	3062,0	2902,0	2828,5	2809,3	2780,7	1374,6	1263,2	1216,8	1084,0	1032,2	934,2
		0,5 - 1,0	52,6	170,9	267,7	382,3	433,2	522,3	4,2	40,6	58,8	96,8	124,7	214,0
		1,0 - 1,5	2,7	4,1	5,2	7,5	9,5	12,9	0,1	0,3	0,3	0,3	0,5	1,4
		1,5 - 2,0	0,7	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
	- 50	0,0 - 0,5	3122,1	3198,0	3160,0	2985,8	2986,7	2541,5	1343,3	1351,5	1262,3	1104,2	1046,7	908,0
		0,5 - 1,0	49,6	111,0	125,8	199,6	323,2	337,4	2,1	7,6	11,0	23,6	73,2	79,3
		1,0 - 1,5	1,8	2,3	2,6	3,1	3,4	5,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
		1,5 - 2,0	0,6	0,7	1,0	1,0	1,0	1,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

MAP = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; TF = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; CS = fosfato monoamônico granulado com composto suíno.

Tabela 4. Contrastes ortogonais (C) dos teores de P disponível (mg dm<sup>-3</sup>), extraídos por Mehlich-1 e por água, para os diferentes fertilizantes fosfatados

Variáveis	C1	C2	C3
P Mehlich-1	342,55**	335,85**	431,30**
P Água	146,52**	121,94**	148,54**

C1: MAP vs POL + TF + CS (3+,---); C2: POL vs TF + CS (2+,-); C3: TF vs CS (+,-). \*\* significativo a 1 % de probabilidade pelo Teste F. MAP = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; TF = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; CS = fosfato monoamônico granulado com composto suíno.

Os teores de P disponível extraído por Mehlich-1 e por água foram superiores para o MAP quando comparados com os fertilizantes com revestimento (C1, Tabela 4). Este fato está relacionado à menor velocidade de dissolução dos fertilizantes de liberação lenta frente ao fertilizante sem revestimento utilizado neste experimento (Tabela 3).

Os fertilizantes fosfatados solúveis quando adicionados ao solo, como o MAP, aumentam rapidamente a concentração de P na solução do solo. Pelo menos 85 - 90 % do total de P nesses fertilizantes são solúveis em água (Chien et al., 2011). Esses fertilizantes têm sua eficiência diminuída ao longo do tempo devido ao processo de adsorção de P pelo solo (Rheinheimer et al., 2002), conforme observado na tabela 3.

As tecnologias aplicadas nos fertilizantes de liberação lenta foram desenvolvidas com intuito de aumentar a eficiência agronômica desses fertilizantes (Trenkel, 2010), por proporcionarem um sincronismo entre a liberação do nutriente e a demanda pela planta, e no caso específico do P, diminuir o tempo de contato desse nutriente com a fase sólida, e assim reduzirem as perdas por adsorção. Esse benefício é proporcionado pela liberação lenta do nutriente ao longo do tempo, o que explica os menores teores de P disponibilizados por esses fertilizantes neste experimento (Tabela 3).

Luz e Korndörfer (2011) relataram que os fertilizantes de liberação lenta apresentaram solubilidade gradual, fazendo com que os nutrientes sejam liberados lentamente ao longo do tempo, no início com menor disponibilidade. A liberação gradual dos nutrientes à medida que são demandados para o crescimento da planta é uma vantagem em relação à aplicação de fertilizantes de liberação rápida.

Avaliando a disponibilidade de P ao longo do tempo, Machado e Souza (2012) aplicaram MAP com e sem polímeros em solos de diferentes texturas (arenosa, média e argilosa) e realizaram coletas aos 30, 60 e 90 dias após aplicação dos fertilizantes. Os autores concluíram que o fertilizante polimerizado aumentou a disponibilidade de P ao

longo do tempo, proporcionando liberação gradual de P desse fertilizante, sendo esse efeito mais pronunciado no solo de textura argilosa.

Valderrama et al. (2010), estudando a resposta de fontes de P (MAP com e sem revestimento) na cultura do milho sob um Latossolo Vermelho de textura argilosa, observaram que o MAP polimerizado proporcionou maior produtividade de grãos, quando comparado ao MAP sem revestimento.

A maior eficiência do P na forma polimerizada é atribuída à estrutura dos grânulos do fertilizante revestido por polímeros. Estes ao absorverem água do solo solubilizam o P no interior das cápsulas, liberando-os gradativamente pela estrutura porosa na região radicular. Com isso, há redução do contato direto do P com os colóides do solo, minimizando as perdas desse nutriente pelo processo de adsorção (Tomaszewska et al., 2002; Guareschi et al., 2011).

Quando comparado o POL com os organofosfatados (TF + CS), notou-se teores de P disponível extraído por Mehlich-1 e por água superiores para o POL (C2, Tabela 4). Esses resultados demonstram que os organofosfatados apresentaram solubilização mais lenta, liberando gradativamente o P na solução do solo comparado ao POL.

Os fertilizantes fosfatados revestidos por polímeros buscam reduzir as perdas de P por adsorção (Vieira e Texeira, 2004). Para o revestimento dos fertilizantes com polímeros, são utilizados frequentemente membranas semipermeáveis ou impermeáveis com poros finos, sendo que a maior parte dos polímeros decompõe-se lentamente (Trenkel, 2010).

A tecnologia de fabricação varia entre empresas devido ao material utilizado no revestimento (tipo de polímero) e à técnica de revestimento. A espessura e a natureza química da resina de recobrimento, a quantidade de microfissuras em sua superfície e o tamanho do grânulo do fertilizante determinam a taxa de liberação de nutrientes ao longo do tempo (Girardi e Mourão Filho, 2003).

Segundo Vitti e Reirinchs (2007), os fertilizantes de liberação lenta apresentam dissolução mais lenta no solo, e a liberação dos nutrientes através de uma membrana de polímero não é significativamente afetada pelas propriedades do solo, tais como: pH, textura, atividade microbiana, força iônica da solução do solo, mas sim pela temperatura, umidade e permeabilidade do revestimento de polímero.

Lima et al. (2008), avaliando o efeito da aplicação de um fertilizante fosfatado revestido por polímero na cultura da soja, obtiveram resultados superiores de produtividade, com o superfosfato simples revestido com polímero (Kimcoat-P) em

relação ao superfosfato simples sem revestimento. Este fato também foi verificado por Silva Junior et al. (2008) em experimento com soja, onde o fertilizante revestido por polímero KimCoat-P proporcionou maior produtividade de grãos de soja ( $2,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) do que com superfosfato simples ( $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

Os organofosfatados apresentam o P revestido a compostos orgânicos, proporcionando a liberação lenta de nutriente ao longo do tempo, no início com menor disponibilidade (Luz e Korndörfer, 2011), conforme observado no presente experimento (Tabela 3).

Valores superiores de P disponível para a TF foram observados, tanto para o extrator Mehlich-1 como para extrator água, quando contrastado ao CS, devido à maior liberação de P em TF frente ao CS (C3, Tabela 4).

A fase mineral do TF se encontra protegida dentro de uma matriz orgânica porosa (pellets), o que previne o contato direto do P com os óxidos de Fe e Al no solo, prevenindo, assim, a perda de P por adsorção (Sousa, 2014). Segundo o mesmo autor, a atividade dos microrganismos do solo promove a mineralização da matriz orgânica do TF, diminuindo o tamanho dos pellets e ao mesmo tempo liberando o P de forma lenta.

Nas distâncias 0 - 0,5; 0,5 - 1,0 e 1,0 - 1,5 cm do grânulo do fertilizante fosfatado, para o extrator Mehlich-1, o MAP apresentou valores superiores de P disponível comparado aos demais fertilizantes, entretanto, não houve diferença na distância 1,5 - 2,0 cm (C4, Tabela 5), comprovando a baixa movimentação de P.

A maior movimentação de P observada nestas distâncias pela aplicação do MAP está relacionada à maior concentração desse nutriente no solo, resultando no aumento do gradiente de concentração de P, e com isso favorecendo a movimentação de P (Tabela 3).

Silva (2013) estudando a movimentação de P em função da aplicação de fertilizantes fosfatados em um Neossolo Quartzarênico, verificou que aproximadamente 44 % do P - total do MAP foi observado na distância 0,14 - 0,26 cm.

Tabela 5. Contrastes ortogonais (C) dos teores de P disponível (mg dm<sup>-3</sup>), extraídos por Mehlich-1 e por água, considerando as distâncias para os diferentes fertilizantes fosfatados

C	Distância (cm)							
	Mehlich-1				Água			
	0,0-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	0,0-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0
C4	907,0**	424,6**	38,3**	0,24 <sup>ns</sup>	446,5**	135,3**	4,3 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>
C5	870,8**	434,7**	37,6**	0,28 <sup>ns</sup>	345,9**	137,8**	4,2 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>
C6	1424,1**	285,4**	15,6 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	481,6**	111,4**	1,1 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>

C4: MAP vs POL + TF + CS d/Distâncias (3+,-,-); C5: POL vs TF + CS d/Distâncias (2+,-,-); C6: TF vs CS d/Distâncias (+,-). \*\* significativo a 1 % de probabilidade e <sup>ns</sup> não significativo pelo Teste F. MAP = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; TF = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; CS = fosfato monoamônico granulado com composto suíno.

Os teores de P disponível foram superiores para o POL quando contrastado a TF + CS nas distâncias 0 - 0,5; 0,5 - 1,0 e 1,0 - 1,5 cm do grânulo do fertilizante fosfatado, para o extrator Mehlich-1 (C5, Tabela 5). Isso ocorreu por causa da maior liberação de P do POL (Tabela 3), aumentando os teores de P disponível nessas distâncias e proporcionando maior movimentação de P.

Comparando-se TF e CS (C6, Tabela 5), notou-se valores superiores de P disponível para a TF nas distâncias 0 - 0,5 e 0,5 - 1,0 cm do grânulo do fertilizante fosfatado, para o extrator Mehlich-1.

Com relação aos teores de P disponível extraído por água, verifica-se comportamento similar ao observado para o Mehlich-1 nas distâncias 0 - 0,5 e 0,5 - 1,0 cm do grânulo do fertilizante fosfatado (C4, C5 e C6, Tabela 5), enquanto que nas distâncias 1,0 - 1,5 e 1,5 - 2,0 cm, não foram observados valores significativos para o extrator água, devido ao menor poder de quantificar o P disponível no solo comparado ao Mehlich-1.

No contraste C7 (Tabela 6), em que contrastam-se os potenciais matriciais, de modo geral, notou-se comportamento similar dos teores de P disponível (P - Mehlich-1 e P - água) para a distância 0,0 - 0,5 cm para todos os fertilizantes, demonstrando valores superiores de P disponível para o potencial matricial de - 50 kPa.

Tabela 6. Contrastes ortogonais (C) dos teores de P disponível ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), extraído por Mehlich-1 e por água, considerando as distâncias e os potenciais matriciais para os diferentes fertilizantes fosfatados

Fertilizantes	Distância (cm)	C7	
		Mehlich-1	Água
MAP	0,0 - 0,5	-335,72**	-157,83**
	0,5 - 1,0	269,92**	102,67**
	1,0 - 1,5	66,46**	10,89 <sup>ns</sup>
	1,5 - 2,0	0,37 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>
POL	0,0 - 0,5	-660,59**	-250,87**
	0,5 - 1,0	191,53**	39,72**
	1,0 - 1,5	59,45**	8,59 <sup>ns</sup>
	1,5 - 2,0	0,24 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>
TF	0,0 - 0,5	-323,44**	-164,11**
	0,5 - 1,0	228,64**	97,29**
	1,0 - 1,5	24,09 <sup>ns</sup>	1,93 <sup>ns</sup>
	1,5 - 2,0	0,14 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>
CS	0,0 - 0,5	-72,32**	-18,51 <sup>ns</sup>
	0,5 - 1,0	113,74**	57,02**
	1,0 - 1,5	3,96 <sup>ns</sup>	0,26 <sup>ns</sup>
	1,5 - 2,0	0,11 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>

C7: Potencial matricial de - 10 kPa vs Potencial matricial de - 50 kPa d/Adubos d/Distâncias (+,-). \*\* significativo a 1 % de probabilidade e <sup>ns</sup> não significativo pelo Teste F. MAP = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; TF = fosfato monoamônico pelletizado com torta de filtro; CS = fosfato monoamônico granulado com composto suíno.

O comportamento observado na distância (0,0 - 0,5 cm) é explicado pelos maiores teores de P disponível na segunda e terceira distância (0,5 - 1,0 e 1,0 - 1,5 cm) para os fertilizantes no potencial matricial de - 10 kPa (C7, Tabela 6), evidenciando a movimentação do P da primeira para as outras distâncias. Esse resultado está relacionado ao aumento do fluxo difusivo de P proporcionado pelo maior conteúdo de água no solo no potencial de - 10 kPa, e, ou, pela maior concentração inicial de P na primeira distância (0 - 0,5 cm) proporcionado pela maior disponibilização de P na solução neste potencial matricial, aumentando o gradiente de concentração de P, e assim, favorecendo a movimentação deste nutriente a maiores distâncias.

O maior conteúdo de água no solo aumenta a movimentação de P por ser o meio no qual a difusão ocorre (Novais et al., 2007). De acordo com Costa et al. (2006), o conteúdo de água no solo está diretamente relacionado com o fluxo difusivo de P, uma vez que a umidade determina a fração da área ou o volume de solo em que ocorrerá o fluxo difusivo. O conteúdo de água no solo também apresenta relação indireta no

transporte desse nutriente por promover mudanças no fator impedância, o qual aumenta ou diminui junto à quantidade de água no solo (Costa et al., 2009).

O gradiente de concentração influencia o transporte de P por fluxo difusivo (Novais e Smyth, 1999), e assim, com o aumento desse gradiente a movimentação de P será facilitada. Costa et al. (2006), avaliando a influência da dose de P no fluxo difusivo, observaram que as doses de P mais elevadas aumentaram o fluxo difusivo, e atribuíram esse resultado ao aumento do gradiente de concentração provocado por incremento de P no solo.

Ruiz et al. (1988) realizaram experimento em casa de vegetação utilizando a técnica de raízes subdividas em vasos geminados para avaliar os fatores que regulam o transporte de P na solução do solo. Os autores, utilizando quatro doses de P e três potenciais matriciais de água em um Latossolo de textura média e outro de textura argilosa, observaram que o conteúdo de água nos solos foi mais importante no fluxo difusivo de P para o fornecimento desse nutriente para as plantas que as doses de P aplicadas, sendo esse efeito mais crítico no solo mais arenoso.

Para a distância (0,5 - 1,0 cm) notou-se comportamento oposto da primeira (0,0 - 0,5 cm) dos teores de P disponível para os fertilizantes e extratores (C7, Tabela 6), observando-se valores superiores de P disponível para o potencial matricial de - 10 kPa.

Esse resultado demonstra a movimentação de P para regiões mais distantes do grânulo, possivelmente devido ao maior conteúdo volumétrico de água e do gradiente de concentração no potencial matricial de - 10 kPa, conforme discutido na distância de 0 - 0,5 cm tem importante papel na movimentação de P no solo, que ocorre em menor proporção no potencial matricial de - 50 kPa.

Verifica-se para a TF e CS, nas distâncias 1,0 - 1,5 e 1,5 - 2,0 cm, que não houve valores de contraste significativos entre os potenciais matriciais (C7, Tabela 6) para ambos os extratores. Este fato está relacionado à maior parte do P disponível ainda permanecer nas duas primeiras distâncias e pela baixa movimentação do P no solo.

A permanência do P nas primeiras distâncias está associada à menor taxa de liberação de P, proporcionado por esses fertilizantes, resultando em um menor gradiente de concentração de P na solução do solo, diminuindo assim o fluxo difusivo de P.

Os organofosfatados (TF e CS), em função de seu recobrimento, causam uma liberação lenta de P ao longo do tempo como descrito por vários autores (Severino et al., 2004; Tiritan et al., 2010). Essas fontes são recobertas por uma matriz orgânica

porosa que vai liberando P ao passo que é mineralizada (Souza, 2014), e apresentam potencial químico reativo relativamente inferior aos fertilizantes minerais (Kiehl, 2008).

Os teores de P disponível na distância 0,0 - 0,5 cm diminuíram ao longo do tempo independente dos fertilizantes e dos potenciais matriciais. Verifica-se nesta distância, que o CS apresentou liberação lenta de P ao longo do tempo, para ambos os potenciais matriciais, em relação aos demais fertilizantes (Figura 2).

Ao analisar a distância 0,5 - 1,0 cm, notou-se incrementos diferentes nos teores de P disponível ao longo do tempo, independente dos fertilizantes e dos potenciais matriciais (Figura 2). Este fato possivelmente está relacionado ao maior gradiente de concentração de P na distância 0,0 - 0,5 cm, favorecendo à movimentação de P dessa distância para a distância 0,5 - 1,0 cm.

O potencial matricial de - 10 kPa favoreceu a maior movimentação de P da distância 0,0 - 0,5 cm para a distância 0,5 - 1,0 cm ao longo do tempo (Figura 2). Esse resultado demonstra que o maior conteúdo de água no solo aumenta a movimentação de P.

Os teores de P disponível, na distância 1,0 - 1,5 cm, apresentaram comportamento semelhante, com magnitudes diferentes, aos teores na distância 0,5 - 1,0 cm. Verifica-se, na distância 1,0 - 1,5 cm, que o maior conteúdo de água no solo proporcionou maior movimentação de P em relação ao menor conteúdo de água no solo ao longo do tempo, observando maiores teores de P disponível no potencial matricial de - 10 kPa (Figura 2).

Nas distâncias 0,5 - 1,0 e 1,0 - 1,5 cm a aplicação dos fertilizantes (TF e CS) aumenta lentamente os teores de P disponível no solo ao longo do tempo (Figura 2). Isso está relacionado à tecnologia de recobrimento desses fertilizantes, que proporciona liberação lenta de P ao longo do tempo.

Na distância 1,5 - 2,0 cm, nota-se baixos incrementos nos teores de P disponível ao longo do tempo (Figura 2), evidenciando a baixa movimentação de P no solo.

Os teores de P disponível, extraídos por água, apresentaram comportamento semelhante aos teores de P extraídos por Mehlich-1, porém com magnitudes distintas (Figuras 2 e 3).

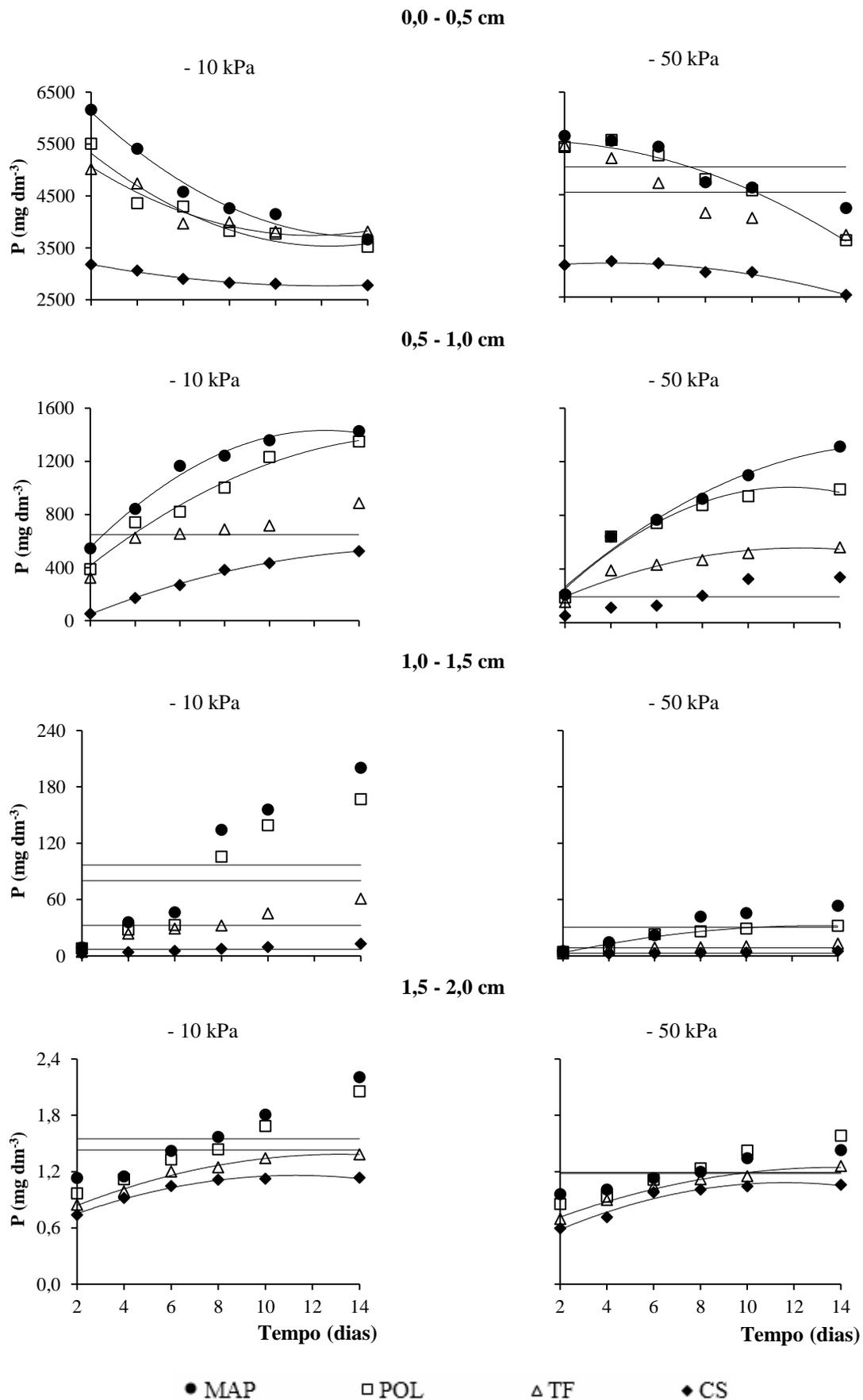


Figura 2. Teores de P disponível, extraídos por Mehlich-1, nas distâncias ao longo do tempo influenciados pelos fertilizantes fosfatados e potenciais matriciais.

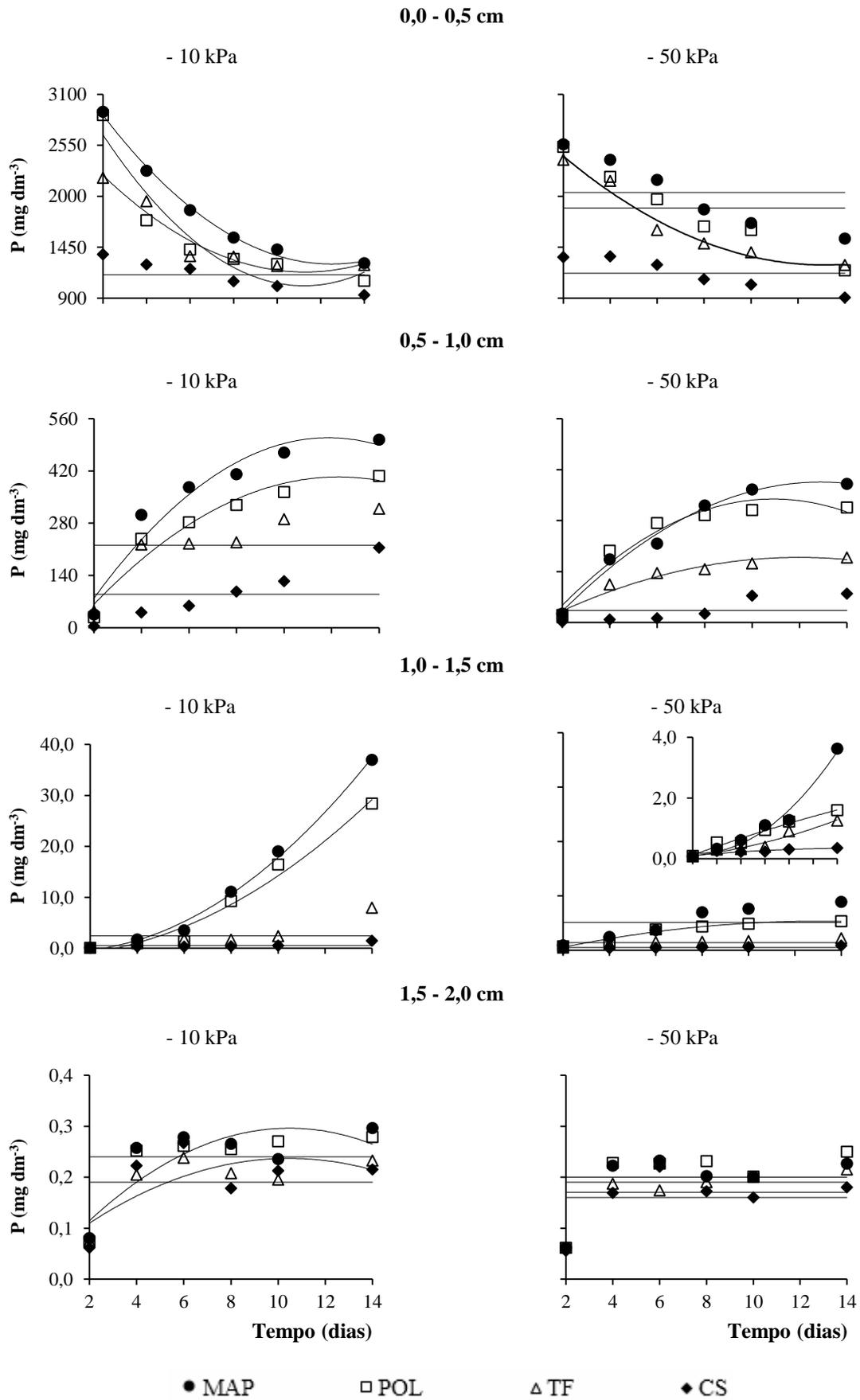


Figura 3. Teores de P disponível, extraídos por água, nas distâncias ao longo do tempo influenciados pelos fertilizantes fosfatados e potenciais matriciais.

#### **4. CONCLUSÕES**

A menor liberação de P no Latossolo Vermelho Amarelo textura argilosa foi proporcionada pelos fertilizantes organofosfatados, em que o CS promoveu a liberação mais lenta de P.

O CS apresentou as menores reduções nos teores de P disponível ao longo dos tempos de contato, seguidos do TF, POL e MAP.

Os fertilizantes de liberação lenta foram menos sensíveis à variação da umidade do solo, mantendo-se valores mais constantes para ambos os potenciais, fato que não foi observado no MAP.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida BG, Donagemma GK, Ruiz HA, Braida JA, Viana JHM, Reichert, JMM, Oliveira LB, Ceddia MB, Wadt PS, Fernandes RBA, Passos RR, Dechen SCF, Klein VA, Teixeira WG. Padronização de Métodos para Análise Granulométrica no Brasil. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2012. (Comunicado técnico).
- Alvarez VVH, Alvarez GAM. Comparações de médias ou testes de hipóteses? Contrastes! Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2006;31:24-4.
- Alvarez VVH, Novais RF, Dias LE, Oliveira JA. Determinação e uso do fósforo remanescente. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2000;25:27-33 (Boletim Informativo)
- Andrade, FV, Mendonça ES, Alvarez VVH, Novais RF. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em latossolos e adsorção de fosfato. R Bras Ci Solo, 2003;27:1003-11.
- Chien SH, Prochnow LI, TU S, Snyder CS. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. Nutri Cycl Agroecosyst. 2011;89:229-55.
- Costa JPV, Bastos AL, Reis LS, Martins GO, Santos AF. Difusão de fósforo em solos de alagoas influenciada por fontes do elemento e pela umidade. R Caatinga. 2009;22:229-35.
- Costa JPV, Barros NF, Albuquerque AW, Moura Filho G, Santos JR. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. R Bras Eng Agric Ambient. 2006;10:828-35.
- Costa SEVGA, Furtini Neto AE, Resende AV, Silva TO, Silva TR. Crescimento e nutrição da Braquiária em função de fontes de fósforo. Ci Agrotecnol. 2008;32:1419-427.
- Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa; 1997.
- Ernani PR, Steckling C, Bayer C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. R Bras Ci Solo. 2001;25:939-46.

- Fernandes ALT, Santinato R, Drumond LCD, Oliveira CB. Avaliação do uso de fertilizantes organominerais e químicos na fertirrigação do cafeeiro irrigado por gotejamento. *R Bras Eng Agric Ambient*. 2007;11:159-66.
- Ferreira DF. SISVAR: Um programa para análises e ensino de estatística. *R Symp*. 2008;6:36-41.
- Ferreira NR. Eficiência agronômica de fertilizantes organominerais sólidos e fluidos em relação à disponibilidade de fósforo [dissertação]. Botucatu: Universidade Estadual Paulista; 2014.
- Figueiredo CC, Barbosa DV, Oliveira SA, Fagioli M, Sato JH. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho. *R Ci Agronomic*. 2012;43:446-52.
- Gazola RN, Buzetti S, Dinalli RP, Teixeira Filho MCM, Celestrino TS. Efeito residual da aplicação de fosfato monoamônio revestido por diferentes polímeros na cultura de milho. *R Ceres*. 2013;60:876-84.
- Girardi EA, Mourão Filho FAA. Emprego de fertilizantes de liberação lenta na formação de pomares de citros. *R Laranja*. 2003;24:507-18.
- Guareschi RF, Gazolla PR, Perin A, Santini JMK. Adubação antecipada na cultura da soja com superfosfato triplo e cloreto de potássio revestidos por polímeros. *Ci Agrotec*. 2011;35:643-48.
- Guppy CN, Menzies NW, Moody PW, Blamey FPC. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. *Aust J Soil Res*. 2005;43:189-02.
- Khiari L, Parent LE. Phosphorus transformations in acid light-textured soils treated with dry swine manure. *Can J Soil Sci*. 2005;85:75-87.
- Kiehl EJ. Fertilizantes organominerais. 4. ed. Piracicaba: Degaspari; 2008.
- Korndörfer GH, Melo SP. Fontes de fósforo (fluida ou sólida) na produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar. *Ci Agrotec*. 2009;33:92-97.
- Lana RMQ, Zanão Júnior LA, Luz JMQ, Silva JC. Produção da alface em função do uso de diferentes fontes de fósforo em solo de Cerrado. *Hort Bras*. 2004;22:525-28.
- Lima RE, Perin A, Rodrigues AB. Produtividade de soja submetida a fontes e doses de adubação fosfatada. In: *Anais II Congresso de iniciação científica do cefet rio verde*. 2008. Goiás: Rio Verde.

- Luz PHC, Korndörfer GH. Reciclagem de subprodutos na agricultura. In: Vasconcelos, H. P. editors. Contribuições para a produção de alimentos: Idéias para uma agricultura eficaz. São Paulo: Nova Bandeira Produções Editoriais; 2011.
- Machado VJ, Souza CHE. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. *Biosci J.* 2012;28:1-7.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Mapa. Secretaria de Defesa Agropecuária. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos. Brasília; 2014.
- Novais RF, Smyth TJ. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. 1ª ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- Novais RF, Smith TJ, Nunes FNP. In: Novais R, Alvarez V. VH, Barros NF, Fontes RL, Cantarutti RB, Neves JCL editors. Fertilidade do solo. 1ª ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p.472-547.
- Oliveira JPM, Ermani PR, Gatiboni LC, Pegoraro, A. Alterações químicas e avaliação de p disponível naregião adjacente aos grânulos de superfosfatotriplo e diamônio fosfato em solos ácidos. *R Bras Ci Solo.* 2014;38:1526-536.
- Olsen SR, Watanabe FS. A methodto determine a phosphorusadsorptionmaximumofsoil as measuredbythe Langmuir isotherm. *Soil Sci Soc Am Proceed.* 1957;21:144-49.
- Parent LE, Khiari L, Pellerin A. The P fertilization of potato: Increasing agronomic efficiency and decreasing environmental risk. *Acta Hort.* 2003;627: 35-41.
- Pavinato PC, Rosolem CA. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. *R Bras Ci Solo.* 2008;32:911-20.
- Rheinheimer DS, Anghinoni I, Flores AF. Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 2002;33:1853-871.
- Richards LA. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Sci.* 1949;68:95-112.
- Ruiz HA, Fernandes B, Novais RF, Alvarez VVH, Pereira PA. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois Latossolos. *R Bras Ci Solo.* 1988;12:43-48.
- Schlindwein JA, Gianello C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. *R Bras Ci Solo.* 2008;32:2037-49.

- Severino LS, Costa FX, Beltrão NEM, Lucena AMA, Guimarães MM. Mineralização da torta de mamona, esterco bovino e bagaço de cana estimada pela respiração microbiana. *R Bio Ci Terra*. 2004;5: 45-9.
- Silva AA, Silva TS, Vasconcelos ACP, Lana RMQ. Influência da aplicação de diferentes fontes de MAP revestido com polímeros de liberação gradual na cultura do milho. *Biosci J*. 2012;28:240-50.
- Silva RC. Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada [tese]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; 2013.
- Silva Junior HR, Lima RE, Perin A. Adubação fosfatada com fertilizantes polimerizados na cultura da soja. In: *Anais II Jornada da produção científica da educação profissional e tecnológica da região centro-oeste*; 2008. Cuiabá-MT.
- Souza DMG, Lobato E, Rein TA. Adubação com fósforo. In: Souza DMG, Lobato E. (Ed.). *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa-CPAC, 2004.
- Sousa RTX. Fertilizante organomineral para a produção de cana-de-açúcar [tese]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2014.
- Tiritan CS, Santos DH, Foloni JSS, Alves Júnior R. Adubação fosfatada mineral e organomineral no desenvolvimento do milho. *Colloq Agr*. 2010;6: 08-14.
- Trenkel ME. *Slow and controlled-release and stabilized fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Efficiency in Agriculture*. 2nd ed. Paris: IFA, 2010.
- Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. *Análise de solo, plantas e outros materiais*. 2nd .ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1995. (BoletimTécnico, 5)
- Tomaszewska M, Jarosiewicz A, Karakulski K. Physical and chemical characteristics of polymer coatings in CRF formulation. *Desalination*. 2002;146:319-23.
- Valderrama M, Buzetti S, Benett CGS, Andreotti M, Teixeira Filho MCM. Fontes e doses de NPK em milho irrigado sob plantio direto. *Pesq Agropec Trop*. 2011;41:254-63.
- Valderrama M, Costa KAP, Castro DS, Privado CJT, Figueredo RS, Costa CM, Cassel C. Doses e fontes de fósforo convencional e polimerizado na cultura do milho. In: *Anais Fertbio*. 2010. Guarapari: Espírito Santo.
- Vieira BARM, Teixeira MM. Adubação de liberação controlada chega como solução. *R Camp Neg*. 2004;41:4-8.

Vitti GC, Heirinchs R. Formas tradicionais e alternativas de obtenção e utilização do nitrogênio e do enxofre: uma visão Holística. In: Yamada, T.; Stipp SR, Vitti GC. (Ed.). Nitrogênio e Enxofre: na agricultura brasileira. Piracicaba: IPNI, p.109-157, 2007.

## **APÊNDICE**

Tabela 1A. Análise de variância dos teores de P disponível, extraído por Mehlich-1 e por água, considerando as distâncias (Dist), os potenciais matriciais ( $\Psi_m$ ) e os tempos de contato (TC) para os diferentes fertilizantes fosfatados (Fert)

FV	GL	Quadrado médio	
		P Mehlich-1	P Água
Fert	3	16397398,77**	2370963,87**
Dist	3	771614524,66**	118581753,85**
$\Psi_m$	1	140886,90**	55821,02**
TC	5	625062,87**	744404,45**
Fert d/ Dist1	3	34183465,89**	5522971,04**
Fert d/ Dist2	3	4831449,87**	521455,19**
Fert d/ Dist3	3	34643,47**	416,79 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4	3	1,72 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert1 d/ Dist1	1	1352465,40**	298909,15**
$\Psi_m$ d/ Fert1 d/ Dist2	1	874277,75**	126484,57**
$\Psi_m$ d/ Fert1 d/ Dist3	1	53009,42**	1422,30 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert1 d/ Dist4	1	1,63 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert2 d/ Dist1	1	5236532,33**	755208,72**
$\Psi_m$ d/ Fert2 d/ Dist2	1	440194,51**	18930,95**
$\Psi_m$ d/ Fert2 d/ Dist3	1	42408,52**	885,62 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert2 d/ Dist4	1	0,70 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert3 d/ Dist1	1	1255382,64**	323174,96**
$\Psi_m$ d/ Fert3 d/ Dist2	1	627330,01**	113573,01**
$\Psi_m$ d/ Fert3 d/ Dist3	1	6964,01 <sup>ns</sup>	44,75 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert3 d/ Dist4	1	0,24 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert4 d/ Dist1	1	62768,96**	4111,64 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert4 d/ Dist2	1	155252,15**	39020,49**
$\Psi_m$ d/ Fert4 d/ Dist3	1	187,86 <sup>ns</sup>	0,82 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert4 d/ Dist4	1	0,15 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist1 d/ $\Psi_m$ 1 d/ TC1	3	6559852,70**	2090079,40**
Fert d/ Dist1 d/ $\Psi_m$ 1 d/ TC2	3	3894964,29**	720812,93**
Fert d/ Dist1 d/ $\Psi_m$ 1 d/ TC3	3	2152750,19**	298722,45**
Fert d/ Dist1 d/ $\Psi_m$ 1 d/ TC4	3	1570319,02**	148771,64**
Fert d/ Dist1 d/ $\Psi_m$ 1 d/ TC5	3	1332294,61**	105526,77**
Fert d/ Dist1 d/ $\Psi_m$ 1 d/ TC6	3	842503,49**	103875,13**
Fert d/ Dist1 d/ $\Psi_m$ 2 d/ TC1	3	5741794,84**	1353873,47**
Fert d/ Dist1 d/ $\Psi_m$ 2 d/ TC2	3	5141057,83**	859178,14**
Fert d/ Dist1 d/ $\Psi_m$ 2 d/ TC3	3	4288883,35**	642805,89**
Fert d/ Dist1 d/ $\Psi_m$ 2 d/ TC4	3	2833584,29**	416092,38**
Fert d/ Dist1 d/ $\Psi_m$ 2 d/ TC5	3	2346527,01**	358588,52**
Fert d/ Dist1 d/ $\Psi_m$ 2 d/ TC6	3	2019805,31**	271150,56**
Fert d/ Dist2 d/ $\Psi_m$ 1 d/ TC1	3	167726,16**	1154,40 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist2 d/ $\Psi_m$ 1 d/ TC2	3	349715,55**	50403,08**
Fert d/ Dist2 d/ $\Psi_m$ 1 d/ TC3	3	554430,20**	71189,74**
Fert d/ Dist2 d/ $\Psi_m$ 1 d/ TC4	3	559390,72**	73181,46**
Fert d/ Dist2 d/ $\Psi_m$ 1 d/ TC5	3	754448,82**	83837,93**
Fert d/ Dist2 d/ $\Psi_m$ 1 d/ TC6	3	713060,15**	61182,54**

Fert d/ Dist2 d/ Ψm2 d/ TC1	3	19997,80**	377,53 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist2 d/ Ψm2 d/ TC2	3	255534,60**	28843,62**
Fert d/ Dist2 d/ Ψm2 d/ TC3	3	364519,61**	51594,40**
Fert d/ Dist2 d/ Ψm2 d/ TC4	3	475880,31**	77056,24**
Fert d/ Dist2 d/ Ψm2 d/ TC5	3	521388,68**	71530,62**
Fert d/ Dist2 d/ Ψm2 d/ TC6	3	761285,42**	73528,85**
Fert d/ Dist3 d/ Ψm1 d/ TC1	3	34,67 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist3 d/ Ψm1 d/ TC2	3	730,67 <sup>ns</sup>	1,28 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist3 d/ Ψm1 d/ TC3	3	1174,63 <sup>ns</sup>	7,16 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist3 d/ Ψm1 d/ TC4	3	14272,68 <sup>ns</sup>	115,05 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist3 d/ Ψm1 d/ TC5	3	20254,17 <sup>ns</sup>	360,12 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist3 d/ Ψm1 d/ TC6	3	30992,61**	1120,93 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist3 d/ Ψm2 d/ TC1	3	9,22 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist3 d/ Ψm2 d/ TC2	3	106,52 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist3 d/ Ψm2 d/ TC3	3	402,36 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist3 d/ Ψm2 d/ TC4	3	1212,01 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist3 d/ Ψm2 d/ TC5	3	1463,80 <sup>ns</sup>	0,79 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist3 d/ Ψm2 d/ TC6	3	1845,62 <sup>ns</sup>	7,69 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4 d/ Ψm1 d/ TC1	3	0,11 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4 d/ Ψm1 d/ TC2	3	0,05 <sup>ns</sup>	0,003 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4 d/ Ψm1 d/ TC3	3	0,10 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4 d/ Ψm1 d/ TC4	3	0,16 <sup>ns</sup>	0,007 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4 d/ Ψm1 d/ TC5	3	0,39 <sup>ns</sup>	0,004 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4 d/ Ψm1 d/ TC6	3	1,07 <sup>ns</sup>	0,006 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4 d/ Ψm2 d/ TC1	3	0,10 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4 d/ Ψm2 d/ TC2	3	0,06 <sup>ns</sup>	0,003 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4 d/ Ψm2 d/ TC3	3	0,02 <sup>ns</sup>	0,003 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4 d/ Ψm2 d/ TC4	3	0,04 <sup>ns</sup>	0,002 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4 d/ Ψm2 d/ TC5	3	0,12 <sup>ns</sup>	0,002 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4 d/ Ψm2 d/ TC6	3	0,20 <sup>ns</sup>	0,003 <sup>ns</sup>
Resíduo	573	8092,53	2257,87
CV (%)		7,39	10,40

Fert1 = fosfato monoamônico convencional; Fert2 = fosfato monoamônico revestido com polímero; Fert3 = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; Fert4 = fosfato monoamônico granulado com composto suíno; Dist1 = 0,0 - 0,5 cm; Dist2 = 0,5 - 1,0 cm; Dist3 = 1,0 - 1,5 cm; Dist4 = 1,5 - 2,0 cm; Ψm1 = - 10 kPa; Ψm2 = - 50 kPa; TC1 = 2 dias; TC2 = 4 dias; TC3 = 6 dias; TC4 = 8 dias; TC5 = 10 dias; TC6 = 14 dias. \*\* significativo a 1 % de probabilidade e <sup>ns</sup> não significativo pelo Teste F.

Tabela 2A. Equações de regressão dos teores de P disponível, extraídos por Mehlich-1, nas distâncias ao longo dos tempos de contato influenciados pelos fertilizantes fosfatados e potenciais matriciais

Tratamentos	Equação de regressão	R <sup>2</sup>
MAP d/ Dist1 d/ Ψm1	$Y = 9157,54 - 2486,87 * X^{0,5} + 274,22 * X$	0,980
POL d/ Dist1 d/ Ψm1	$Y = 8326,8 - 2535,2 * X^{0,5} + 338,0 * X$	0,932
TF d/ Dist1 d/ Ψm1	$Y = 7295,3 - 1926,5 * X^{0,5} + 264,2 * X$	0,872
CS d/ Dist1 d/ Ψm1	$Y = 3815,57 - 536,39 * X^{0,5} + 68,91 * X$	0,962
MAP d/ Dist1 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5039,97$	-
POL d/ Dist1 d/ Ψm2	$Y = 4166,92 + 1573,19 * X^{0,5} - 460,94 * X$	0,981
TF d/ Dist1 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4548,66$	-
CS d/ Dist1 d/ Ψm2	$Y = 2342,25 + 848,99 * X^{0,5} - 211,37 * X$	0,941
MAP d/ Dist2 d/ Ψm1	$Y = - 762,87 + 1108,61 * X^{0,5} - 139,58 * X$	0,982
POL d/ Dist2 d/ Ψm1	$Y = - 388,44 + 611,91 * X^{0,5} - 38,31 * X$	0,963
TF d/ Dist2 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 647,72$	-
CS d/ Dist2 d/ Ψm1	$Y = - 341,42 + 296,8 * X^{0,5} - 17,08 * X$	0,989
MAP d/ Dist2 d/ Ψm2	$Y = - 719,95 + 761,83 * X^{0,5} - 59,32 * X$	0,981
POL d/ Dist2 d/ Ψm2	$Y = - 1110,96 + 1166,2 * X^{0,5} - 162,28 * X$	0,974
TF d/ Dist2 d/ Ψm2	$Y = - 431,09 + 528,14 * X^{0,5} - 71,27 * X$	0,939
CS d/ Dist2 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 191,10$	-
MAP d/ Dist3 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 96,88$	-
POL d/ Dist3 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 80,12$	-
TF d/ Dist3 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 32,61$	-
CS d/ Dist3 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6,99$	-
MAP d/ Dist3 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 30,42$	-
POL d/ Dist3 d/ Ψm2	$Y = - 33,691 + 30,667 * X^{0,5} - 3,457 * X$	0,929
TF d/ Dist3 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 8,52$	-
CS d/ Dist3 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 3,04$	-
MAP d/ Dist4 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1,55$	-
POL d/ Dist4 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1,43$	-
TF d/ Dist4 d/ Ψm1	$Y = 0,1544 + 0,56991 * X^{0,5} - 0,06397 * X$	0,964
CS d/ Dist4 d/ Ψm1	$Y = - 0,018994 + 0,671518 * X^{0,5} - 0,097479 * X$	0,993
MAP d/ Dist4 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1,18$	-
POL d/ Dist4 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1,19$	-
TF d/ Dist4 d/ Ψm2	$Y = 0,05358 + 0,54349 * X^{0,5} - 0,05972 * X$	0,992
CS d/ Dist4 d/ Ψm2	$Y = - 0,28170 + 0,74046 * X^{0,5} - 0,10155 * X$	0,906

MAP = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; TF = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; CS = fosfato monoamônico granulado com composto suíno; Dist1 = 0,0 - 0,5 cm; Dist2 = 0,5 - 1,0 cm; Dist3 = 1,0 - 1,5 cm; Dist4 = 1,5 - 2,0 cm; Ψm1 = - 10 kPa; Ψm2 = - 50 kPa. \*\*, \*, ° significativo a 1, 5 e 10 %, respectivamente.

Tabela 3A. Equações de regressão dos teores de P disponível, extraídos por água, nas distâncias ao longo dos tempos de contato influenciados pelos fertilizantes fosfatados e potenciais matriciais

Tratamentos	Equação de regressão	R <sup>2</sup>
MAP d/ Dist1 d/ Ψm1	$Y = 5297,64 - 2040,96^{**}X^{0,5} + 257,89^{**}X$	0,998
POL d/ Dist1 d/ Ψm1	$Y = 6087,4 - 2963,3^{*}X^{0,5} + 441,4^{*}X$	0,936
TF d/ Dist1 d/ Ψm1	$Y = 4107,0 - 1634,4^{o}X^{0,5} + 232,0X$	0,888
CS d/ Dist1 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1150,82$	-
MAP d/ Dist1 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 2041,52$	-
POL d/ Dist1 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1872,10$	-
TF d/ Dist1 d/ Ψm2	$Y = 3938,94 - 1250,05^{o}X^{0,5} + 141,02X$	0,936
CS d/ Dist1 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1169,33$	-
MAP d/ Dist2 d/ Ψm1	$Y = - 702,77 + 667,54^{*}X^{0,5} - 93,11^{*}X$	0,962
POL d/ Dist2 d/ Ψm1	$Y = - 518,44 + 491,33^{*}X^{0,5} - 66,01^{*}X$	0,959
TF d/ Dist2 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 221,35$	-
CS d/ Dist2 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 89,84$	-
MAP d/ Dist2 d/ Ψm2	$Y = - 457,16 + 407,26^{*}X^{0,5} - 48,34^{o}X$	0,967
POL d/ Dist2 d/ Ψm2	$Y = - 579,11 + 547,02^{**}X^{0,5} - 82,89^{**}X$	0,983
TF d/ Dist2 d/ Ψm2	$Y = - 230,56 + 223,496^{*}X^{0,5} - 30,862^{*}X$	0,969
CS d/ Dist2 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 32,81$	-
MAP d/ Dist3 d/ Ψm1	$Y = 25,8669 - 30,6806^{**}X^{0,5} + 8,992^{**}X$	0,995
POL d/ Dist3 d/ Ψm1	$Y = 18,902 - 23,189^{*}X^{0,5} + 6,924^{*}X$	0,976
TF d/ Dist3 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 2,47$	-
CS d/ Dist3 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,50$	-
MAP d/ Dist3 d/ Ψm2	$Y = 2,9133 - 3,1528^{o}X^{0,5} + 0,8796^{*}X$	0,932
POL d/ Dist3 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,82$	-
TF d/ Dist3 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,54$	-
CS d/ Dist3 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,24$	-
MAP d/ Dist4 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,24$	-
POL d/ Dist4 d/ Ψm1	$Y = - 0,36924 + 0,42114^{o}X^{0,5} - 0,06733^{o}X$	0,802
TF d/ Dist4 d/ Ψm1	$Y = - 0,27178 + 0,33029^{o}X^{0,5} - 0,05388X$	0,676
CS d/ Dist4 d/ Ψm1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,19$	-
MAP d/ Dist4 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,19$	-
POL d/ Dist4 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,20$	-
TF d/ Dist4 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,17$	-
CS d/ Dist4 d/ Ψm2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,16$	-

MAP = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; TF = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; CS = fosfato monoamônico granulado com composto suíno; Dist1 = 0,0 - 0,5 cm; Dist2 = 0,5 - 1,0 cm; Dist3 = 1,0 - 1,5 cm; Dist4 = 1,5 - 2,0 cm; Ψm1 = - 10 kPa; Ψm2 = - 50 kPa. \*\*, \*, ° significativo a 1, 5 e 10 % respectivamente.

## CAPÍTULO 3

### FERTILIZANTE FOSFATADO POLIMERIZADO E ORGANOFOSFATADOS E O FLUXO DIFUSIVO DE FÓSFORO NO SOLO

#### RESUMO

Os fertilizantes fosfatados de liberação lenta podem exercer importante papel na disponibilidade de fósforo (P) nos solos, aumentando sua concentração em solução, favorecendo o fluxo difusivo de P. Nesse trabalho objetivou-se avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados polimerizados e organofosfatados aplicados ao solo, em diferentes potenciais matriciais sobre o fluxo difusivo de P. O experimento seguiu esquema fatorial 4 x 2 x 4 em que os fatores em estudo foram: quatro fertilizantes fosfatados (fosfato monoamônico convencional - MAP; fosfato monoamônico revestido com polímero - POL; fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro - TF; e fosfato monoamônico granulado com composto suíno - CS), dois potenciais matriciais (- 10 e - 50 kPa) e quatro distâncias de inserção da resina de troca aniônica (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 cm distantes dos grânulos dos fertilizantes fosfatados), com quatro repetições. Utilizaram-se como câmara de fluxo difusivo caixas gerboxs, onde foram acondicionadas resinas de troca aniônica (RTA). O experimento foi conduzido em condições de laboratório, com temperatura controlada a  $25 \pm 2$  °C, por 15 dias. Após esse período, as RTA foram retiradas e lavadas com jatos de água e, posteriormente, o P foi desorvido com solução de  $\text{NH}_4\text{Cl}$   $0,8 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{HCl}$   $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ . Os dados foram submetidos à análise de variância, e desdobrados em contrastes ortogonais. Os fertilizantes fosfatados, polimerizado e organofosfatados, promoveram liberação mais lenta de P para a solução do solo. O MAP apresentou os maiores valores de fluxo difusivo de P, seguidos do POL, TF e CS. Os potenciais matriciais permitiram a diferenciação dos fertilizantes fosfatados estudados no fluxo difusivo de P. Os fertilizantes de liberação lenta controlaram melhor a liberação de P para ambos os potenciais.

**Palavras-chave:** difusão, resina de troca aniônica, tecnologia em fertilizante.

## CHAPTER 3

### FERTILIZER PHOSPHORUS POLYMERIZED AND ORGANOPHOSPHORUS AND FLUX PHOSPHORUS DIFFUSION SOIL

#### ABSTRACT

Slow release Phosphate fertilizers may play an important role in the availability of phosphorus (P) in the soil, increasing its concentration in solution, favoring the diffusive flux of P. The aim of this study was to evaluate the effect of phosphate fertilizers and polymerized organophosphate applied to the soil at different matric potentials of the diffusive flux of P. The experiment followed a factorial 4x2x4 in which the factors studied were: four phosphate fertilizers (conventional monoammonium phosphate - MAP, monoammonium phosphate coated with polymer - POL, monoammonium phosphate pelletized with filter cake - TF, and granulate with monoammonium phosphate compound pig - CS), two matric potentials (- 10 and - 50 kPa) and four insertion distances of anion exchange resin (0.5; 1.0; 1.5 and 2.0 cm distant from beads of phosphate fertilizers), with four replications. They were used as flux chamber diffusive gerboxs boxes where anion exchange resins were packed (RTA). The experiment was conducted in laboratory conditions, with controlled temperature at  $25 \pm 2$  ° C for 15 days. After this period, the RTA were removed and washed with water jets and thereafter was desorbed P with  $\text{NH}_4\text{Cl}$  solution  $0.8 \text{ mol L}^{-1} \text{ HCl} + 0.2 \text{ mol L}^{-1}$ . Data were submitted to analysis of variance, and broken down into orthogonal contrasts. Phosphate fertilizers, polymerized and organophosphate, promoted slower release of P to the soil solution. MAP showed the largest diffusive flux values of P, followed by POL, TF and CS. The matric potentials allowed differentiation of phosphate fertilizers studied in the diffusive flux of P. The slow release fertilizer better controlled release of P for both potentials.

**Keywords:** diffusion, anion exchange resin, fertilizer technology.

## 1. INTRODUÇÃO

A baixa disponibilidade de fósforo (P) nos solos é um dos fatores mais limitante na produtividade das culturas de regiões tropicais (DeLong et al., 2013). Esses solos, quando predominam a mineralogia oxídica, possuem elevada capacidade de adsorção de P (Novais et al., 2007), contribuindo para a baixa concentração desse nutriente na solução do solo (Fink et al., 2014) e, conseqüentemente, reduzindo o fluxo difusivo (difusão) de P (FDP) no solo (Raghothama e Karthikeyan, 2005).

O principal mecanismo de transporte de P no solo é o fluxo difusivo (Santner et al., 2015), e tem sido estimado diretamente pelo uso de papel-filtro impregnado com óxidos de ferro e de alumínio (Degryse e McLaughlin, 2014) e pela utilização de resina de troca iônica (Fink et al., 2016).

Vários fatores podem influenciar o FDP no solo, como a interação do P com os componentes da fase sólida (Oliveira et al., 2004), o tipo de fertilizante utilizado e a umidade do solo (Costa et al., 2006).

O aumento do conteúdo volumétrico de água no solo favorece o FDP pelo seu efeito direto sobre o coeficiente de difusão, devido à redução da tortuosidade do caminho difusivo e da viscosidade da água, aumentando o fator de impedância e, conseqüentemente, o valor do coeficiente de difusão (Ruiz et al., 1988; Costa et al., 2006; Novais et al., 2007).

Estudando o efeito de níveis de umidade do solo e fontes de P sobre o fluxo difusivo desse nutriente, Costa et al. (2009) constataram que o incremento do conteúdo de água no solo aumentou o fluxo difusivo de P e que o fosfato monoamônico favoreceu maior FDP, comparado ao fosfato de potássio e o fosfato monocálcico, demonstrando que o cátion acompanhante do ânion fosfato interfere no FDP no solo.

Em função dos fatores mencionados, alternativas tecnológicas têm sido buscadas para aumentar a disponibilidade de P no solo e, conseqüentemente, aumentar o fluxo difusivo desse nutriente. Atualmente, têm-se utilizado fertilizantes fosfatados revestidos com polímeros com a finalidade de disponibilizar lentamente o P às plantas e aumentar a disponibilidade desse nutriente por um maior período de tempo (Trenkel, 2010), possibilitando aumento no FDP.

Os fertilizantes de liberação lenta são aqueles que atrasam a disponibilidade inicial dos nutrientes por meio de diferentes mecanismos, com a finalidade de

disponibilizá-los lentamente e otimizar a absorção pelas plantas, reduzindo perdas (Zavaschi, 2010).

Outra técnica utilizada é a mistura de fertilizantes fosfatados com algum tipo de material orgânico, como por exemplo, torta de filtro (Souza, 2014) e composto suíno (Ferreira, 2014). O material orgânico misturado com a fonte mineral promove proteção física, assim como proteção química do P, diminuindo a adsorção.

A proteção física refere-se à barreira imposta pelo revestimento ao contato direto do fertilizante a matriz do solo. A proteção química se baseia na presença de ácidos orgânicos, oriundos do material orgânico presente no fertilizante, na solução ao redor do grânulo. Esses ácidos orgânicos podem competir pelos sítios de adsorção na matriz do solo; e, ou realizar ligações com o P na solução, via ponte metálica, em ambos os casos, diminuindo a intensidade de adsorção.

A decomposição da matéria orgânica libera ácidos orgânicos, que podem bloquear os sítios de adsorção de P (Andrade et al., 2003), interferindo diretamente no fluxo difusivo, podendo propiciar maior FDP no solo (Andrade et al., 2013).

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados polimerizados e organofosfatados aplicados ao solo, em diferentes potenciais matriciais sobre o FDP.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido em condições de laboratório, com temperatura controlada a  $25 \pm 2$  °C. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições, seguindo esquema fatorial 4 x 2 x 4 em que os fatores em estudo foram: quatro fertilizantes fosfatados, dois potenciais matriciais (- 10 e - 50 kPa) e quatro distâncias de inserção da resina de troca aniônica (RTA) (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 cm distantes dos grânulos dos fertilizantes fosfatados), totalizando 128 unidades experimentais.

Para a realização do experimento foram coletadas amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo textura argilosa, na profundidade de 20 - 40 cm. As amostras de solo foram secas e passadas em peneira de 2 mm para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA), e posteriormente foi realizada a caracterização química, física (Tabela 1) e mineralógica (Figura 1).

Tabela 1. Caracterização física e química do Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) na profundidade de 20 - 40 cm

Característica	LVA
Argila ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) <sup>1/</sup>	0,437
Densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) <sup>2/</sup>	1,10
Retenção de água ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) <sup>3/</sup>	
- 10 kPa	0,281
- 50 kPa	0,232
- 1500 kPa	0,166
pH-H <sub>2</sub> O <sup>4/</sup>	4,96
Al <sup>3+</sup> ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) <sup>5/</sup>	0,80
Ca <sup>2+</sup> ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) <sup>5/</sup>	0,45
Mg <sup>2+</sup> ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) <sup>5/</sup>	0,32
H+Al ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) <sup>6/</sup>	5,70
T ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) <sup>7/</sup>	6,55
K ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) <sup>8/</sup>	20,50
P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) <sup>8/</sup>	0,61
P-rem ( $\text{mg L}^{-1}$ ) <sup>9/</sup>	14,30
CMAP ( $\text{mg cm}^{-3}$ ) <sup>10/</sup>	1,60

<sup>1/</sup> Método da pipeta (Almeida et al., 2012); <sup>2/</sup> Método da proveta (Embrapa, 1997); <sup>3/</sup> Extrator de placa porosa (Richards, 1949); <sup>4/</sup> Relação solo-água 1:2,5; <sup>5/</sup> Extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; <sup>6/</sup> Extrator acetato de cálcio 0,5 mol/L pH 7,0; <sup>7/</sup> CTC a pH 7,0; <sup>8/</sup> Extrator Mehlich-1; <sup>9/</sup> Fósforo remanescente (Alvarez V. et al., 2000); <sup>10/</sup> Capacidade máxima de adsorção de fósforo (Olsen e Watanabe, 1957).

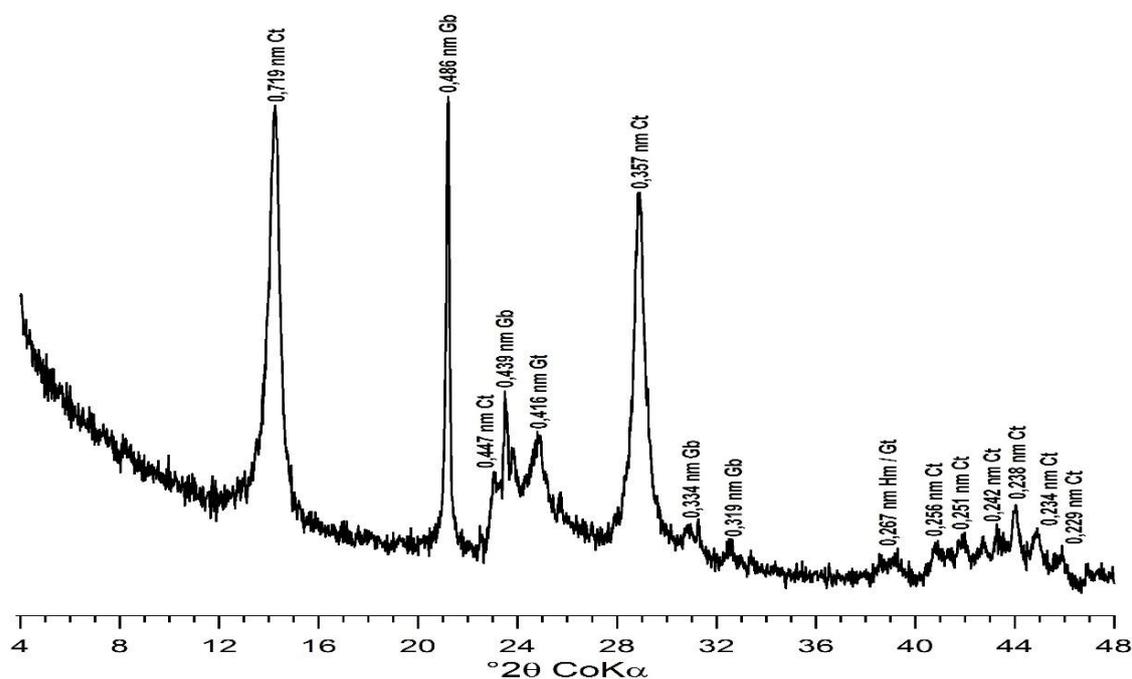


Figura 1. Difratograma de raios-X da fração argila do Latossolo Vermelho Amarelo.

Após a caracterização química do solo, o pH foi ajustado para 6,0 utilizando o método padrão da neutralização do pH, baseado na curva de incubação com carbonato de cálcio.

Como unidade experimental foram utilizadas caixas plásticas tipo gerbox (dimensões de 11 cm de comprimento, 11 cm de largura e 3 cm de altura) que serviram como câmara de difusão (fluxo difusivo). Para avaliação do FDP no solo foi utilizada a resina de troca aniônica, tipo base forte AMI-7001S.

As amostras de solo (100 cm<sup>3</sup>) foram adicionadas nas caixas gerbox e, em seguida, foi adicionada a quantidade de água necessária para atingir os potenciais matriciais desejados. Após a aplicação do volume de água, as caixas plásticas foram incubadas por 24 horas para assegurar a distribuição uniforme da água através do solo contido em cada caixa gerbox.

Após esse período, os grânulos dos fertilizantes fosfatados foram colocados no centro das caixas. Em seguida, foram colocadas duas lâminas de RTA (uma de cada lado do fertilizante) em cada unidade experimental de acordo com as distâncias de inserção da RTA. Posteriormente, as caixas foram tampadas e vedadas com fita adesiva para evitar possíveis variações na umidade.

Os fertilizantes fosfatados utilizados foram: fosfato monoamônico convencional (MAP); fosfato monoamônico revestido com polímero (POL); fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro (TF); e fosfato monoamônico granulado com composto suíno (CS). A caracterização química desses fertilizantes é apresentada na tabela 2.

Tabela 2. Caracterização química dos fertilizantes fosfatados utilizados no experimento

Fertilizantes	N <sup>1</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>2</sup>	K <sub>2</sub> O <sup>3</sup>	C <sup>4</sup>	CTC <sup>5</sup>	C/P	pH <sup>6</sup>
	----- % -----		-----	-----	mmolc kg <sup>-1</sup>		
MAP	11,0	46,2	0	-	-	-	4,1
POL	9,0	44,3	0	-	-	-	3,7
TF	6,0	30,0	0	8,0	80,0	0,3	5,1
CS	6,9	26,0	1,6	12,7	339,1	0,5	4,9

<sup>1</sup>N total (Mapa, 2015); <sup>2</sup>P total (Mapa, 2015); <sup>3</sup>K = Potássio solúvel em água (Mapa, 2015); <sup>4</sup>C = Carbono orgânico total (Mapa, 2015); <sup>5</sup>CTC = Capacidade de Troca Catiônica (Mapa, 2015); <sup>6</sup>pH em CaCl<sub>2</sub> (Mapa, 2015).

O POL utilizado foi o KimCoat P. O CS foi produzido na proporção de 48,75 % de composto suíno, 48,75 % de fosfato monoamônico e 2,5 % de silicato de sódio, que é utilizado para aumentar a resistência dos grânulos à quebra ou à abrasão, sendo denominado de aglutinantes. O composto suíno utilizado na mistura com o fosfato monoamônico foi produzido pela compostagem de dejetos suínos com gramínea.

A fabricação do TF foi através do processo de peletização após a mistura de torta de filtro, fosfato monoamônico e um polímero orgânico biodegradável. A torta de filtro foi utilizada após o processo de compostagem.

A dose de P aplicada foi de 20 % da CMAP, equivalente a uma dose de 320 mg dm<sup>-3</sup> de P. Como os fertilizantes contêm diferentes teores de P, foram selecionados grânulos cujo peso correspondeu à quantidade de P desejada. Os fertilizantes fosfatados utilizados foram padronizados em peneira de 2 a 4 mm a fim de homogeneizar sua granulometria.

Após 15 dias de incubação, a RTA foi retirada das caixas gerboxs e lavada com jatos de água para remoção do solo aderido. O fósforo retido pela RTA foi extraído pela agitação com 50 mL de solução NH<sub>4</sub>Cl 0,8 mol L<sup>-1</sup> + HCl 0,2 mol L<sup>-1</sup> durante duas horas, em agitador horizontal a 220 rotações por minuto, adaptado de Raij et al. (1987). A concentração de P foi determinada por colorimetria (Tedesco et al., 1995).

Os tamanhos das lâminas de RTA colocadas nas distâncias de inserção 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 cm distantes dos grânulos dos fertilizantes fosfatados foram, respectivamente, 2,5 x 1,0; 3,5 x 1,0; 4,5 x 1,0 e 5,5 x 1,0 cm (comprimento x largura).

A estimativa do FDP foi realizada pela quantificação do P adsorvido a uma face de adsorção das lâminas de RTA, por centímetro quadrado, no período de 15 dias.

Os dados foram submetidos à análise de variância utilizando o programa SISVAR (Ferreira, 2008). Os tratamentos foram avaliados por meio da comparação de médias por contrastes ortogonais (Alvarez V. e Alvarez, 2006) e testados pelo teste F nos níveis de 1 e 5 % de probabilidade.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Observou-se variação nos valores de FDP (Tabela 3), evidenciando diferenças entre os fertilizantes (MAP, POL, TF e CS), como demonstrado pelos contrastes C1, C2 e C3 (Tabela 4).

Tabela 3. Médias dos valores de fluxo difusivo de P ( $\eta\text{mol m}^{-2}$  / 15 dias) considerando as distâncias e os potenciais matriciais ( $\Psi_m$ ) para os diferentes fertilizantes fosfatados

Fertilizantes	$\Psi_m$ (kPa)	Distâncias (cm)			
		0,0 - 0,5	0,5 - 1,0	1,0 - 1,5	1,5 - 2,0
MAP	- 10	43,07	11,19	0,57	0,18
	- 50	48,69	3,05	0,26	0,20
POL	- 10	32,20	4,87	0,33	0,20
	- 50	30,13	1,43	0,27	0,19
TF	- 10	19,74	3,84	0,29	0,22
	- 50	19,35	2,54	0,24	0,17
CS	- 10	17,56	3,41	0,24	0,18
	- 50	18,50	0,42	0,22	0,17

MAP = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; TF = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; CS = fosfato monoamônico granulado com composto suíno.

Tabela 4. Contrastes ortogonais (C) dos valores de fluxo difusivo de P ( $\eta\text{mol m}^{-2}$  / 15 dias) para os diferentes fertilizantes fosfatados

Variáveis	C1	C2	C3
P	6,87**	3,26**	0,71**

C1: MAP vs POL + TF + CS (3+,---); C2: POL vs TF + CS (2+,-); C3: TF vs CS (+,-). \*\* significativo a 1 % de probabilidade pelo Teste F. MAP = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; TF = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; CS = fosfato monoamônico granulado com composto suíno.

Como observado na tabela 3, o FDP ocorre em curtas distâncias, ressaltando que, a reposição de P na solução nas proximidades dos grânulos dos fertilizantes fosfatados desempenha papel fundamental na disponibilidade desse nutriente às plantas.

Verificou-se que os valores de FDP foram superiores para o MAP comparado ao POL + TF + CS (C1, Tabela 4). A rápida liberação de P do MAP favorece a saturação dos sítios de adsorção de P nas regiões adjacentes à adição do fertilizante, aumentando a disponibilidade e o FDP temporariamente (Oliveira et al., 2014; Wang e Chu, 2015), porém a diminuição da disponibilidade desse nutriente na solução do solo, reduz o FDP ao longo do tempo (Lana et al., 2014).

As tecnologias de revestimento aplicadas nos fertilizantes POL, TF e CS proporcionam liberação lenta de P para a solução do solo, observando menores valores de FDP, para o tempo estudado (Tabelas 3 e 4). Este fato pode ser melhor interpretado em relação à nutrição da planta ao longo do tempo. Estes fertilizantes, ao disponibilizarem lentamente o P para a solução do solo, podem ocasionar valores

constantes de FDP ao longo do tempo, proporcionando melhor sincronismo entre transporte de P no solo e absorção pela planta.

Avaliando a disponibilidade de P em solos com diferentes texturas, a partir da incubação com fosfato monoamônico revestido com polímero, Machado e Souza (2012) observaram que a aplicação deste fertilizante aumentou a disponibilidade de P ao longo do tempo de incubação, e assim, podendo aumentar o FDP no solo.

Figueiredo et al. (2012), avaliando o efeito da aplicação do fosfato monoamônico convencional em relação ao fosfato monoamônico revestido com polímero na cultura do milho, observaram que o fertilizante polimerizado promoveu maior produtividade, produção de matéria seca total e altura de planta, em relação ao MAP convencional. Os autores atribuíram esses resultados à liberação lenta de P ao longo do ciclo da cultura, promovida pelo revestimento com polímeros, aumentando a disponibilidade de P, e conseqüentemente o FDP.

Comparando-se a tecnologia de revestimento com polímero (POL) e a de revestimento com material orgânico (TF e CS) (C2, Tabela 4), observou-se que os valores de FDP do POL foram superiores aos valores do TF + CS. Esse resultado está relacionado à lenta liberação de P dos fertilizantes TF + CS para a solução do solo, conforme observado pelo autor no Capítulo 2, resultando em menores valores de FDP.

A liberação dos nutrientes através de uma membrana de polímero não é significativamente afetada pelas propriedades do solo, tais como pH, textura e atividade microbiana, mas sim pela temperatura, umidade e permeabilidade do revestimento de polímero (Vitti e Reirinchs, 2007).

No caso dos fertilizantes revestidos por polímeros, há liberação eficiente de nutrientes quando há disponibilidade de água e temperatura ideal do solo em torno de 21 °C (Chitolina, 1994), sendo a liberação de P pelos grânulos de fertilizante diretamente proporcional à temperatura do solo, uma vez que o aumento da temperatura promove expansão da camada de polímero, provocando aumento de sua permeabilidade à água e maior liberação de P.

Isso pode explicar os maiores valores de FDP do POL em relação ao TF + CS, pois a temperatura durante a condução do experimento foi de  $25 \pm 2$  °C, que pode ter provocado a expansão da camada de polímero, liberando mais P para a solução do solo, e aumentando o FDP temporariamente.

Valderrama et al. (2011), estudando o efeito de fertilizantes fosfatados revestidos ou não com polímeros na cultura do milho, observaram que a temperatura

média em torno de 28 °C da região do estudo, pode ter favorecido a rápida liberação de P do fertilizante revestimento com polímero.

A aplicação do TF proporcionou valores superiores de FDP no solo em comparação ao CS (C3, Tabela 4). Esse resultado deve estar relacionado aos diferentes revestimentos (torta de filtro e composto suíno), em que cada fertilizante possui um processo de fabricação diferente, influenciando na liberação de P, e possivelmente, no FDP.

Quanto menor a distância (0,5 e 1,0 cm) em relação aos grânulos dos fertilizantes, maiores foram os valores de FDP do MAP em relação aos demais fertilizantes fosfatados (C4, Tabela 5). Este fato está relacionado à liberação mais rápida de P do MAP para a solução do solo e aumento da concentração desse nutriente nessas distâncias, como verificado pelo autor no capítulo 2, proporcionando maiores valores de FDP nessas distâncias.

As tecnologias de revestimento aplicadas nos fertilizantes fosfatados de liberação lenta proporcionam a liberação lenta do P ao longo do tempo, aumentando a disponibilidade de P (Almeida et al., 2012), e possivelmente, maior será o FDP no solo ao longo do tempo.

Horst et al. (2001) afirmaram que quanto maior a disponibilidade de P no solo maior será o gradiente de concentração deste elemento ocasionando, portanto, aumento no FDP no solo. Bastos et al. (2010) observaram que o incremento da concentração de P aumenta o coeficiente de difusão desse nutriente devido à saturação progressiva da superfície de adsorção, resultando no aumento do FDP.

Tabela 5. Contrastes ortogonais (C) dos valores de fluxo difusivo de P ( $\eta\text{mol m}^{-2} / 15$  dias) considerando as distâncias para os diferentes fertilizantes fosfatados

Contrastes	Distância (cm)			
	0,0 - 0,5	0,5 - 1,0	1,0 - 1,5	1,5 - 2,0
C4	22,97**	4,37**	0,15 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>
C5	12,38**	0,60**	0,05 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>
C6	1,51**	1,27**	0,04 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>

C4: MAP vs POL + TF + CS d/Distâncias (3+,---); C5: POL vs TF + CS d/Distâncias (2+,-,-); C6: TF vs CS d/Distâncias (+,-). \*\* significativo a 1 % de probabilidade e <sup>ns</sup> não significativo pelo Teste F. MAP = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; TF = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; CS = fosfato monoamônico granulado com composto suíno.

Observou-se valores superiores do FDP do POL quando comparados aos valores do TF + CS nas distâncias 0,5 e 1,0 cm do grânulo do fertilizante fosfatado (C5, Tabela 5). Isso está relacionado aos maiores teores de P disponível nessas distâncias pela aplicação do POL como observado no capítulo 2, resultando no aumento do gradiente de concentração de P, e com isso favorecendo maiores valores de FDP. Bastos et al. (2008), estudando o FDP em solos, relataram que o aumento da concentração de P nos solos estudados proporcionou os maiores valores de FDP.

Ao comparar o TF vs CS (C6, Tabela 5), notou-se valores superiores de FDP para o TF nas distâncias 0,5 e 1,0 cm do grânulo do fertilizante fosfatado. Fato que relaciona-se à maior concentração de P disponível pela aplicação do TF em relação ao CS nestas distâncias, como observado pelo autor no capítulo 2.

Com relação aos valores de FDP nas distâncias 1,5 e 2,0 cm, verificou-se que não houve diferenças nos contrastes C4, C5 e C6 (Tabela 5). Isso ocorreu por causa da diminuição da concentração de P com o aumento da distância para todos os fertilizantes, resultando em menores valores de FDP (Tabela 3). A movimentação de P em curtas distâncias foi relatada por Lombi et al. (2004) e Silva (2013).

Ao avaliar-se a mobilidade de P a partir da adição de fosfatos de amônio ou de cálcio, Oliveira et al. (2014) observaram que nas regiões com altas concentrações de P, como as que ocorrem ao redor dos grânulos de fertilizantes fosfatados, o P movimentou-se mais do que nas distâncias com menores concentrações de P, caso das regiões mais distantes dos grânulos. Isso demonstra que diminuindo a concentração de P, o FDP diminui com o aumento da distância de transporte de P.

Contrastando-se os potenciais matriciais (C7, Tabela 6), notou-se comportamento similar dos valores de FDP na distância de 0,5 cm para o MAP e o CS (C7, Tabela 6). Esse comportamento está relacionado aos maiores valores de FDP na distância de 1,0 cm para o MAP e o CS, no potencial matricial de - 10 kPa (C7, Tabela 6), devido ao maior FDP da primeira para a segunda distância proporcionado pelo maior conteúdo de água no solo no potencial matricial de - 10 kPa.

Na distância 1,0 cm, verificou-se que os valores de FDP para todos os fertilizantes apresentaram o mesmo comportamento (C7, Tabela 6). Esse resultado demonstra que o maior conteúdo volumétrico de água no potencial matricial de - 10 kPa favoreceu ao maior FDP para regiões mais distantes dos grânulos dos fertilizantes.

Tabela 6. Contrastes ortogonais (C) dos valores de fluxo difusivo de P ( $\eta\text{mol m}^{-2} / 15$  dias) considerando as distâncias e os potenciais matriciais para os diferentes fertilizantes fosfatados

Fertilizantes	Distância (cm)	C7
MAP	0,0 - 0,5	- 5,62**
	0,5 - 1,0	8,14**
	1,0 - 1,5	0,31 <sup>ns</sup>
	1,5 - 2,0	- 0,01 <sup>ns</sup>
POL	0,0 - 0,5	2,07**
	0,5 - 1,0	3,44**
	1,0 - 1,5	0,06 <sup>ns</sup>
	1,5 - 2,0	0,00 <sup>ns</sup>
TF	0,0 - 0,5	0,38*
	0,5 - 1,0	1,31**
	1,0 - 1,5	0,05 <sup>ns</sup>
	1,5 - 2,0	0,06 <sup>ns</sup>
CS	0,0 - 0,5	- 0,94**
	0,5 - 1,0	2,99**
	1,0 - 1,5	0,02 <sup>ns</sup>
	1,5 - 2,0	0,01 <sup>ns</sup>

C7: Potencial matricial de - 10 kPa vs Potencial matricial de - 50 kPa d/ADubos d/Distâncias (+,-). \*\* significativo a 1 % de probabilidade e <sup>ns</sup> não significativo pelo Teste F. MAP = fosfato monoamônico convencional; POL = fosfato monoamônico revestido com polímero; TF = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; CS = fosfato monoamônico granulado com composto suíno.

Comparando os potenciais matriciais (- 10 vs - 50 kPa) na distância 1,0 cm, verificou-se que os valores de FDP para todos os fertilizantes apresentaram o mesmo comportamento (C7, Tabela 6). Esse resultado demonstra que o maior conteúdo volumétrico de água no potencial matricial de - 10 kPa favoreceu ao maior FDP para regiões mais distantes dos grânulos dos fertilizantes.

Na literatura, trabalhos descritos por Ruiz et al. (1988) e Costa et al. (2009) indicaram que o FDP aumenta com o incremento no conteúdo volumétrico de água no solo. A relação direta entre o coeficiente de fluxo difusivo (D) e o conteúdo de água no solo; e entre D e o FDP explica esses resultados, pois aumentando-se o conteúdo volumétrico de água maior será o FDP.

Em experimento realizado em casa de vegetação, Ruiz et al. (1988), avaliando o FDP, observaram que o conteúdo de água nos solos foi o fator mais importante no FDP para o fornecimento desse nutriente para as plantas, sendo os maiores valores de FDP relacionado ao maior conteúdo de água no solo.

Costa et al. (2006), estudando o efeito de níveis de umidade do solo sobre o FDP, observaram que o incremento do conteúdo de água nos solos aumentou o FDP em

todos os solos estudados, e concluíram que os maiores níveis de umidade do solo foram os mais eficientes no transporte de P.

Avaliando o efeito de fontes de P e níveis de umidade sobre o FDP, Costa et al. (2009) notaram tendência de aumento no FDP com o maior conteúdo de água no solo, e verificaram os maiores valores nos solos mais arenosos em comparação com os solos mais argilosos, que apresentaram maior capacidade máxima de adsorção de P.

Nas distâncias 1,5 e 2,0 cm não houve valores de contraste significativos quando comparados os potenciais matriciais (- 10 vs - 50 kPa) em todos os fertilizantes fosfatados (C7, Tabela 6). Este fato, possivelmente está relacionado ao decréscimo da concentração de P com o aumento da distância de transporte desse nutriente, e consequentemente, diminuição do FDP.

#### **4. CONCLUSÕES**

O MAP apresentou os maiores valores de fluxo difusivo de P. Os fertilizantes fosfatados, polimerizado e organofosfatados, proporcionaram liberação mais lenta de P para a solução do solo, seguindo a ordem crescente: CS < TF < POL.

Os valores de fluxo difusivo de P diminuiram com o aumento das distâncias de inserção da resina de troca aniônica em função do fertilizante fosfatado utilizado. As reduções dos valores de fluxo difusivo de P seguiram uma ordem crescente: CS, TF, POL e MAP.

Os potenciais matriciais permitiram a diferenciação dos fertilizantes fosfatados estudados no fluxo difusivo de P. O MAP foi mais influenciado pelos potenciais, e as tecnologias controlaram melhor a liberação de P para ambos os potenciais.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida BG, Donagemma GK, Ruiz HA, Braida JA, Viana JHM, Reichert, JMM, Oliveira LB, Ceddia MB, Wadt PS, Fernandes RBA, Passos RR, Dechen SCF, Klein VA, Teixeira WG. Padronização de Métodos para Análise Granulométrica no Brasil. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2012. (Comunicado técnico).
- Almeida LV B, Marinho CS, Muniz RA, Carvalho A J C. Disponibilidade de nutrientes e crescimento de porta-enxertos de citros fertilizados com fertilizantes convencionais e de liberação lenta. R Bras Frut. 2012;34:289-96.
- Alvarez VVH, Alvarez GAM. Comparações de médias ou testes de hipóteses? Contrastes! Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2006;31:24-34.
- Alvarez VVH, Novais RF, Dias LE, Oliveira JA. Determinação e uso do fósforo remanescente. Boletim Informativo. 2000;25:27-33.
- Andrade FV, Mendonça ES, Silva IR. Organic Acids and Diffusive Flux of Organic and Inorganic Phosphorus in Sandy-Loam and Clayey Latosols. Commun Soil Sci Plant Anal. 2013;44:1211-223.
- Andrade FV, Mendonça ES, Alvarez VVH, Novais R F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em latossolos e adsorção de fosfato. R Bras Ci Solo. 2003;27:1003-11.
- Bastos LA, Costa JP, Silva IF, Raposo RWC, Souto J.S. Influência de doses de fósforo no fluxo difusivo em solo de alagoas. R Bras Eng Agric Ambient. 2008;12:136-42.
- Bastos LA, Costa JP, Silva IF, Raposo RWC, Oliveira FA, Albuquerque AW. Resposta do milho a doses de fósforo. R Bras Eng Agric Ambient. 2010;14:485-91.
- Chitolina JC. Fertilizantes de lenta liberação de N: conceitos. Uréia coberta com enxofre. Piracicaba: ESALQ/USP, 1994. 16p.
- Costa JPV, Bastos AL, Reis LS, Martins GO, Santos AF. Difusão de fósforo em solos de alagoas influenciada por fontes do elemento e pela umidade. R Caatinga. 2009;22:229-35.
- Costa J PV, Barros NF, Albuquerque AW, Moura Filho G, Santos JR. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. R Bras Eng Agric Ambient. 2006;10:828-35.
- Degryse F, McLaughlin MJ. Phosphorus diffusion from fertilizer: visualization, chemical measurements, and modeling. Soil Sci Soc Am J. 2014;78:832-42.

- DeLonge M, Vandecar KL, D'Odorico P, Lawrence D. The impact of changing moisture conditions on short-term P availability in weathered soils. *Plant Soil*. 2013;365:201-09.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa; 1997.
- Ferreira DF. Sisvar: Um programa para análises e ensino de estatística. *Revista Symposium, Lavras*. 2008;6:36-41.
- Ferreira NR. Eficiência agronômica de fertilizantes organominerais sólidos e fluidos em relação à disponibilidade de fósforo [Dissertação]. Botucatu: Universidade Estadual Paulista; 2014.
- Figueiredo CC, Barbosa DV, Oliveira SA, Fagioli M, Sato JH. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho. *R Ci Agron*. 2012;43:446-52.
- Fink JR, Inda AV, Torrent J, Barrón V. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. *Acta Sci Agron*. 2014;36:379-87.
- Fink JR, Inda AV, Bavaresco J, Sanchez-Rodrigues AR, Barrón V, Torrent J, Bayer, C. Diffusion and uptake of phosphorus, and root development of corn seedlings, in three contrasting subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. *Bio Fert Soils*. 2016;52:203-10.
- Horst WJ, Kamh M, Jibrin JM, Chude VO. Agronomic measurements for increasing P availability to crops. *Plant Soil*. 2001;237:211-23.
- Lana MC, Rampim L, Schulzi LR, Kaefer JE, Hartmann-Schmidt MA, Ruppenthal V. Disponibilidade de fósforo para plantas de milho cultivadas com fertilizante organomineral e fosfato monoamônico. *Sci Agr Paran*. 2014;13:198-09.
- Lombi E, McLaughlin MJ, Johnston C, Armstrong RD, Holloway RE. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. *Soil Sci Soc Am J*. 2004;68:682-89.
- Machado VJ, Souza CHE. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. *Biosci J*. 2012;28:1-7.

- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Mapa. Secretaria de Defesa Agropecuária. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos. Brasília; 2014.
- Novais RF, Smith TJ, Nunes FNP. In: Novais R, Alvarez V. VH, Barros NF, Fontes RL, Cantarutti RB, Neves JCL editors. Fertilidade do solo. 1ª ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p.472-547.
- Oliveira EMM, Ruiz HA, Ferreira PA, Alvarez VH, Júnior JCFB. Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de fosfato, potássio e amônio em solos de Minas Gerais. R Bras Eng Agric Ambient. 2004;8:196-03.
- Oliveira JPM, Ernani PR, Gatiboni LC, Pegoraro A. Alterações químicas e avaliação de p disponível na região adjacente aos grânulos de superfosfato triplo e diamônio fosfato em solos ácidos. R Bras Ci Solo. 2014;38:1526-36.
- Olsen SR, Watanabe FS. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. Soil Sci Soc Am Proceed. 1957;21:44-149.
- Raghotama KO, Karthikeyan AS. Phosphate acquisition. Plant Soil. 2005;274:37-49.
- Raj Bvan, Quaggio JA, Cantarella H, Ferreira ME, Lopes AS, Bataglia OC. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.
- Richards LA. Methods of measuring soil moisture tension. Soil Sci. 1949;68:95-112.
- Ruiz HA, Fernandes B, Novais RF, Alvarez VVH, Pereira PA. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois Latossolos. R Bras Ci Solo. 1988;12:43-8.
- Santner J, Mannel M, Burrell LD, Hoefler C, Kreuzeder A, Wenzel WW. Phosphorus uptake by *Zea mays* L. is quantitatively predicted by infinite sink extraction of soil P. Plant Soil. 2015;386:371-83.
- Silva RC. Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada [tese]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; 2013.
- Sousa RTX. Fertilizante organomineral para a produção de cana-de-açúcar [tese]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2014.
- Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1995. (Boletim Técnico, 5).

- Trenkel ME. Slow and controlled-release and stabilized fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Efficiency in Agriculture. 2nd ed. Paris: IFA, 2010.
- Valderrama M, Buzetti S, Benett CGS, Andreotti M, Teixeira Filho MCM. Fontes e doses de NPK em milho irrigado sob plantio direto. *Pesq Agropec Trop.* 2011;4:254-63.
- Vitti GC, Heirinchs R. Formas tradicionais e alternativas de obtenção e utilização do nitrogênio e do enxofre: uma visão Holística. In: Yamada T, Stipp SR, Vitti GC. (Ed.). Nitrogênio e Enxofre: na agricultura brasileira. Piracicaba: IPNI, p.109-157, 2007.
- Zavaschi, E. Volatilização de amônia e produtividade do milho em função da aplicação de uréia revestida com polímeros [dissertação]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; 2010.
- Wang J, Chu G. Phosphate fertilizer form and application strategy affect phosphorus mobility and transformation in a drip-irrigated calcareous soil. *J Plant Nutr Soil Sci.* 2015;178:914-22.

## **APÊNDICE**

Tabela 1A. Análise de variância dos valores de fluxo difusivo de fósforo considerando as distâncias (Dist) e os potenciais matriciais ( $\Psi_m$ ) para os diferentes fertilizantes fosfatados (Fert)

FV	GL	Quadrado médio
Fert	3	174,93**
Dist	3	2307,49**
$\Psi_m$	1	7,22**
Fert d/ Dist1	3	510,38**
Fert d/ Dist2	3	15,71**
Fert d/ Dist3	3	0,02 <sup>ns</sup>
Fert d/ Dist4	3	0,0003 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert1 d/ Dist1	1	24,24**
$\Psi_m$ d/ Fert1 d/ Dist2	1	50,83**
$\Psi_m$ d/ Fert1 d/ Dist3	1	0,073 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert1 d/ Dist4	1	0,0001 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert2 d/ Dist1	1	3,28**
$\Psi_m$ d/ Fert2 d/ Dist2	1	9,09**
$\Psi_m$ d/ Fert2 d/ Dist3	1	0,003 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert2 d/ Dist4	1	0,00 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert3 d/ Dist1	1	0,11 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert3 d/ Dist2	1	1,31**
$\Psi_m$ d/ Fert3 d/ Dist3	1	0,002 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert3 d/ Dist4	1	0,002 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert4 d/ Dist1	1	0,68**
$\Psi_m$ d/ Fert4 d/ Dist2	1	6,86**
$\Psi_m$ d/ Fert4 d/ Dist3	1	0,0003 <sup>ns</sup>
$\Psi_m$ d/ Fert4 d/ Dist4	1	0,00003 <sup>ns</sup>
Resíduo	93	0,045
CV (%)	4,15	

Fert1 = fosfato monoamônico convencional; Fert2 = fosfato monoamônico revestido com polímero; Fert3 = fosfato monoamônico peletizado com torta de filtro; Fert4 = fosfato monoamônico granulado com composto suíno; Dist1 = 0,0 - 0,5 cm; Dist2 = 0,5 - 1,0 cm; Dist3 = 1,0 - 1,5 cm; Dist4 = 1,5 - 2,0 cm. \*\* significativo a 1 % de probabilidade e <sup>ns</sup> não significativo pelo Teste F.