

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DOUTORADO EM MANEJO DO SOLO**

**JAQUELINE PEREIRA MACHADO DE OLIVEIRA**

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SOLO NAS ADJACÊNCIAS DOS  
GRÂNULOS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS MINERAIS**

**LAGES – SC**

**2013**

**JAQUELINE PEREIRA MACHADO DE OLIVEIRA**

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SOLO NAS ADJACÊNCIAS DOS  
GRÂNULOS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS MINERAIS**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Manejo do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientador: Prof. PhD Paulo Roberto Ernani  
Co-orientadores: Prof. Luciano Colpo Gatiboni  
Prof. Paulo Cezar Cassol

**LAGES – SC**

**2013**

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária  
Renata Weingärtner Rosa – CRB 228/14<sup>a</sup> Região  
(Biblioteca Setorial do CAV/UDESC)

Oliveira, Jaqueline Pereira Machado de  
Composição química do solo nas adjacências dos grânulos de  
fertilizantes fosfatados minerais. / Jaqueline Pereira Machado de  
Oliveira; orientador: Paulo Roberto Ernani . – Lages, 2013.  
110f.

Inclui referências.  
Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Agroveterinárias / UDESC.

1. Fluxo difusivo. 2. Reações do fósforo. 3. Fontes de fosfatos.  
4. Localização do adubo. 5. Atividade de íons. I. Título.

CDD – 631.4

**JAQUELINE PEREIRA MACHADO DE OLIVEIRA**

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SOLO NAS ADJACÊNCIAS DOS  
GRÂNULOS DE FERTILIZANTES FOSFATADOS MINERAIS**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Manejo do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

**Banca Examinadora:**

Orientador:

---

PhD Paulo Roberto Ernani  
(UDESC/Lages – SC)

Co-orientador:

---

Dr. Luciano Colpo Gatiboni  
(UDESC/Lages – SC)

Co-orientador:

---

Dr. Paulo Cezar Cassol  
(UDESC/Lages – SC)

Membro:

---

Dr. Antônio Carlos Vargas Motta  
(UFPR/Curitiba – PR)

Membro:

---

Dr. Ronaldir Knoblauch  
(EPAGRI – SC)

Lages, Santa Catarina  
Março de 2013.

*"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu  
tamanho original."*

*Albert Einstein*

*Aos meus pais e melhores amigos Zulma e Islairo por serem o meu exemplo de vida, pelos quais tenho muito orgulho e amor.*

*Dedico.*

*Ao meu amado Luís Carlos por ser minha inspiração e meu porto seguro.*

*Ofereço*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela vida e por me iluminar para o caminho correto nos momentos mais difíceis e me ajudar em minhas conquistas colocando perto de mim pessoas abençoadas e com bom coração.

Ao meu grande amor e exemplo de dedicação, Luís Carlos, por todo carinho e amizade, além de ser meu porto seguro.

Aos meus pais, Zulma e Islairo, por toda a confiança e credibilidade que puseram em mim desde o início de minha vida, além do incentivo, dos conselhos, do amor e da amizade, das quais tenho muito orgulho e procuro sempre seguí-los como exemplo. Ao irmão e meu tesouro, Islairo Júnior, e minha cunhada, Fernanda, pela amizade e pelos bons momentos de diversão em sua compania.

Ao professor e orientador Paulo Roberto Ernani por tem me aceitado como orientada sem me conhecer e aceitar submeter um projeto ao CNPq, pela confiança depositada em mim, pela ajuda e por todos os ensinamentos neste período.

Aos professores e co-orientadores Luciano Colpo Gatiboni pela amizade e exemplo de profissional e excelente mestre. E Paulo Cesar Cassol pela amizade e todo o auxílio durante o curso.

Ao professor Júlio Cesar Pires Santos pela grande amizade e pelos bons conselhos sempre que precisei além de ter sido um ótimo “sogro”. E ao professor Osmar Klauberg pela amizade e pelo carinho.

Ao coordenador do curso de pós-graduação e grande amigo David Miquelluti pelos conselhos e ensinamentos, por sempre me ouvir e fazer sorrir nos momentos de angústia e tristeza, além de ser um excelente professor.

À dinda Maria Helena, a tia Irene e afilhada Letícia por estarem sempre presentes em minha vida e por torcerem por mim. Ao sogro Luiz Carlos e sogra Mariza, ao cunhado

Rodrigo e sua noiva e amiga Caroline e aos sobrinhos Thiago e Lucas pelos momentos agradáveis que me proporcionaram, sempre me recebendo com carinho e atenção.

Aos irmãos de coração e grandes amigos Clovisson e Vanessa, Luciana, Késia, Jovani, Joice e Jéssica pela amizade, aprendizado, ajuda e boa convivência, além de sempre ouvirem minhas lamentações, enxugarem minhas lágrimas. Ao irmão de orientação Ronaldir pela amizade e por ser um exemplo de persistência e dedicação, no qual tenho grande admiração.

Ao Henrique e Neto pela ajuda com as análises e pela amizade. Aos bolsistas de iniciação científica Gabriel, Angélica, Camila e Laura e voluntária Bruna e demais colegas do laboratório de Química e Fertilidade do solo do CAV, amigos, colegas e professores da pós-graduação e da graduação pelo apoio.

A UDESC – CAV e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo do Solo por permitir a realização do curso de doutorado. Ao CNPq pela bolsa de doutorado no Brasil e por permitir a realização de estágio na Universidade de Coimbra (Portugal) em 2010/2011.

## RESUMO

OLIVEIRA, Jaqueline Pereira Machado de. **Composição química do solo nas adjacências dos grânulos de fertilizantes fosfatados minerais.** 2013. 110 fls. Tese (Doutorado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, SC., 2013.

As alterações químicas no solo ao redor dos grânulos de fertilizantes afetam a disponibilidade de nutrientes às plantas e o conhecimento das mesmas pode indicar as práticas e as fontes mais eficientes de fertilização do solo. Neste contexto, este estudo foi dividido em três experimentos. O primeiro experimento teve por objetivo avaliar a composição química do solo ao redor de grânulos de fosfatos de amônio ou de cálcio, aplicados juntamente com cloreto de potássio (KCl), e a mobilidade dos nutrientes por eles adicionados. O objetivo do segundo experimento foi quantificar as concentrações dos nutrientes na fase sólida e na solução do solo nas adjacências dos locais de aplicação dos fertilizantes fosfatados e potássico minerais, assim como as atividades de P e K em solução. O terceiro objetivou avaliar a absorção de P e demais nutrientes pelas plântulas de milho em função da aplicação localizada de fosfatos de cálcio e de amônio. Utilizaram-se dois solos ácidos catarinenses. Os tratamentos variaram entre os experimentos: no primeiro compararam-se os efeitos do superfosfato triplo (SFT) e do diamônio fosfato (DAP) na presença de cloreto de potássio (KCl), e as doses de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  equivaleram a 100 mg  $kg^{-1}$  de solo. No segundo, também comparou-se o efeito do SFT e do DAP na presença ou não de KCl e de calcário, com doses de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  iguais a 700 e 1236 mg  $kg^{-1}$  para o NV e CH, respectivamente. E no terceiro cultivaram-se plantas de milho avaliando-se o efeito da adição localizada de SFT, DAP, superfosfato simples (SS) e monoamônio fosfato (MAP), nos quais aplicou-se 200 mg de P/vaso. As doses aplicadas foram altas com a finalidade de simular as concentrações nas adjacências dos grânulos. Nas adjacências dos grânulos dos fertilizantes fosfatados minerais, a composição química do solo é afetada pelas diferentes fontes fosfatadas, onde o SFT mostra-se mais eficaz que o DAP na liberação de P. A aplicação localizada dos fertilizantes fosfatada aumenta a movimentação dos nutrientes no solo, na qual a mobilização do fósforo ocorre até quatro centímetros. O método de extração Mehlich 1 superestima os valores de P quando aplica-se SFT ao solo. O DAP aumenta as concentrações de  $HPO_4^-$  na solução do solo. O MAP mostra ser uma fonte eficiente na liberação de P e na sua absorção pelas plantas.

**Palavras-chave:** Fluxo difusivo. reações do fósforo. fontes de fosfatos. localização do adubo. atividade de íons.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Jaqueline Pereira Machado de. **Chemical composition of the soil near the granules of minerals phosphate fertilizers.** 2013. 110 fls. Tese (Doutorado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, SC., 2013.

Chemical modifications in the soil near fertilizer granules affect plant nutrient availability and, thus, knowing them may help to select the Best management practices for soil fertilization. This study comprised three experiments with the aim of: a- to evaluate the soil chemical composition around granules of calcium or ammonium phosphates when applied together with KCl as well as nutrient mobility in the soil; b- to quantify nutrient concentration in both soil and solution phases and soil solution P and K activity in the adjacencies of phosphate and potassium fertilizers; c- to evaluate nutrient uptake from maize seedlings after localized addition of phosphate fertilizers in the soil. It was used two acid soils, and treatments varied according to each experiment: in the first two it was compared phosphate sources in presence of KCl and liming; in the third, it was quantified nutrient uptake by maize plants as affected by phosphates, in a greenhouse. Rates of  $P_2O_5$  e  $K_2O$  were 100 mg  $kg^{-1}$  in the first study; 700 and 1236 mg  $kg^{-1}$  for each soil, respectively, in the second experiment; and 200 mg/pot in the last study. The high doses were applied in order to simulate the concentrations in the near fertilizer granules. Near fertilizer granules of the mineral phosphate, the chemical composition of the soil is affected by different phosphorus sources, where the TSP proves more effective than DAP in the release of P. Localized application of phosphate fertilizers increases the movement of nutrients in the soil in which the phosphorus mobilization occurs up to four centimeters. The extraction method overestimates Mehlich 1 P values when applied to the soil TSP. DAP increases the concentration of  $HPO_4^{2-}$  in soil solution. The MAP is shown to be an efficient source of P in the release and uptake by plants.

**Keywords:** Diffusive flux. phosphorus reactions. phosphate sources. Fertilizer placement. activity ion.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Características químicas dos solos estudados. Média de três repetições.....	23
Tabela 2.2 -	Valores de pH e alumínio em dois solos ácidos em diferentes distâncias a partir do local de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos. Média de quatro repetições.....	26
Tabela 2.3 -	Teores de cátions básicos ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $\text{mg dm}^{-3}$ ) em dois solos ácidos em diferentes distâncias a partir do local de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos. Média de quatro repetições.....	30
Tabela 2.4 -	Concentração de fósforo disponível na camada de 0-1 cm, em dois solos ácidos catarinenses, obtidos por uma única extração com o método Mehlich 1, em função da adição de fertilizantes fosfatados juntamente com KCl e somente KCl. Média de quatro repetições.....	31
Tabela 2.5 -	Médias da concentração total de fósforo disponível nas camadas de 0-4 cm, em dois solos ácidos catarinenses, obtidos por extrações sucessivas pelos métodos Mehlich 1 e resina trocadora de ânions (RTA), em função da adição de fertilizantes fosfatados juntamente com KCl. Média de quatro repetições.....	35
Tabela 3.1 -	Características químicas dos solos estudados. Média de três repetições.....	40
Tabela 3.2 -	Valores de pH-H <sub>2</sub> O da fase sólida do solo 45 dias após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Médias de quatro repetições.....	44
Tabela 3.3 -	Análise de contrastes em valores de pH-H <sub>2</sub> O da fase sólida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.....	44
Tabela 3.4 -	Valores de pH-CaCl <sub>2</sub> da fase sólida do solo 45 dias após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Médias de quatro repetições.....	46

Tabela 3.5 -	Análise de contrastes em valores de pH-CaCl <sub>2</sub> da fase sólida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.....	47
Tabela 3.6 -	Valores de alumínio trocável da fase sólida do solo 45 dias após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Médias de quatro repetições.....	48
Tabela 3.7 -	Análise de contrastes em valores de alumínio trocável da fase sólida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.....	48
Tabela 3.8 -	Concentrações de cálcio e magnésio trocáveis da fase sólida do solo 45 dias após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Médias de quatro repetições.....	50
Tabela 3.9 -	Análise de contrastes em concentrações de cálcio e magnésio trocáveis da fase sólida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.....	51
Tabela 3.10 -	Concentração de potássio trocável da fase sólida do solo 45 dias após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Médias de quatro repetições.....	53
Tabela 3.11 -	Análise de contrastes em concentrações de potássio trocável da fase sólida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.....	54
Tabela 3.12 -	Concentrações de fósforo da fase sólida do solo 45 dias após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho (NV) e em um Cambissolo Húmico (CH), obtidas pelos métodos de extração Mehlich 1 e resina trocadora de ânions (RTA). Médias de quatro repetições.....	55

Tabela 3.13 -	Análise de contrastes em concentrações de fósforo extraídos por Mehlich 1 e resina trocadora de ânions (RTA) da fase sólida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.....	56
Tabela 3.14 -	Valores de pH da solução do solo em função dos adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho (NV) e em um Cambissolo Húmico (CH), Média de quatro repetições.....	59
Tabela 3.15 -	Análise de contrastes em valores de pH da fase líquida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.....	59
Tabela 3.16 -	Concentrações de fósforo na solução do solo ( $\text{mg L}^{-1}$ ), em função dos adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho (NV) e em um Cambissolo Húmico (CH). Média de quatro repetições.....	61
Tabela 3.17 -	Análise de contrastes em concentrações de fósforo da fase líquida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.....	62
Tabela 3.18 -	Concentrações de potássio na solução do solo ( $\text{mg L}^{-1}$ ), em função dos adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho (NV) e em um Cambissolo Húmico (CH). Média de quatro repetições.....	64
Tabela 3.19 -	Análise de contrastes em concentrações de potássio da fase líquida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.....	65
Tabela 3.20 -	Atividades de fósforo (nas formas de $\text{HPO}_4^{2-}$ e $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) e potássio (na forma de $\text{K}^+$ ) da fase líquida do solo após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico, obtidas pelos métodos de extração Mehlich 1. Médias de quatro repetições.....	66

Tabela 3.21 - Análise de contrastes em atividades de fósforo (nas formas de $HPO_4^{2-}$ e $H_2PO_4^-$ ) e potássio (na forma de $K^+$ ) da fase líquida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.....	67
Tabela 4.1 - Características químicas do solo estudado. Média de três repetições.....	74

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Representação das unidades experimentais (adaptado de NEVES et al., 2009).....	24
Figura 2.2 -	Concentrações de fósforo acumulado ( $P \text{ mg dm}^{-3}$ ), em cada camada, em um Nitossolo Vermelho, em função de extrações sucessivas e da adição de superfosfato triplo (SFT) ou diamônio fosfato (DAP), extraídos pelo método de Mehlich 1 e da resina trocadora de ânion, RTA. * Médias das fontes de fósforo, entre camadas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	33
Figura 2.3 -	Concentrações de fósforo acumulado ( $P \text{ mg dm}^{-3}$ ), em cada camada, em um Cambissolo Húmico, em função de extrações sucessivas e da adição de superfosfato triplo (SFT) ou diamônio fosfato (DAP), extraídos pelo método de Mehlich 1 e da resina trocadora de ânion, RTA. * Médias das fontes de fósforo, entre camadas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	34
Figura 3.1 -	Esquema do tubo de centrífuga para a extração da solução do solo, em que A é a tampa de rosca, B representa o corpo do filtro que se acopla em C, que é um tubo de 50 mL, e D é o elemento filtrante, à esquerda. Tubo de centrifuga empregado na obtenção da solução do solo, à direita (Fonte: PÉREZ, 2002).....	42
Figura 4.1 -	Quantidades de massa seca da parte aérea (MSPA) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP; e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	76
Figura 4.2 -	Quantidades de massa seca da raiz (MSR) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP; e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	77
Figura 4.3 -	Teores de fósforo na parte aérea (A) e na raiz (B) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP; e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	79

Figura 4.4 -	Teores de cálcio na parte aérea (A) e na raiz (B) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP; e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	80
Figura 4.5 -	Teores de magnésio na parte aérea (A) e na raiz (B) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP; e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	82
Figura 4.6 -	Teores de potássio na parte aérea (A) e na raiz (B) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP; e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	83
Figura 4.7 -	Concentrações de fósforo no solo (P no solo) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP; e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	84
Figura 4.8 -	Concentrações de cálcio no solo (Ca no solo) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP; e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	85
Figura 4.9 -	Concentrações de magnésio no solo (Mg no solo) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP; e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	86
Figura 4.10 -	Concentrações de potássio no solo (K no solo) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP; e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.....	87
Figura 4.11 -	Experimento com milho, plântulas com seis dias.....	87
Figura 4.12 -	Experimento com milho, plântulas com dezesseis dias.....	88
Figura 4.13 -	Experimento com milho, plântulas com seis (A) e oito (B) dias, em um Nitossolo Vermelho.....	88

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>18</b>
<b>2. CAPÍTULO I – O SUPERFOSFATO TRIPLO AUMENTA A DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES NAS ADJACÊNCIAS DE APLICAÇÃO DE SEUS GRÂNULOS EM RELAÇÃO AO DIAMÔNIO FOSFATO .....</b>	<b>21</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>21</b>
2.1. Introdução .....	22
2.2. Material e Métodos.....	23
2.3. Resultados e Discussão.....	26
2.4. Conclusões .....	37
<b>3. CAPÍTULO II – A APLICAÇÃO CONJUNTA DE SUPERFOSFATO TRIPLO E DIAMÔNIO FOSFATO COM CLORETO DE POTÁSSIO AUMENTA A CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO E DIMINUI A DE POTÁSSIO NA SOLUÇÃO DO SOLO</b>	<b>38</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>38</b>
3.1. Introdução .....	38
3.2. Material e Métodos.....	40
3.3. Resultados e Discussão.....	44
3.4. Conclusões .....	70
<b>4. CAPÍTULO III – A APLICAÇÃO LOCALIZADA DE MONOAMÔNIO FOSFATO FAVORECE A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO ASSIM COMO SUA EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO E DE RECUPERAÇÃO .....</b>	<b>71</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>71</b>
4.1 Introdução .....	71
4.2 Material e Métodos.....	74
4.3 Resultados e Discussão.....	76
4.4 Conclusões .....	90
<b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>90</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>91</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>98</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O fósforo constitui aproximadamente 0,12% da crosta terrestre, sendo as maiores reservas desse elemento encontradas em sedimentos marinhos, nos solos, em fosfato inorgânico dissolvido nos oceanos e rochas. O fósforo ocorrente no solo, de interesse agronômico ou ambiental, é constituído por compostos derivados do ácido ortofosfórico e, menos comumente, dos pirofosfatos. Os minerais primários fosfatados comuns em rochas são as apatitas, ao qual são liberados durante a intemperização, resultando em minerais secundários mais estáveis termodinamicamente, ou incorporados a compostos orgânicos biologicamente.

A interação deste nutriente com os constituintes do solo, como alumínio, ferro e cálcio, a sua ocorrência em formas orgânicas, além de sua lenta taxa de difusão na solução do solo o tornam menos disponível na rizosfera e com isto, mais dependente de mobilidade no solo. Assim, a maior parte do P adicionado ao solo é adsorvida aos coloides, tornando-se pouco disponível com o tempo, devido à formação de compostos de baixa solubilidade (NOVAIS; SMYTH, 1999).

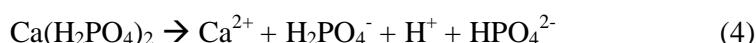
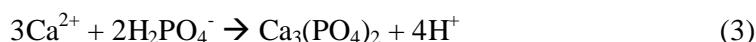
A concentração de fósforo total nos solos está entre 0,2 e 5,0 g kg<sup>-1</sup>, no entanto, na solução do solo estas concentrações são usualmente muito menores, variando de 0,1 a 10 µmol L<sup>-1</sup>. Como o coeficiente de difusão de P no solo é muito baixo (entre 10 e 15 cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>), a rápida absorção vegetal cria uma zona de depleção deste nutriente em volta da raiz, e os íons se difundem segundo um gradiente de potencial químico até a superfície radicular (RAUSCH; BUCHER, 2002). Após poucos dias de absorção, a concentração de P na rizosfera pode reduzir de 30 a 50 % e a zona de depleção estender-se até cerca de 2 mm da superfície radicular (JUNGK, 1987).

Dentre os mecanismos de transporte de nutrientes no solo, a difusão é o predominante para o fósforo (BARBER, 1962), este mecanismo é influenciado por alguns fatores como a interação fósforo-colóide no solo, o teor do elemento, o conteúdo volumétrico de água no solo (KELLY et al., 1997), o tamanho e a distribuição de poros (DIEROLF et al., 1997), a concentração iônica da solução do solo (OLIVEIRA et al., 2004), o pH (ERNANI et al., 2002), o poder tampão de P e a distância a ser percorrida até as raízes. No entanto, a baixa

movimentação de fósforo no solo é consequência, principalmente, de sua forte interação com os colóides do solo, ocasionando baixas concentrações de P na solução do solo, especialmente em solos tropicais altamente intemperizados (COSTA, 1998).

Quando aplica-se um fertilizante fosfatado ao solo, após sua solubilização ocorrem grandes alterações na composição química das microrregiões próximas aos seus grânulos, uma vez que, estes entram em contato com pequeno volume de solo. Em seguida, os íons migram dessas microrregiões para suas adjacências, onde a magnitude das reações de troca de cátions, de adsorção química de cátions e de ânions e de precipitação são muito mais intensas comparadas as demais regiões, principalmente em decorrência da saturação dos sítios de adsorção, da alta atividade iônica, da grande concentração eletrolítica e de alterações no pH (ERNANI, 2008). Além disto, a composição química dessas microrregiões deve ter grande influência na disponibilidade de nutrientes às plantas, mas ela é muito pouco conhecida e é, normalmente, ignorada.

Entretanto, todas estas reações podem variar com o tipo de fertilizante aplicado. Dentro os fertilizantes fosfatados minerais, os solúveis e os naturais são os principais grupos. Os fosfatos solúveis, por sua vez, incluem os fosfatos de cálcio (superfosfato triplo e superfosfato simples) e os fosfatos de amônio (mono e diamônio fosfatos). Após serem solubilizados no solo, as reações que se sucedem, incluindo adsorção específica, precipitação (equações 1, 2 e 3) e alterações no pH, variam significativamente entre eles. Enquanto os fosfatos de cálcio e o monoamônio fosfato podem diminuir drasticamente o pH, o diamônio fosfato pode elevar o pH nas adjacências dos grânulos (equações 4, 5 e 6) (ERNANI et al., 2002; ERNANI, 2008). Esta diferença de pH ocasionada pelos fosfatos afeta a atividade do Al, e consequentemente sua toxicidade, assim como a densidade de cargas elétricas.



A disponibilidade dos nutrientes às plantas pode ser afetada por estas alterações químicas, tendo em vista que o diamônio fosfato (DAP), por elevar o pH ao redor de seus grânulos nos períodos iniciais subsequentes à aplicação ao solo irá eliminar o Al trocável nas

adjacências dos grânulos e proporcionará menor precipitação de P relativamente ao superfosfato triplo (SFT), que poderá aumentar a atividade do Al, em decorrência da diminuição do pH promovida pela sua dissolução e do suprimento de Ca. Esse último efeito, entretanto, poderá não ocorrer em função da possível precipitação do Al pelo P adicionado. Independente da magnitude desta reação, o DAP proporcionará maior aumento na concentração do P na solução do que o SFT.

Pode-se observar então, que o conhecimento da composição química destas regiões pode proporcionar a adoção de práticas mais eficientes de fertilização do solo, assim como indicar para um dado nutriente a fonte de fertilizante mais apropriada. Neste sentido foram realizados três estudos com o objetivo de avaliar a composição química ao redor dos grânulos de fertilizantes fosfatados, aplicados a dois solos ácidos, representativos do Estado de Santa Catarina. A partir desse conhecimento, pretende-se melhorar as técnicas de fertilização do solo, tanto em termos quantitativos como na escolha das fontes minerais mais eficientes.

A apresentação do presente trabalho esta dividido em três capítulos:

- 1º) Capítulo I - O superfosfato triplo aumenta a disponibilidade de nutrientes nas adjacências de aplicação de seus grânulos em relação ao diamônio fosfato.
- 2º) Capítulo II - A aplicação conjunta de superfosfato triplo e diamônio fosfato com cloreto de potássio aumenta a concentração de fósforo e diminui a de potássio na solução do solo.
- 3º) Capítulo III - A aplicação localizada de monoamônio fosfato favorece a disponibilidade de fósforo assim como sua eficiência de absorção e de recuperação.

## **2. CAPÍTULO I – O SUPERFOSFATO TRIPLO AUMENTA A DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES NAS ADJACÊNCIAS DE APLICAÇÃO DE SEUS GRÂNULOS EM RELAÇÃO AO DIAMÔNIO FOSFATO**

### **Resumo**

O fósforo tem baixa mobilidade no solo e, em consequência disso, sua concentração nas regiões adjacentes aos grânulos dos fertilizantes fosfatados no solo é alta, o que favorece a ocorrência de precipitação assim como diminui as reações de adsorção por aumentar a saturação dos sítios de ligação nesses locais. O objetivo deste estudo foi avaliar a composição química do solo ao redor de grânulos de fosfatos de amônio ou de cálcio, aplicados juntamente com cloreto de potássio (KCl), e a mobilidade dos nutrientes por eles adicionados. O trabalho foi realizado em 2009, com amostras de um Cambissolo Húmico (CH) e de um Nitossolo Vermelho (NV) catarinenses. Os tratamentos consistiram de combinações de superfosfato triplo (SFT) ou de fosfato diamônico (DAP) com KCl, além de uma testemunha somente com KCl. As unidades experimentais foram constituídas por colunas de PVC com 10,0 cm de diâmetro e 12,0 cm de comprimento, preenchidas com 1,60 kg de solo (base seca). Elas foram montadas pela justaposição de anéis concêntricos com diferentes espessuras verticais. Em cada uma delas foram aplicadas, respectivamente, 10,47; 9,56 e 7,33 g de SFT, DAP e KCl. Considerando que cada fertilizante seja aplicado sobre a superfície do solo, totalizando um volume de contato de 78,5 cm<sup>3</sup>. Essas doses equivalem 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e de K<sub>2</sub>O. Os grânulos dos fertilizantes, todos com diâmetro entre 0,5 e 2,0 mm foram distribuídos uniformemente entre duas folhas de papel-filtro, alocadas na superfície de junção do primeiro com o segundo anel da extremidade superior da coluna. Quarenta e cinco dias após a aplicação dos fertilizantes ao solo, as colunas foram desmontadas e o solo de cada anel foi separado dos demais, constituindo, assim, amostras individuais. No NV, a concentração de P acumulado, na primeira camada, extraída pelo Mehlich 1 diferiram 68 e 70%, entre o primeiro e o nono dia de extração, no SFT e DAP, respectivamente e, no CH, 58 e 60%, para o SFT e DAP, respectivamente. Para o método RTA, as diferenças foram no NV, de 71 e 66% e, no CH, 51 e 48%, para SFT e DAP, respectivamente. A movimentação do P nos dois solos ocorreu até o quarto centímetro distante dos grânulos. Os fertilizantes fosfatados, com destaque para o SFT, aumentaram os valores de pH e de Ca nas adjacências dos grânulos, porém somente o SFT aumentou o Mg. O Mehlich 1 extraiu maiores teores de P do que a RTA, e também quantificou mais P quando recebeu SFT do que DAP. Uma única extração de P das regiões adjacentes aos granulos dos fertilizantes nos solos não foi suficiente para quantificar o P-disponível por nenhum dos métodos.

**Palavras-chave:** Fluxo difusivo. cátions trocáveis. reações do fósforo. Mehlich 1. resina trocadora de ânions.

## 2.1. Introdução

O fósforo do solo disponível às plantas a curto e médio prazo é formado pelo P orgânico, pelo P adsorvido aos coloides minerais e pelo P precipitado com alumínio, ferro e cálcio. Para se tornar disponível às plantas, o P orgânico tem que ser mineralizado pelos microrganismos, o P-adsorvido tem que ser liberado dos sítios de adsorção e os precipitados de P precisam dissolver. Após estar na solução do solo, o P necessita migrar até as raízes para só então ser absorvido. A restrição em qualquer dessas duas etapas (ida para a solução do solo e movimentação até as raízes) limita a absorção do nutriente pelas plantas.

A movimentação de fósforo no solo é realizada predominantemente pelo mecanismo de difusão (BARBER, 1962), o qual depende do teor de água (KELLY et al., 1997), do tamanho e distribuição de poros (DIEROLF et al., 1997), da concentração iônica da solução do solo (OLIVEIRA et al., 2004), do pH (ERNANI et al., 2002), do poder tampão de P e principalmente da concentração de P na solução do solo (ERNANI et al., 2004; NEVES et al., 2009). Esta, por sua vez, nas regiões adjacentes aos grânulos, depende das reações que ocorrem nesses microssítios. Como o P se movimenta poucos milímetros no solo durante o ano, tanto a concentração quanto sua reposição na solução nas proximidades dos adubos fosfatados desempenha papel fundamental na disponibilidade de P às plantas.

Após a dissolução de qualquer fertilizante fosfatado no solo ocorrem inúmeras reações nas adjacências dos grânulos, sendo algumas estreitamente relacionadas com o P, principalmente precipitação e adsorção específica, e outras relacionadas com atributos do solo, principalmente alterações no pH, na densidade de cargas elétricas e na condutividade elétrica, que variam com o tipo de fosfato adicionado. Enquanto os fosfatos de cálcio e o monoamônio fosfato diminuem o pH nas adjacências dos grânulos (ERNANI et al., 2002; MANTOVANI et al., 2007), o diamônio fosfato proporciona efeito oposto (ERNANI, 2008). A modificação no pH dessas microrregiões pode afetar a atividade do Al em solos muito ácidos, e consequentemente sua fitotoxicidade. Alterações no pH do solo também irão influenciar a formação e a dissolução dos precipitados de fósforo: em pH baixo, predomina a formação de fosfatos de ferro e alumínio, enquanto em pH mais elevados, predominam os fosfatos de cálcio. Nas regiões adjacentes aos grânulos dos adubos fosfatados, entretanto, a magnitude dessas reações não tem sido quantificada.

Considerando as diferentes formas que o P se encontra no solo, os métodos analíticos que quantificam o P-disponível às plantas estão divididos em grupos: no Brasil, utilizam-se extratores que agem por dissolução ácida e por troca iônica. O método de Mehlich 1 extraí-

parte do P dos colóides inorgânicos por dissolução ácida, e quantifica, em ordem crescente de efetividade, as formas ligadas a Ca, Al e Fe. Suas principais vantagens são a facilidade de execução e o baixo custo analítico. No entanto, tem-se observado que esse método apresenta problemas na estimativa dos teores de P no solo, como a exaustão da capacidade de extração com o aumento do teor de argila e do grau de intemperização do solo, além de superestimar a disponibilidade de P em solos previamente adubados com fosfatos naturais (GATIBONI et al., 2003).

O método que utiliza a resina trocadora de ânions (RTA) extrai o P do solo por troca iônica, onde o P migra dos sítios de adsorção dos colóides para as cargas positivas existentes na resina. Esse método não apresenta extração preferencial de P com relação aos tipos de colóides do solo, porém há controvérsias com relação à sua capacidade de estimar o fator quantidade de P. Silva; Raij (1999) consideram a RTA melhor que os outros extractores de P, em virtude de o processo de extração assemelhar-se à ação das raízes das plantas e, da inexistência de perda de força de extração em solos com alto teor de argila e de superestimação do P disponível em solos que receberam adubação com fosfatos naturais. Rheinheimer et al. (2003), entretanto, verificaram que esse método é sensível à textura do solo, pois extraiu mais P do que o Mehlich 1 em solos com altos teores de argila e menos naqueles de texturas leves.

O presente estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar a composição química do solo ao redor de grânulos de fertilizantes fosfatados por dois métodos extractores, assim como a mobilidade de nutrientes, a partir da adição de fosfatos de amônio ou de cálcio, juntos com cloreto de potássio.

## 2.2. Material e Métodos

O experimento foi realizado em laboratório, na faculdade de Agronomia da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, SC, em 2009. Utilizaram-se amostras de um Cambissolo Húmico (CH) e de um Nitossolo Vermelho (NV), coletadas na camada de 0-20 cm de áreas nativas nunca anteriormente cultivadas ou fertilizadas. Posteriormente à coleta, os solos foram passados em peneira com abertura de 0,4 cm. A classificação e algumas características químicas dos mesmos são apresentadas na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** - Características químicas de um Cambissolo Húmico e um Nitossolo Vermelho do estado de Santa Catarina utilizados no estudo<sup>(1)</sup>. Média de três repetições.

Características	Cambissolo Húmico	Nitossolo Vermelho
pH em água	4,5	4,6
Matéria orgânica (%)	5,0	2,3
Argila (%)	40,0	79,0
P (mg dm <sup>-3</sup> )	7,3	7,1
K (mg dm <sup>-3</sup> )	182,0	158,0
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,4	2,5
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,8	0,6
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,5	0,04
CTC efetiva (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,2	3,5
CTC pH 7,0 (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	30,1	20,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,0	18,0
CMAP (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>(2)</sup>	831,0	2195,0
CMEP (RTA) (mg dm <sup>-3</sup> )	800,0	800,0

Fonte: O Autor, 2013.

<sup>(1)</sup>Avaliações analíticas foram realizadas com metodologias descritas por Tedesco et al. (1995).

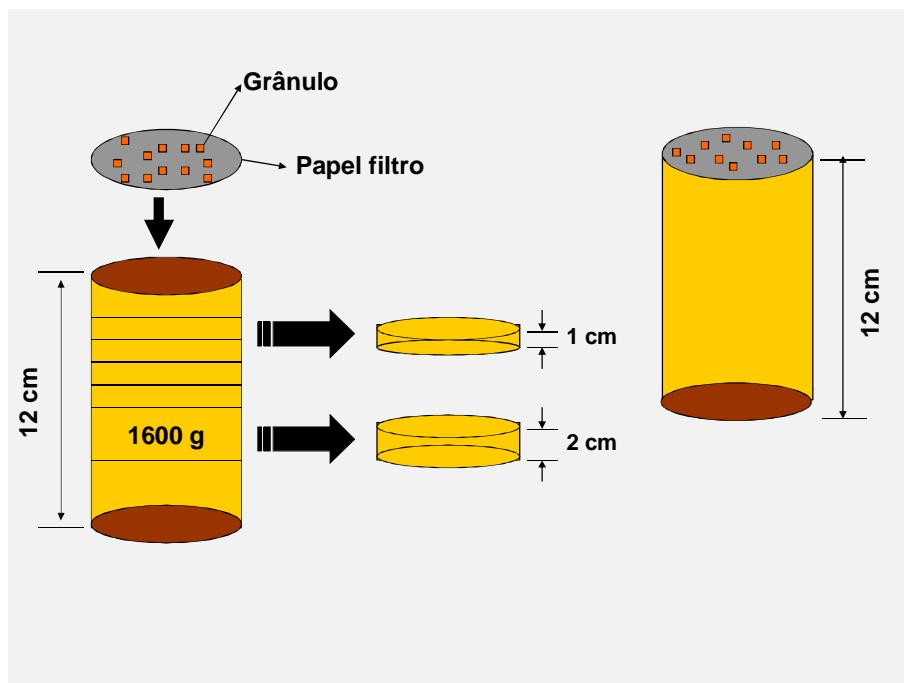
<sup>(2)</sup>CMAP = capacidade de adsorção máxima de fósforo; CMEP=capacidade de extração máxima de fósforo pela resina trocadora de ânions.

Os tratamentos consistiram de combinações de superfosfato triplo (SFT) ou de diamônio fosfato (DAP) com cloreto de potássio (KCl), além de uma testemunha com apenas KCl. As quantidades de SFT, DAP e KCl aplicadas foram respectivamente de 10,47; 9,56 e 7,33 gramas por unidade experimental. Considerando uma situação em que cada fertilizante fosse aplicado sobre a superfície do solo, em linhas, totalizando um volume de contato de 78,5 m<sup>3</sup> de solo, essas quantidades equivaleram a 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e de K<sub>2</sub>O. Não foi aplicado corretivo de acidez do solo em nenhum tratamento.

As unidades experimentais foram constituídas por colunas de PVC, com 10,0 cm de diâmetro e 12,0 cm de comprimento, preenchidas com solo (Figura 2.1). Cada coluna foi constituída pela justaposição de anéis concêntricos, sendo um com 2,0 cm de altura, localizado na extremidade superior, seguido de cinco outros com 1,0 cm de altura cada e de um último com 5,0 cm de altura, localizado na extremidade inferior. Os grânulos de cada fertilizante (SFT, DAP e KCl) tinham diâmetro entre 0,5 e 2,0 mm, e foram distribuídos uniformemente entre duas folhas de papel-filtro (whatman 42), na superfície de junção do

primeiro com o segundo anel, a partir da extremidade superior, a fim de facilitar a avaliação da mobilidade dos nutrientes.

**Figura 2.1.** Representação das unidades experimentais.



Fonte: adaptado de NEVES et al., 2009.

Os solos de cada unidade experimental foram umedecidos até a capacidade de campo antes de serem colocados nas colunas. A movimentação de P nos solos foi avaliada por um período de 45 dias. Durante todo esse período, eles foram mantidos com o mesmo teor de umidade, pois as colunas foram colocadas dentro de sacos plásticos, os quais foram abertos semanalmente para oxigenação e pesagens. Ao final do período experimental, cada coluna foi separada transversalmente, na intersecção dos anéis, e o volume de cada anel passou a constituir uma amostra de solo da respectiva distância a partir do local de aplicação dos fertilizantes. A movimentação de P foi avaliada, portanto, verticalmente, em cada um dos segmentos da unidade experimental.

Em cada uma das distâncias compreendidas pelos anéis (até a camada 5-7 cm), foi quantificado o P-disponível, extraído por solução ácida diluída (Mehlich 1) e por resina trocadora de ânions (RTA), cuja determinação foi feita pelo método de Murphy; Riley (1962). Após observar que o fósforo movimentou-se até o quarto centímetro distante do local de aplicação realizaram-se nove extrações sucessivas com cada método até esta distância (amostras das camadas 0-1, 1-2, 2-3 e 3-4 cm). Avaliaram-se ainda os valores de pH-H<sub>2</sub>O, e

de Al, K, Ca e Mg trocáveis, de acordo com metodologia proposta por Tedesco et al. (1995). A determinação de Al foi realizada por titulação com hidróxido de sódio e a de Ca e Mg foram realizadas pelo espectrofotômetro de absorção atômica e o K por fotômetro de chama.

Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os resultados obtidos de pH, Al, K, Ca e Mg foram avaliados estatisticamente por meio de análise da variância ( $P < 0,05$ ). Quando houve significância estatística, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%. As curvas de dessorção acumulada de P foram ajustadas pela equação  $x = \beta - (\beta - \alpha)e^{-kt}$ , proposta por MCKEAN; WARREN (1996), sendo o  $x$  o teor dessorvido;  $\beta$  a dessorção máxima;  $\alpha$  a dessorção na primeira extração;  $K$  é a taxa de dessorção constante e  $T$ , o tempo de extração. Os valores de P acumulado nas camadas foram submetidos à análise de variância e ao teste de comparação de médias Tukey ( $p < 0,05$ ).

### 2.3. Resultados e Discussão

#### Efeito no pH

O KCl diminui o pH do solo obtido em água nas proximidades das regiões fertilizadas. Apesar de não haver nenhum tratamento sem fertilizantes, naquele que recebeu apenas KCl, aqui considerado como testemunha, o pH diminui uniformemente em toda a distância avaliada, até 7 cm de distância da localização dos grânulos, nos dois solos (Tabelas 2.1 e 2.2). No CH, o valor original de pH era de 4,5 e diminuiu para 3,6, enquanto que no NV ele diminuiu de 4,6 para 3,9. Esta diminuição de pH está principalmente relacionada com o aumento da densidade de cargas elétricas que ocorre nas superfícies sólidas de solos com predomínio de carga líquida negativa, em decorrência do aumento da concentração eletrolítica promovida pelo KCl (NEVES, et al., 2009). A hidrólise do Al, deslocado das cargas negativas pelo K aplicado, também contribui para a diminuição do pH (ERNANI et al., 2004). O teor de K nas amostras de solo previamente à aplicação dos tratamentos era de 189 e 158 mg dm<sup>-3</sup> no CH e no NV, o qual aumentou respectivamente para até 3475 e 3920 mg dm<sup>-3</sup> na camada mais distante (5 – 7 cm) do local de aplicação do KCl (Tabelas 2.1 e 2.3). Neves et al. (2009) simularam a aplicação localizada de KCl em 5 solos com diferentes tamponamentos e verificaram que o K migrou para distâncias maiores do que 4,0 cm dos locais de aplicação em apenas 7 dias.

Os fertilizantes fosfatados aumentaram o pH do solo, principalmente nas proximidades das regiões fertilizadas (Tabela 2.2). O superfosfato triplo (SFT) e o diamônio fosfato (DAP) aumentaram o pH até a camada de 3-4 cm distante dos grânulos, nos dois solos (Tabela 2.2).

Em relação ao tratamento com KCl, o pH do Cambissolo aumentou de 3,6, para até 4,4 onde foi aplicado SFT+KCl e para até 7,1 no tratamento que recebeu DAP+KCl. No Nitossolo, o pH aumentou de 3,9, para até 5,1 onde foi aplicado SFT+KCl e para até 7,2 no tratamento que recebeu DAP+KCl. Diferentemente do que ocorreu no tratamento só com KCl, o pH dos solos não foi influenciado pela adição dos adubos fosfatados nas camadas de solo com distância superior a 3 cm dos grânulos (Tabela 2.2), evidenciando que os produtos resultantes da dissolução dos fosfatos tiveram baixa mobilidade.

**Tabela 2.2** - Valores de pH e alumínio em um Cambissolo Húmico e um Nitossolo Vermelho em diferentes distâncias a partir do local de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássico. Média de quatro repetições.

Tratamento	Camada distante do fertilizante (cm)						CV
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-7	
pH – Cambissolo							
SFT + KCl	4,4 Bb	5,1 Ba	4,4 Bb	3,8 c	3,6 Ac	3,7 Ac	3,8
DAP + KCl	7,1 Aa	6,9 Aa	5,8 Ab	3,8 c	3,7 Ac	3,6 ABc	3,5
KCl	3,6 C	3,6 C	3,6 C	3,6	3,5 B	3,5 B	1,8
CV	4,1	2,5	4,1	2,4	2,0	2,9	
pH – Nitossolo							
SFT + KCl	5,1 Bb	5,6 Ba	5,0 Ab	4,0 Bc	3,9 ABc	3,9 c	4,7
DAP + KCl	7,2 Aa	7,0 Aab	6,0 Ab	4,8 Ac	4,0 Ac	3,9 c	8,4
KCl	3,9 C	3,9 C	3,8 B	3,8 B	3,8 B	3,9	2,1
CV	1,9	4,6	14,3	11,1	3,4	2,8	
Al ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) – Cambissolo							
SFT + KCl	2,9 Bbc	0,8 Bd	0,58 Bd	2,4 Bc	3,8 Bab	4,8 a	18,4
DAP + KCl	ND	ND	ND	3,0 Bbc	3,8 Bb	5,2 a	17,7
KCl	4,4 Ab	4,6 Aab	4,7 Aab	5,4 Aa	5,4 Aa	5,4 a	8,2
CV	14,0	25,1	23,4	16,4	16,2	11,0	
Al ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) – Nitossolo							
SFT + KCl	1,0 Ba	0,4 Bc	0,2 Bc	0,6 Bbc	0,8 Bab	1,0 a	30,6
DAP + KCl	ND	ND	ND	1,0 A	1,2 A	1,2	31,3
KCl	1,1 AB	1,0 AB	1,2 A	1,0 A	1,0 AB	1,4	34,4
CV	39,7	49,1	37,7	25,0	14,4	22,9	

Fonte: O Autor, 2003.

\*SFT = superfosfato triplo; DAP = diamônio fosfato; KCl = cloreto de potássio; CV = coeficiente de variação: ND = não detectável.\*Médias seguidas de letras maiúsculas distintas nas colunas e minúsculas nas linhas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%. Ausência de letra representa a inexistência de diferença estatística.

A elevação do pH do solo ocasionada pelo DAP ocorre devido ao consumo de hidrogênios ( $\text{H}^+$ ) decorrente da transformação de parte das moléculas de  $\text{HPO}_4^{2-}$  existentes

neste adubo em moléculas de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  (ERNANI et al., 2002; ERNANI, 2008). Esta reação acontece devido ao equilíbrio químico existente entre essas duas formas fosfáticas ( $\text{H}_2\text{PO}_4^- = \text{HPO}_4^{2-} + \text{H}$ ), cuja constante de dissociação ácida é  $6,2 \times 10^{-8}$ , o que resulta num  $pK_a$  (potencial da constante de dissociação) de 7,21. Sendo assim, quando o pH do solo for 7,21 o meio terá 50 % de cada forma; abaixo e acima dele, haverá predomínio de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , respectivamente (ERNANI, 2008). A aplicação de SFT, por outro lado, normalmente diminui o pH do solo ao redor dos grânulos desse adubo (ERNANI et al., 2002; MANTOVANI et al., 2007) devido à liberação de íons  $\text{H}^+$  por ocasião da dissolução de suas moléculas [ $(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 = \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{HPO}_4^{2-} + \text{H}^+$ ]. A elevação do pH do solo no presente estudo (Tabela 2.2) provavelmente ocorreu porque as reações de adsorção específica das moléculas de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$  liberaram maior quantidade de hidroxilos do que o número de átomos de hidrogênios liberados pela dissociação do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , uma vez que apenas parte dessas moléculas se transforma em  $\text{HPO}_4^{2-}$ .

O efeito dos fosfatos no comportamento do pH com a variação da distância a partir da região fertilizada diferiu entre eles. O DAP aumentou o pH do solo com o aumento proximidade dos grânulos, porém onde foi aplicado SFT o pH na camada junto aos grânulos (0 – 1,0 cm) foi menor do que na camada imediatamente seguinte (1,0-2,0 cm).

#### Efeito no Al trocável

O efeito da adição de altas doses de KCl nos teores de alumínio trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) variou entre os solos (Tabela 2.2). No NV, o  $\text{Al}^{3+}$  não foi afetado pela adição de KCl em nenhuma das distâncias a partir do local de aplicação. No CH, no entanto, a concentração de  $\text{Al}^{3+}$  diminuiu com a aproximação do local de aplicação dos grânulos, o qual variou de  $5,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , na camada de 3-4 cm distante da região fertilizada, para  $4,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na camada junto ao fertilizante (0-1 cm). Como o pH dos solos permaneceu constante ao longo de toda a coluna fertilizada somente com KCl (Tabela 2.2), essa diminuição no Al pode estar relacionada com a formação de compostos insolúveis com o fosfato do solo (Traina et al., 1986).

Os dois fertilizantes fosfatados influenciaram os teores de  $\text{Al}^{3+}$  nas adjacências dos grânulos e o efeito foi maior no CH do que NV (Tabela 2.2). Para o SFT, a maior diminuição no Al trocável ocorreu nas camadas intermediárias, distantes de 2 a 4 cm dos grânulos. No CH, o  $\text{Al}^{3+}$  diminuiu de 4,8 para até  $0,58 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na camada de 2,0-3,0 cm distante do local de aplicação do SFT. No NV, o Al trocável diminuiu de 1,0 para  $0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para

este fosfato, na mesma camada de solo. Para o DAP, nas camadas 0-3 cm não foram detectadas presença de Al.

#### Efeito no Ca

A adição de altas doses do fertilizante potássico (KCl) não alterou os teores de cálcio solúvel ( $\text{Ca}^{2+}$ ) em nenhum dos dois solos (Tabela 2.3), cujas médias ao longo de todas as distâncias a partir do local de aplicação foram 0,4 e 0,5  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente no CH e no NV.

O SFT, por apresentar Ca em sua composição, aumentou as concentrações de Ca em todas as distâncias avaliadas, nos dois solos, cujos valores foram decrescendo com o aumento da distância a partir do local de aplicação do adubo (Tabela 2.3). No CH, o  $\text{Ca}^{2+}$  na camada mais próxima do fertilizante (0 – 1,0 cm) atingiu 13,9  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , tendo diminuído para 2,6  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na camada mais distante (5,0 -7,0 cm); no NV o  $\text{Ca}^{2+}$  nessas mesmas camadas foi 6,0 e 3,5  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente. Como a quantidade de Ca adicionada pelo SFT foi a mesma nos dois solos, o maior teor de  $\text{Ca}^{2+}$  nas camadas mais próximas do fertilizante no CH relativamente ao NV, se deve além do poder tamponante do CH, provavelmente a maior formação de precipitados de  $\text{Ca}^{2+}$  no NV (AKINREMI; CHO, 1991).

O tratamento com DAP + KCl não diferiu do tratamento que recebeu somente KCl em nenhuma distância avaliada, nos dois solos (Tabela 2.3). Nos dois solos, o efeito do DAP no  $\text{Ca}^{2+}$  foi muito semelhante, o qual variou de 0,8  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na camada junto aos grânulos (0 – 1,0 cm) para 1,3 a 1,4  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na mais distante (5,0 – 7,0 cm).

O  $\text{Ca}^{2+}$  teve boa mobilidade nos solos. Os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  na camada mais distante do local de aplicação dos fertilizantes (5,0 -7,0 cm) nos tratamentos que receberam principalmente SFT foram maiores do que nos demais (Tabela 2.3), mostrando que o Ca se movimentou até mais do que 7,0 cm. A aplicação de alta dose de KCl em conjunto com o SFT pode ter favorecido o aumento da mobilidade de Ca nos solos. Ernani et al., 2007 verificaram que a adição de KCl proporcionou grande aumento na concentração de Ca e Mg nas primeiras soluções percoladas, podendo representar aumento temporário na disponibilidade desses dois cátions às plantas.

**Tabela 2.3** - Teores de cátions básicos Ca e Mg ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e K ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) em dois solos ácidos em diferentes distâncias a partir do local de aplicação de fertilizantes fosfatados e potássicos. Média de quatro repetições.

Tratamento	Camada distante do fertilizante (cm)						CV
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-7	
Ca - Cambissolo							
SFT + KCl	13,9 Aa	11,5 Ab	8,2 Ac	5,6 Ad	3,6 Ae	2,6 Ae	9,2
DAP + KCl	0,8 Bb	1,0 Bab	1,2 Bab	1,2 Bab	1,4 Ba	1,4 Ba	23,6
KCl	0,3 Bc	0,3 Bc	0,4 Bbc	0,5 Ba	0,5 Ba	0,6 Ba	14,2
CV	13,2	18,9	16,3	20,4	21,9	23,6	
Ca - Nitossolo							
SFT + KCl	6,0 Aa	5,9 Aab	4,6 Aabc	4,5 Aabc	4,4 Abc	3,5 Ac	13,8
DAP + KCl	0,8 B	0,9 B	1,0 B	1,2 B	1,3 B	1,3 B	34,7
KCl	0,6 Ba	0,6 Ba	0,4 Bb	0,4 Bb	0,4 Bb	0,5 Bab	20,2
CV	13,9	16,2	35,3	29,9	32,3	19,5	
Mg - Cambissolo							
SFT + KCl	1,6 A	1,5 A	1,6 A	1,4 A	1,4 A	1,4 B	9,8
DAP + KCl	0,1 Be	0,3 Bde	0,6 Bab	0,5 Bbc	0,8 Ba	0,4 Bcd	20,6
KCl	0,3 B	0,3 B	0,3 B	0,4 B	0,4 C	0,3 B	21,0
CV	8,1	6,5	12,0	9,5	22,1	13,9	
Mg - Nitossolo							
SFT + KCl	1,5 Aa	1,4 Aa	1,3 Ab	1,1 Ac	1,1 Ac	0,9 Ad	4,6
DAP + KCl	0,2 Cc	0,3 Bbc	0,3 Bbc	0,4 Bab	0,4 Bab	0,5 Ba	21,7
KCl	0,4 B	0,4 B	0,4 B	0,3 C	0,4 B	0,3 C	20,4
CV	11,4	10,1	15,0	6,8	4,5	20,6	
K - Cambissolo							
SFT + KCl	10850 a	8725 b	6700 ABC	5275 Ac	3775 Bd	2085 Be	10,4
DAP + KCl	11125 a	9750 b	6400 Bc	3875 Bd	2675 Ce	1565 Ce	9,9
KCl	9754 a	8800 ab	7575 Ab	6300 Ac	5500 Ac	3475 Ad	6,8
CV	6,9	9,4	8,3	13,2	9,0	11,9	
K - Nitossolo							
SFT + KCl	10175 a	8125 b	6450 Bc	5500 ABC	4425 Bd	2218 Be	6,9
DAP + KCl	11175 a	8850 ab	6600 Bbc	4500 Bcd	2925 Cde	1702 Be	17,6
KCl	10125 a	8675 b	7300 Ac	6550 Acd	5775 Ad	3920 Ae	8,3
CV	6,9	12,0	16,1	14,1	12,9	26,6	

Fonte: O Autor, 2003.

\*SFT = superfosfato triplo; DAP = diamônio fosfato; KCl = cloreto de potássio; CV = coeficiente de variação.\*Médias seguidas de letras maiúsculas distintas nas colunas e minúsculas nas linhas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%. Ausência de letra representa a inexistência de diferença estatística.

### Efeito do Mg

A adição de altas doses do fertilizante potássico (KCl) não alterou a concentração do magnésio trocável ( $Mg^{2+}$ ) em nenhuma distância a partir do local de aplicação do adubo, independente do solo (Tabela 2.3). Os valores de  $Mg^{2+}$ , na média de todas as distâncias, foram 0,3 e 0,4  $cmol_c\ dm^{-3}$ , respectivamente no CH e no NV.

O efeito dos fertilizantes fosfatados nos teores de  $Mg^{2+}$  variou com o solo e com a fonte de P (Tabela 2.3). O SFT aumentou o  $Mg^{2+}$  em quase todas as distâncias, nos dois solos, tendo passado de aproximadamente 0,4 para 1,5  $cmol_c\ dm^{-3}$  e isto provavelmente ocorreu devido a solubilização deste nutriente por parte do solo. O tratamento com DAP + KCl, por outro lado, não influenciou o Mg do solo em relação ao tratamento só com KCl, porém na camada mais próximas dos grânulos ele diminuiu o  $Mg^{2+}$ , nos dois solos (Tabela 2.3), provavelmente devido à formação de precipitados com fósforo. A presença de altas concentrações de Ca e Mg, associada ao pH superior a 7,0 que geralmente ocorre quando se adiciona DAP ao solo, favorece a formação de precipitados de fosfatos de cálcio e de magnésio.

### Efeito no K

O K teve uma boa mobilidade, nos dois solos, pois a aplicação de KCl, isolado ou associado com os fosfatos, aumentou a concentração de K solúvel ( $K^+$ ) em todas as distâncias avaliadas. A adição localizada de uma dose equivalente a 200 kg  $ha^{-1}$  de  $K_2O$  (4,4 g de  $K_2O$ ) proporcionou valores de  $K^+$  na camada de solo mais próxima dos grânulos (0-1 cm) superiores a 10.000  $mg\ dm^{-3}$ ; na camada distante do local fertilizado (5,0 a 7,0 cm), as concentrações foram superiores a 1500  $mg\ dm^{-3}$  (Tabela 2.3).

Nas proximidades dos fertilizantes, os teores de  $K^+$  não foram influenciados pela adição dos adubos fosfatados até 2,0 e 3,0 cm distante dos granulos, respectivamente no CH e no NV, pois os valores foram similares na presença ou não dos fosfatos, uma vez que todos tratamentos receberam a mesma dose de KCl, e isto provavelmente ocorreu porque a CTC efetiva do solo variou e reteve mais K na região mais próxima aos grânulos comparada aos locais mais distantes. Nas demas regiões, entretanto, os tratamentos com fosfato+KCl normalmente apresentaram menores valores de  $K^+$  do que aquele somente com o fertilizante potássico (Tabela 2.3), provavelmente devido à formação de precipitados de fosfatos de potássio (AKINREMI; CHO, 1993).

### Efeito do P

Os tratamentos diferiram entre sim com uma única extração de P pelo método Mehlich 1, em ambos os solos (Tabela 2.4). O solo tratado com SFT foi o que apresentou o maior valor de P comparado aos demais tratamentos, com valores 28 e 21% maiores que o DAP, no CH e NV, respectivamente. As concentrações de P no tratamento com SFT foram 774 e 1904 vezes superiores que o tratamento com KCl, para o CH e NV, respectivamente.

As curvas de acúmulo de P no NV mostraram comportamento diferente entre os métodos de extração e entre as camadas (Figura 2.2). Na camada 0-1 cm distante do local de aplicação dos fertilizantes, para o método de Mehlich 1, o tratamento com SFT apresentou maiores valores de P comparado ao DAP, na qual o aumento cumulativo de P foi praticamente linear até o nono dia de extração e seus valores máximos foram 6518 e 5518 mg dm<sup>-3</sup> para os tratamentos com SFT e DAP, respectivamente. O P acumulado extraído pelo método da RTA, nesta mesma camada, não diferiu entre os fosfatos em nenhuma extração, sendo que os valores cumulativos de P atingiram para os tratamentos SFT e DAP, respectivamente, 4121 e 3788 mg dm<sup>-3</sup> (Figura 2.2).

**Tabela 2.4** - Concentração de fósforo disponível na camada de 0-1 cm, em dois solos ácidos catarinenses, obtidos por uma única extração com o método Mehlich 1, em função da adição de fertilizantes fosfatados juntamente com KCl e somente KCl. Média de quatro repetições.

Tratamentos	Cambissolo	Nitossolo
	mg dm <sup>-3</sup>	
SFT+KCl	4258 A	2094 A
DAP+KCl	3064 B	1644 B
KCl	5,5 C	1,1 C
CV	11,3	8,8

Fonte: O Autor, 2003.

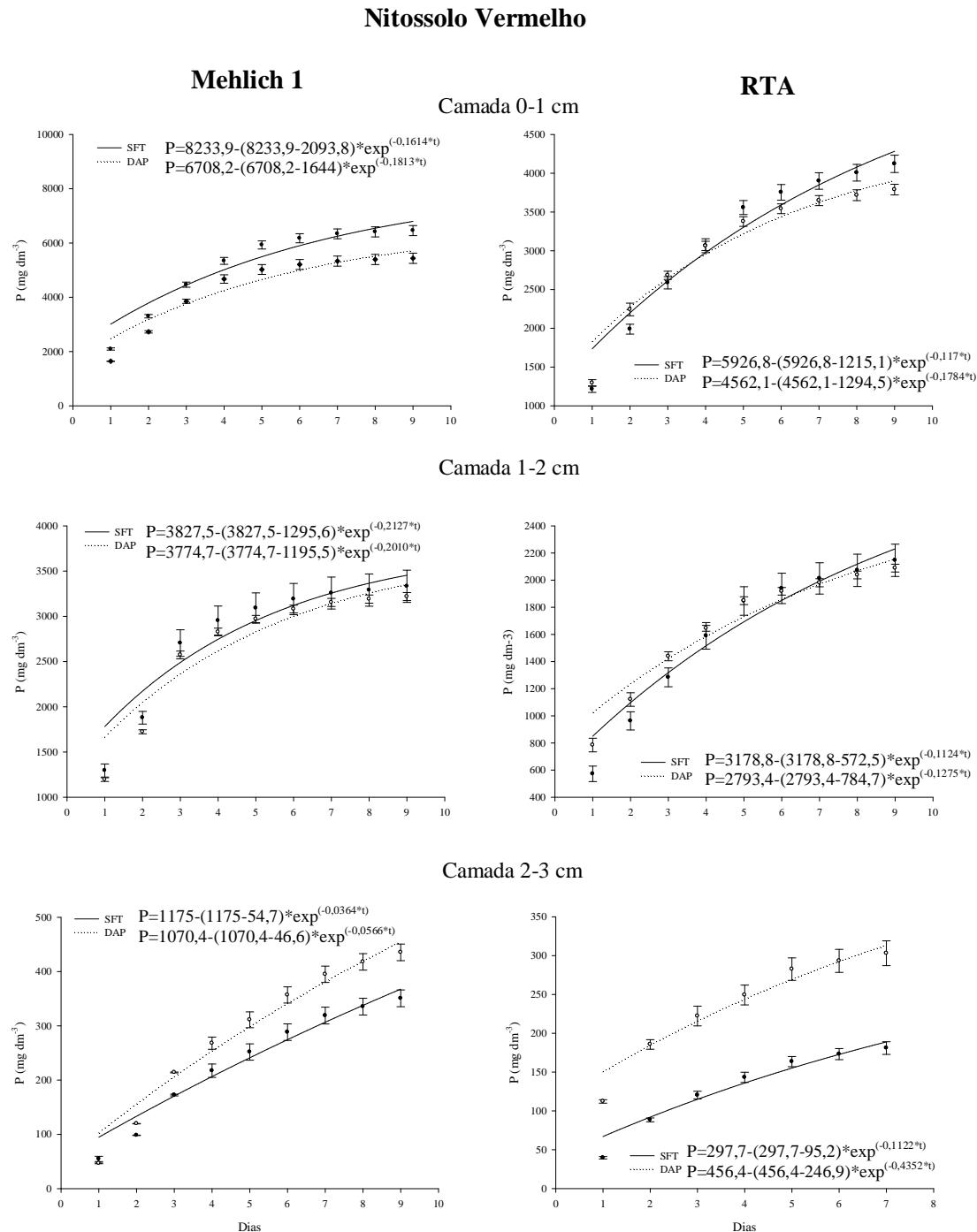
\*SFT = superfosfato triplo; DAP = diamônio fosfato; KCl = cloreto de potássio; CV = coeficiente de variação.\*Médias seguidas de letras maiúsculas distintas nas colunas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

No NV, a camada 1-2 cm, não diferiu entre os fosfatos em nenhum método de extração (Figura 2.2). No entanto, na camada 2-3 cm, houve diferença entre as fontes em ambos os métodos de extração, na qual o tratamento DAP apresentou as maiores concentrações de P, comparado ao SFT. Nesta camada, o P acumulado obtido pelo Mehlich 1 atingiu 351 mg dm<sup>-3</sup>, para o SFT e 438 mg dm<sup>-3</sup>, para o DAP; enquanto na RTA atingiu 181 e 303 mg dm<sup>-3</sup>, para SFT e DAP, respectivamente. Na camada 3-4 cm, só houve diferença entre

as fontes de P para o método de extração RTA, onde o tratamento com SFT foi maior que o DAP nos valores de P acumulado, chegando a concentrações de 64,3 e 30,6 mg dm<sup>-3</sup>, para SFT e DAP, respectivamente (dados não mostrados).

Para o CH, os efeitos nas curvas acumulativas de P foram semelhantes ao NV na camada 0-1 cm distante dos locais de aplicação dos fertilizantes (Figura 2.3). Para o método de extração Mehlich 1, o tratamento com SFT apresentou maiores valores de P do que aquele com DAP e os valores cumulativos de P aumentaram linearmente até o 9º dia de extração, atingindo valores máximos iguais a 10276 e 7650 mg dm<sup>-3</sup>, no SFT e DAP, respectivamente. No entanto, no método de extração da RTA, na camada 0-1 cm, o P acumulado não diferiu entre as fontes de P e seus valores na última extração foram 56,7 e 46,1% menores que o método Mehlich 1, nos tratamentos SFT e DAP, respectivamente.

**Figura 2.2** - Concentrações de fósforo acumulado ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em função dos dias de extrações sucessivas nas diferentes camadas e da adição de superfosfato triplo (SFT) ou diamônio fosfato (DAP), em um Nitossolo Vermelho, extraídos pelo método de Mehlich 1 e da resina trocadora de ânion, RTA.



Fonte: O Autor, 2003.

As maiores concentrações de P acumulado encontradas no tratamento com SFT, no método Mehlich 1, em ambos os solos, pode estar relacionada com uma superestimativa das

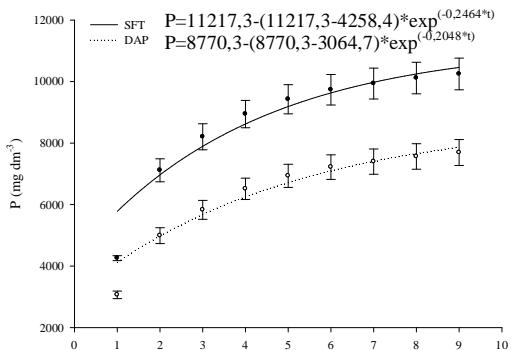
concentrações de fósforo, devido a dissolução preferencial das formas de P ligadas ao Ca, fato que ocorre quando utilizam-se métodos de extração que agem por dissolução ácida, como é o caso do Mehlich 1 (AKINREMI; CHO, 1991; ERNANI et al., 1996).

**Figura 2.3** - Concentrações de fósforo acumulado ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), em função dos dias de extrações sucessivas nas diferentes camadas e da adição de superfosfato triplo (SFT) ou diamônio fosfato (DAP), em um Cambissolo Húmico, extraídos pelo método de Mehlich 1 e da resina trocadora de ânion, RTA.

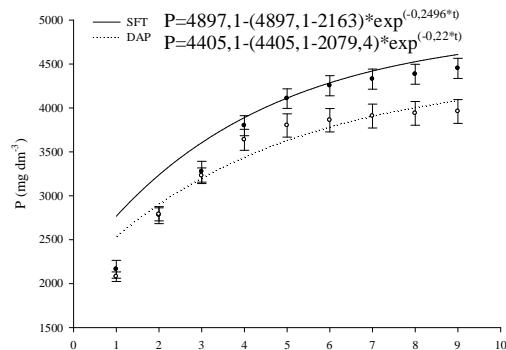
### Cambissolo Húmico

#### Mehlich 1

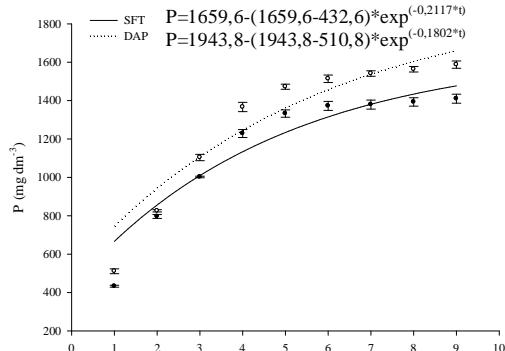
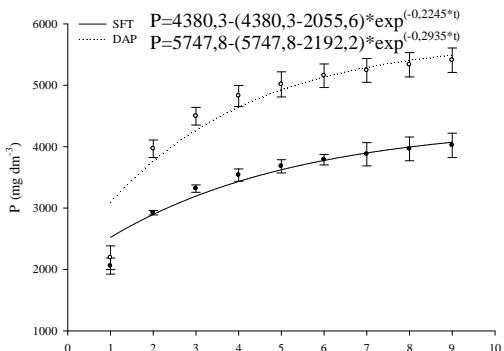
Camada 0-1 cm



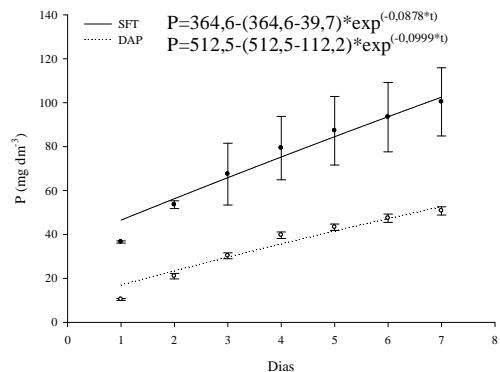
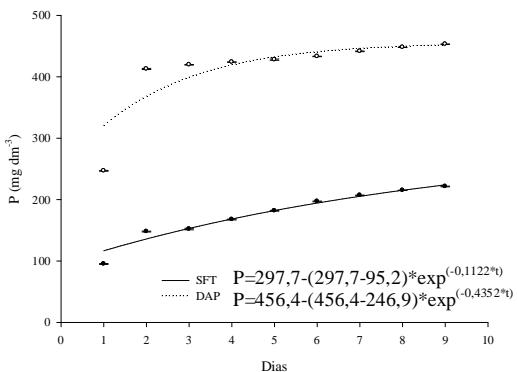
RTA



Camada 1-2 cm



Camada 2-3 cm



Fonte: O Autor, 2003.

Nas camadas 0-1 e 1-2 cm, as concentrações de fósforo, extraídas por Mehlich 1, começaram a estabilizar no 6º dia de extração para o NV e no 8º para o CH. Isto provavelmente ocorreu pela maior ocorrência de sítios disponíveis no NV comparado ao CH, fato que ocorre em solos de natureza ácida que contenham elevados teores de argila, sesquióxidos de Fe e Al e matéria orgânica (Raij et al., 1987) e também pela alta densidade de cargas adicionadas, saturando os sítios. No método de extração RTA, ambos os solos estabilizaram suas concentrações no 7º extrato (Figura 2.2 e 2.3). Cabe ressaltar que, devido a aplicação de doses muito altas dos fertilizantes fosfatados, não foi possível chegar a valores de P extraíveis próximos de zero.

As concentrações totais de P, a médias das camadas (0-4 cm), apresentaram diferença entre os tipos de extratores (Tabela 2.5). Na qual, nestas regiões adjacentes a aplicação dos grânulos das fontes de P, quantificou-se maiores concentrações de fósforo com o extrator Mehlich 1 comparado à RTA. Esta maior extração de P pelo Mehlich1 se deve ao fato dele quantificar algumas formas de P precipitadas, na forma de fosfato de cálcio além do P adsorvido. Gatiboni et al., (2002) verificaram que o método de Mehlich 1 é bastante eficiente em solos com alta disponibilidade de fósforo, como é o caso do presente experimento, onde a dose de fosfato aplicada foi extremamente grande, devido ao objetivo do trabalho que foi verificar as reações químicas ocorrentes próximas aos grânulos dos adubos e suas implicações, enquanto a RTA apresenta-se mais eficaz para solos com pouco disponibilidade deste elemento.

**Tabela 2.5** - Médias da concentração total de fósforo disponível nas camadas de 0-4 cm, em dois solos ácidos catarinenses, obtidos por extrações sucessivas pelos métodos Mehlich 1 e resina trocadora de ânions (RTA), em função da adição de fertilizantes fosfatados juntamente com KCl. Média de quatro repetições.

Tratamentos	Média das camadas (0-4 cm)		
	Nitossolo	Cambissolo	CV (%)
----- P (mg dm <sup>-3</sup> ) -----			
SFT+KCl Mehlich 1	2594 A a	3712 A a	48,8
DAP+KCl Mehlich 1	2320 A b	3444 A a	43,5
SFT+KCl RTA	1555 B a	1646 B a	26,9
DAP+KCl RTA	1649 B a	1490 B a	22,0
CV (%)	58,8	29,8	

Fonte: O Autor, 2003.

\*SFT = superfosfato triplo; DAP=diamônio fosfato; KCl=cloreto de potássio; CV=coeficiente de variação.

\*Médias seguidas de letras maiúsculas distintas, nas colunas e em cada tipo de solo, diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%. Médias seguidas de letras minúsculas distintas, nas linhas e em cada tipo de fonte e método, diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Na média das quatro camadas avaliadas (0-4 cm), com exceção do fertilizante DAP, extraídos pelo método de Mehlich 1, não houve diferença entre os tipos de solos (Tabela 2.5). A diferença entre os solos, somente foi apresentada no tratamento DAP, na qual o Cambissolo foi maior que o Nitossolo, quando extraídos por Mehlich 1. Esta maior concentração de P encontrada no CH, pode ser promovida pela maior capacidade de adsorção de P (CMAP) pelo outro solo (Tabela 2.1).

#### 2.4. Conclusões

1. Independente do tipo de solo, a movimentação do P em 45 dias ocorre até o quarto centímetro distante dos grânulos;
2. A aplicação de DAP aumenta o pH dos solos nas adjacências dos grânulos.
3. A adição de SFT ou DAP aumenta a disponibilidade de Ca e o SFT aumenta a de Mg nas adjacências dos grânulos, sem influenciar a disponibilidade de K;
4. No método Mehlich 1, os valores analíticos de P nas adjacências dos grânulos variam com o tipo de adubo fosfatado, na qual, ambos os solos quantificam maior teor de P onde é aplicado SFT.
5. Nos dois solos, o extrator Mehlich 1 solubiliza maiores concentrações de P que a RTA.

### **3. CAPÍTULO II – A APLICAÇÃO CONJUNTA DE SUPERFOSFATO TRIPLO E DIAMÔNIO FOSFATO COM CLORETO DE POTÁSSIO AUMENTA A CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO E DIMINUI A DE POTÁSSIO NA SOLUÇÃO DO SOLO**

#### **Resumo**

As plantas absorvem os nutrientes da solução do solo. A concentração de alguns nutrientes neste meio, entretanto, a exemplo do P é muito baixa e pode limitar a sua chegada às raízes. O objetivo deste trabalho foi quantificar as concentrações dos nutrientes na fase sólida e na solução do solo nas adjacências dos locais de aplicação dos fertilizantes fosfatados e potássicos minerais, assim como as atividades de P e K em solução. O trabalho foi realizado em 2010 e utilizaram-se amostras de um Cambissolo Húmico (CH) e um Nitossolo Vermelho (NV). Os tratamentos consistiram da adição de superfosfato triplo (SFT), diamônio fosfato (DAP) e cloreto de potássio (KCl), e das combinações de cada adubo fosfatado com KCl, além de uma testemunha, sem nenhum fertilizante (T), todos na presença (CC) ou não de calcário (SC). As quantidades de SFT, DAP e KCl aplicadas foram respectivamente de 73,1; 66,7 e 51,2 g kg<sup>-1</sup> no NV, e de 129,5; 118,3 e 90,7 g kg<sup>-1</sup> no CH, equivalentes à mesma dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O para cada solo, respectivamente 1400,0 e 2475,0 kg ha<sup>-1</sup> para o NV e CH. Os fertilizantes comerciais, cujos grânulos tinham diâmetro menor do que 2,0 mm foram homogeneizados manualmente com 1,0 kg de solo (base seca) e a seguir umedecidos e acondicionados em sacos plásticos. Quando extraídos com Mehlich 1, a concentração de P diferiu entre os fosfatos somente no NV, sendo o SFT combinado com o cloreto na presença de calcário que apresentou a maior concentração, atingindo 11454 mg dm<sup>-3</sup> de P. No método da RTA, a diferença média estimada entre as fontes fosfatadas foram 9757 e 43163 mg dm<sup>-3</sup> de P para o NV e CH, respectivamente, sendo o DAP superior ao SFT em ambos os solos. A concentração de P na solução variou com a fonte de P nos diferentes solos, sendo que no NV o somatório de P nos solos tratados com DAP foi 9307 mg L<sup>-1</sup> maior que os tratados com SFT; enquanto que no CH o somatório foi 17393 mg L<sup>-1</sup> maior nos tratamentos com SFT.

Independente do tipo de solo, a combinação de cloreto de potássio com os fertilizantes fosfatados aumentam a disponibilidade de fósforo na solução do solo e diminui a concentração de potássio na solução e no solo, assim como a sua atividade. O método de extração, o tipo de solo e o fertilizante aplicado afetam diretamente a concentração de P no solo. A atividade de P, dependendo da forma como ele se encontra em solução é afetada distintamente pelas fontes fosfatadas.

**Palavras-chave:** Atividade de íons. fontes de fosfatos. adubação potássica. saturação.

#### **3.1. Introdução**

O fósforo (P) é um dos macronutrientes presente no solo em menor concentração. Neste meio, os teores encontram-se entre 0,2 e 5,0 g kg<sup>-1</sup>, mas apenas uma pequena fração

esta disponível para as plantas. Na solução do solo os teores de P são baixos, variando de 0,1 a 10 µmol L<sup>-1</sup> (GAHOONIA; NIELSEN, 2004), sendo que esta pequena disponibilidade de P se deve, entre outros fatores, a algumas reações ocorrentes no solo principalmente de adsorção específica e precipitação.

Na adsorção específica, o pH do solo pode influenciar a interação existente entre o núcleo central e o ligante. Em solos com cargas líquidas negativas, a elevação do pH e, consequentemente, o aumento do número de hidroxilas (OH<sup>-</sup>) na solução do solo desloca o P adsorvido. Isto ocorre porque as cargas negativas geram um potencial elétrico negativo, favorecendo a adsorção específica de cátions e dificultando a adsorção de ânions. O contrário ocorre com solos de cargas elétricas positivas. Ademais, nas regiões próximas dos grânulos, subsequente a adição de fertilizantes ao solo ocorre um aumento da concentração eletrolítica da solução e isto pode influenciar a magnitude com que o potencial elétrico nas proximidades das superfícies sólidas afeta a adsorção específica de íons (ERNANI, 2008).

Alguns precipitados de P existem naturalmente no solo, porém a maioria deles é formada após adição de fertilizantes fosfatados nas microrregiões adjacentes aos grânulos, onde a concentração de P é elevada, uma vez que a precipitação de íons somente ocorre em condições de supersaturação. Os principais precipitados envolvendo o P no solo são os fosfatos de cálcio, de ferro e de alumínio (FIGUEIREDO, 1985; AKINREMI; CHO, 1991). Os fosfatos de cálcio se formam em condições de pH alto e se dissolvem com o aumento da acidez. Os fosfatos de ferro e alumínio, por outro lado, se formam em condições de pH baixo e se dissolvem com a diminuição da acidez (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Na solução do solo, portanto, a concentração de P é dependente destas reações de adsorção específica e de precipitação, e a importância relativa de cada uma delas na disponibilidade do P, além de variar com o pH também é influenciada pela composição mineralógica do solo e pelo tipo de fosfato aplicado. Com relação à mineralogia, alguns autores relataram que a fixação de fósforo em solos essencialmente goethíticos é maior do que em solos hematíticos com características similares (BIGHAM et al., 1978; JONES, 1981; CURI; FRANZMEIER, 1984). Em contra partida, valores médios similares de sorção de P para goethitas naturais e hematitas naturais foram encontradas por Torrent et al.(1992; 1994). Podemos citar como exemplo os Latossolos Brunos, que apresentam predominantemente a goethita e um potencial de fixação de fósforo maior comparado aos Latossolos Vermelhos, onde domina a hematita. Quando se trata de diferentes fontes, a aplicação de fosfatos de cálcio (ERNANI et al., 2002; MANTOVANI et al., 2007) e do monoamônio fosfato diminuem o pH nas adjacências dos grânulos (ERNANI et al., 2002), enquanto o diamônio

fosfato proporciona efeito oposto (ERNANI, 2008). A modificação no pH dessas microrregiões pode afetar a densidade de cargas elétricas do solo e com isso variar a concentração de P disponível.

O conhecimento da composição química do solo é de grande importância para a estimativa do valor real de nutrientes que estão disponíveis e que poderão ser absorvidos pelas raízes e utilizados pela biota do solo, no entanto, esta não é uma prática fácil. Algumas técnicas têm sido utilizadas para extrair solução do solo, dentre elas destacam-se: o lisímetro, o método do deslocamento em coluna e o método da centrifugação. O primeiro método citado é utilizado no campo tendo como principal vantagem a não perturbação da estrutura do solo ao longo do tempo (WOLT, 1994) e como desvantagens a contaminação do solo pelo elemento filtrante (ANDERSEN et al., 2002) e a ocorrência de interação entre os compostos da solução com o material usado na construção do lisímetro (HORNUNG, 1996). O método do deslocamento da coluna é uma técnica de laboratório, na qual Gillman (1976) e Adams et al. (1980) identificaram um problema na sua execução, devido à baixa reprodutibilidade observada. A centrifugação é um método de laboratório que apresenta como principal vantagem a rapidez e a maior precisão dos resultados (KELLER, 1995), e como desvantagem o pouco volume de solução extraída (WHELAN; BARROW, 1980).

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar as concentrações dos nutrientes nas regiões adjacentes aos locais de aplicação dos fertilizantes fosfatados e potássico, assim como a concentração e a atividade de alguns destes elementos na solução do solo.

### 3.2. Material e Métodos

O experimento foi realizado em laboratório, na faculdade de Agronomia da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, SC, em 2010. Utilizaram-se amostras de um Cambissolo Húmico (CH) e um Nitossolo Vermelho (NV), coletadas na profundidade de 0-20 cm. Algumas características químicas dos mesmos são apresentadas na Tabela 3.1. Posteriormente à coleta, os solos foram passados em peneira com abertura de malha de 0,4 cm.

**Tabela 3.1** - Características químicas de um Cambissolo Húmico e um Nitossolo Vermelho do estado de Santa Catarina utilizados no estudo<sup>(1)</sup>. Média de três repetições.

Características	Cambissolo Húmico	Nitossolo Vermelho
pH em água	4,5	4,6
Matéria orgânica (%)	5,0	2,3
Argila (%)	40,0	79,0
P (mg dm <sup>-3</sup> )	7,3	7,1
K (mg dm <sup>-3</sup> )	182,0	157,5
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,4	2,5
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,8	0,6
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,5	0,04
CTC efetiva (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,2	3,5
CTC pH 7,0 (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	30,1	20,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,0	18,0
CMAP (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>(2)</sup>	831,0	2195,0
CMEP (RTA) (mg dm <sup>-3</sup> )	800,0	800,0

Fonte: O Autor, 2013.

<sup>(1)</sup>Avaliações analíticas foram realizadas com metodologias descritas por Tedesco et al. (1995).

<sup>(2)</sup>CMAP = capacidade de adsorção máxima de fósforo; CMEP=capacidade de extração máxima de fósforo pela resina trocadora de ânions.

Os tratamentos consistiram da aplicação de superfosfato triplo (SFT), diamônio fosfato (DAP), cloreto de potássio (KCl), e das combinações de doses de superfosfato triplo e cloreto de potássio (SFT + KCl) e de diamônio fosfato e cloreto de potássio (DAP + KCl), equivalente a aproximadamente 1400,0 e 2475,0 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O para o Nitossolo e Cambissolo, respectivamente, além de uma testemunha (T) sem adubação. Estas doses foram estabelecidas com base nos primeiros resultados de fósforo obtido em testes na camada mais próxima do grânulo, na qual pretendíamos simular as concentrações de P nas adjacências dos grânulos.

Todos os tratamentos foram adicionados em solos com e sem aplicação prévia de corretivo de acidez e as denominações dos tratamentos seguiram a seguinte ordem:

Testemunha + calcário = T-CC;

Testemunha sem calcário = T-SC;

Superfosfato triplo + calcário = SFT-CC;

Superfosfato triplo sem calcário = SFT-SC;

Diamônio fosfato + calcário = DAP-CC;

Diamônio fosfato sem calcário = DAP-SC;

Cloreto de potássio + calcário = KCl-CC;

Cloreto de potássio sem calcário = KCl-SC;

Superfosfato triplo + cloreto de potássio + calcário = SFT+KCl-CC;

Superfosfato triplo + cloreto de potássio sem calcário = SFT+KCl-SC;

Diamônio fosfato + cloreto de potássio + calcário = DAP+KCl-CC;

Diamônio fosfato + cloreto de potássio sem calcário = DAP+KCl-SC.

Pesou-se um quilograma de solo seco e, nos tratamentos que iriam receber o corretivo de acidez, foi adicionada água destilada até atingir a capacidade de campo e o calcário dolomítico, sendo incubado em sacos plásticos de 2 kg devidamente fechados por um período de 15 dias, abertos esporadicamente para que houvesse a oxigenação. Decorrido o tempo foram adicionados os fertilizantes, a correção da umidade e a homogeneização do solo, permanecendo incubado por mais 30 dias. Os grânulos de cada fertilizante (SFT, DAP e KCl) tinham diâmetro entre 0,5 e 2,0 mm. As quantidades de SFT, DAP e KCl aplicadas foram, respectivamente, de 73,1; 66,7 e 51,2 g kg<sup>-1</sup> para o Nitossolo Vermelho e de 129,5; 118,3 e 90,7 g kg<sup>-1</sup> para o Cambissolo Húmico.

Após o período de incubação os solos foram secos em estufa de ar à 105°C. Com o intuito de verificar se os fertilizantes foram totalmente disponibilizados ao solo separaram-se as amostras em duas partes, na qual metade foi triturada em gral e pistilo, a outra metade permaneceu na mesma granulometria, sendo ambas analisadas posteriormente.

Em cada amostra obtida, foi quantificado o P-disponível, extraído por solução ácida diluída (Mehlich-1) e por resina trocadora de ânions (RTA), ambas determinadas segundo metodologia de Murphy; Riley (1962). Também foram determinados os valores de pH-H<sub>2</sub>O e pH-CaCl<sub>2</sub>, além de Al, K, Ca e Mg trocáveis, de acordo com metodologia proposta por Tedesco et al. (1995). Extraiu-se também a solução do solo pelo método de centrifugação, na qual determinou-se o pH em solução e quantificaram-se os íons de P e K nesta fase. Utilizou-se para a extração da solução do solo um tubo especial (Maxi-Spin da Lida Manufacturing Corp.) constituído de duas câmaras conectadas por elemento filtrante em PVDF com malha de 0,45 µm (Figura 3.1).

Para a coleta de solução de solo, as amostras foram homogeneizadas e pesou-se uma quantidade de 100 g de solo, a qual levou-se à capacidade de campo. Após 15 minutos, as amostras foram colocadas no corpo do filtro (Figura 1 – B) e centrifugadas com rotação de 5000 rpm por 15 minutos (metodologia adaptada de Pérez, 2002).

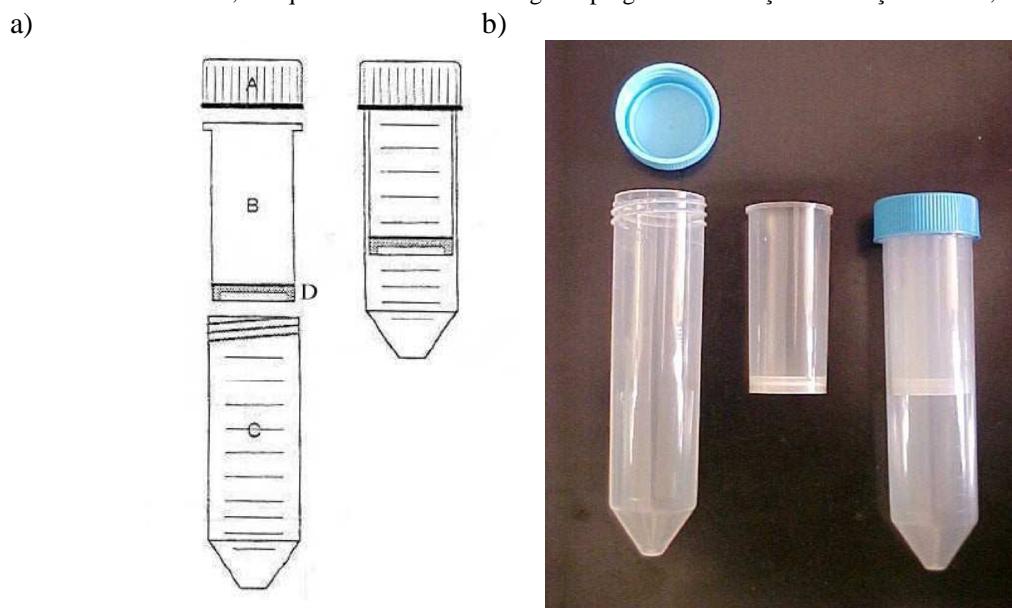
A especiação química da solução do solo foi realizada com o auxílio do programa computacional Visual Minteq (GUSTAFSSON, 2004), a partir das concentrações totais (mg

$\text{L}^{-1}$ ) de K e de P, e do pH da solução, obtendo-se a distribuição das espécies de cada elemento na solução do solo para cada tratamento.

Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os resultados obtidos foram avaliados estatisticamente por meio de análise de contrastes (SAS INSTITUTE, 2002), comparando grupos de tratamentos. Foram testados os seguintes contrastes: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; DAP x SFT (com K) = todos os tratamentos que contenham DAP e KCl x todos os tratamentos que contenham SFT e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário.

Para todos os testes efetuados foi considerado o nível mínimo de significância de 5%. Os valores estimados foram calculados com base no somatório de todos os tratamentos presentes no grupo, na qual subtraiu-se do somatório do grupo contrastante (estes valores encontram-se nos apêndices A, B, C, D, E, F e G).

**Figura 3.1** - Esquema do tubo de centrífuga para a extração da solução do solo, em que A é a tampa de rosca, B representa o corpo do filtro que se acopla em C, que é um tubo de 50 mL, e D é o elemento filtrante, à esquerda. Tubo de centrífuga empregado na obtenção da solução do solo, à direita.



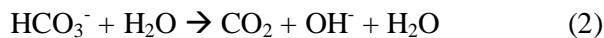
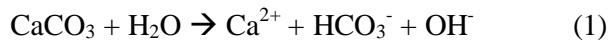
Fonte: PÉREZ, 2002.

### 3.3. Resultados e Discussão

Não foi observada diferença entre o solo triturado e o não triturado (dados não mostrados).

#### Efeito do pH em água

O pH do solo obtido em água foi influenciado pela presença de calcário, pela presença de KCl, pela aplicação de diferentes fontes de fosfatos, assim como suas combinações, em ambos os solos (Tabela 3.3). Os valores de pH aumentaram com a adição de calcário, nos dois solos (Tabela 3.2). No NV, o maior valor de pH foi encontrado no solo tratado com DAP-CC, na qual atingiu 7,6. Este tratamento foi 36% maior que a testemunha sem calcário (T-SC); enquanto que a diferença entre SFT-CC e a T-SC foi de 17%. No CH, o maior valor de pH foi encontrado no DAP-CC, sendo este, 32% maior que T-SC; enquanto o menor valor foi igualmente encontrado nos tratamentos SFT-SC e SFT+KCl-CC, com um pH 18% inferior a T-SC (Tabela 3.2). Os maiores valores de pH onde se aplicou calcário ocorrem porque após sua aplicação no solo, o ânion  $\text{CO}_3^{2-}$  que é o principal responsável pela hidrólise da água e formação do íon  $\text{OH}^-$ , neutralizou a acidez ativa ( $\text{H}^+$ ) do solo, conforme equações 1 e 2 (NOVAIS et al., 2007; ERNANI, 2008).



Souza; Lobato (2004) verificaram que a aplicação superficial de calcário promove a correção da acidez e melhora a eficiência de água e nutrientes pelas plantas, obtendo maiores produtividades.

Os valores de pH foram menores nos tratamentos com presença de KCl comparados ao grupo de tratamentos que não receberam esta fonte (Tabela 3.3). Onde não se aplicou o KCl, estimaram-se um incremento nos valores de pH iguais a 3,0 e 2,5 para o NV e CH, respectivamente (apêndice A).

Os diferentes fertilizantes fosfatados afetaram diferentemente o pH do solo (Tabela 3.2). Enquanto o DAP aumentou o pH, o SFT proporcionou efeito contrário. Independente da presença de calcário e de cloreto de potássio, o grupo dos fosfatos de amônio apresentaram valores de pH aproximadamente 34 e 40% maiores do que o grupo dos fosfatos de cálcio no NV e CH, respectivamente.

**Tabela 3.2** - Valores de pH-H<sub>2</sub>O da fase sólida do solo 45 dias após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Médias de quatro repetições.

Tratamentos	pH-H <sub>2</sub> O	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
Testemunha CC	6,7	5,9
Testemunha SC	4,9	5,0
SFT CC	5,2	4,2
SFT SC	4,7	4,1
DAP CC	7,6	7,3
DAP SC	7,4	7,0
KCl CC	5,9	5,6
KCl SC	4,0	4,4
SFT + KCl CC	4,9	4,1
SFT + KCl SC	4,5	4,0
DAP + KCl CC	7,3	6,4
DAP + KCl SC	7,0	6,6

Fonte: O Autor, 2013.

\*CC = com calcário; SC = sem calcário.

**Tabela 3.3** - Análise de contrastes em valores de pH-H<sub>2</sub>O da fase sólida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.

Contrastes	pH-H <sub>2</sub> O	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
----- Probabilidade -----		
CC x SC	0,0001*	0,0001*
Sem K x Com K	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (todos)	0,0001*	0,0001*
P x Testemunha	0,0001*	0,5092 <sup>ns</sup>
SFT x DAP (com K)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (sem K)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (CC)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (SC)	0,0001*	0,0001*

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastess: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%; ns = não significativo.

A diminuição do pH na presença da fonte potássica ou na sua combinação com as fontes fosfatadas ou com calcário, provavelmente pode ter ocorrido por causa do aumento da concentração eletrolítica proporcionado pelo sal potássico. Após a adição de fertilizantes minerais ou orgânicos em solos com carga líquida negativa, ocorre um aumento da concentração de eletrólitos que irá alterar o potencial elétrico das superfícies sólidas e o potencial dentro da camada elétrica difusa. Isto consequentemente irá promover um decréscimo no número de cargas negativas tanto na superfície sólida quanto na camada difusa. Caso o solo tenha carga líquida positiva ocorre o contrário (ERNANI, 2008). Sangoi et al (2009) verificaram que o aumento das doses de KCl promoveu aumento na condutividade elétrica, decorrentes do aumento da concentração eletrolítica em solução.

Em ambos os solos, a diferença entre o pH com relação às fontes de P, ocorre porque quando aplicamos DAP ao solo há um consumo de hidrogênios ( $H^+$ ) decorrente da transformação de parte das moléculas de  $HPO_4^{2-}$  existentes neste adubo em moléculas de  $H_2PO_4^-$  (ERNANI et al., 2002; ERNANI, 2008). Esta reação acontece devido ao equilíbrio químico existente entre essas duas formas fosfáticas ( $H_2PO_4^- = HPO_4^{2-} + H$ ), cuja constante de dissociação ácida é  $6,2 \times 10^{-8}$ , o que resulta num  $pK_a$  (potencial da constante de dissociação) de 7,21. Sendo assim, quando o pH do solo for 7,21 o meio terá 50 % de cada forma; abaixo e acima dele, haverá predomínio de  $H_2PO_4^-$  e  $HPO_4^{2-}$ , respectivamente (Ernani, 2008). Isto ocorre nas proximidades do local onde se aplicou o adubo, fator que estamos simulando em nosso trabalho. Por outro lado, a aplicação de SFT normalmente diminui o pH do solo ao redor dos grânulos desse adubo (ERNANI et al., 2002; MANTOVANI et al., 2007) devido à liberação de íons  $H^+$  por ocasião da dissolução de suas moléculas [ $(H_2PO_4)_2 = H_2PO_4 + HPO_4^- + H^+$ ] (FIGUEIREDO, 1985).

#### Efeito do pH em $CaCl_2$

O pH do solo obtido em cloreto de cálcio foi influenciado pela presença de calcário, pela presença de KCl e pela aplicação de diferentes fontes de fosfatos, assim como suas combinações, em ambos os solos (Tabela 3.5).

Semelhante ao que ocorreu no pH em água, a aplicação de calcário aumentou os valores de pH em sal. A diferença entre os tratamentos com calcário (CC) para os sem calcário (SC) foi no NV de 4,725 e, no CH de 2,475 (apêndice A). Dentre os tratamentos que receberam calcário destacamos o DAP com pH igual a 7,2, em ambos os solos (Tabela 3.4).

A presença de KCl e a influencia das diferentes fontes de fosfatos apresentaram resultados semelhantes ao pH em água, nas quais os valores de pH diminuíram com a aplicação do cloreto de potássio e aumentaram com a aplicação de DAP (Tabela 3.4).

A influência da calagem, da presença do adubo potássico e das diferentes fontes de P nos valores de pH em sal pode ser explicado, pelo mesmo motivo comentado anteriormente. Devido a semelhança dos resultados e podem seguir a mesma linha de raciocínio explicado para o pH em água (Tabela 3.5).

A mesma diferença relatada por alguns autores, entre o pH em água e o pH em sal, foi observada no presente estudo, em ambos os solo, mas somente no tratamento testemunha, na qual a diferença entre os pH de, aproximadamente, 0,7-0,9 pontos, sendo o pH em sal menor que o pH em água. Isto ocorre porque, em solos com carga líquida negativa e que recebem sal, as hidroxilas migram para a fase sólida com o objetivo de elevar as cargas negativas, restando íons de hidrogênio na fase líquida que diminuem o pH da suspensão solo-solvente, que é considerado o pH do solo (ERNANI, 2008), fato que foi demonstrado por Ernani; Almeida (1986) nos solos catarinenses.

**Tabela 3.4** - Valores de pH-CaCl<sub>2</sub> da fase sólida do solo 45 dias após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho. e em um Cambissolo Húmico. Médias de quatro repetições.

Tratamentos	pH-CaCl <sub>2</sub>	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
Testemunha CC	6,1	5,2
Testemunha SC	4,0	4,3
SFT CC	4,8	4,1
SFT SC	4,5	4,1
DAP CC	7,2	7,2
DAP SC	7,3	6,8
KCl CC	5,8	5,5
KCl SC	3,9	4,3
SFT + KCl CC	4,7	4,1
SFT + KCl SC	4,3	4,0
DAP + KCl CC	7,0	6,3
DAP + KCl SC	6,8	6,4

Fonte: O Autor, 2013.

\*CC = com calcário; SC = sem calcário.

**Tabela 3.5** - Análise de contrastes em valores de pH-CaCl<sub>2</sub> da fase sólida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.

Contrastes	pH-CaCl <sub>2</sub>	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
	Probabilidade	
CC x SC	0,0001*	0,0001*
Sem K x Com K	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (todos)	0,0001*	0,0001*
P x Testemunha	0,0001*	0,0001*
SFT x DAP (com K)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (sem K)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (CC)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (SC)	0,0001*	0,0001*

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastess: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%.

### Efeito do Al

No NV, os valores de alumínio foram influenciados pela presença de calcário, pela presença de KCl e pela aplicação de diferentes fontes de fósforo, assim como suas combinações; no outro solo, a exceção da presença de calcário os demais também interferiram nos valores de Al (Tabela 3.7).

No NV, a presença de calcário apresenta menores valores de Al comparado à sua ausência (Tabela 3.6). Destacamos aqui os tratamentos com a presença de fosfatos de amônio, na qual eliminam completamente a presença deste elemento; o contrário ocorre nos tratamentos com fosfatos de cálcio, onde os valores de Al atingem 3,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> mesmo na presença de calcário. No CH o efeito do calcário não foi observado.

**Tabela 3.6** - Valores de alumínio trocável da fase sólida do solo 45 dias após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Médias de quatro repetições.

Tratamentos	Alumínio trocável	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
	Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	
Testemunha CC	0,0	0,0
Testemunha SC	2,5	3,4
SFT CC	3,5	3,2
SFT SC	3,6	1,6
DAP CC	0,0	0,0
DAP SC	0,0	0,0
KCl CC	0,0	0,0
KCl SC	1,2	1,0
SFT + KCl CC	2,4	2,4
SFT + KCl SC	3,1	1,3
DAP + KCl CC	0,0	0,0
DAP + KCl SC	0,0	0,0

Fonte: O Autor, 2013.

\*CC = com calcário; SC = sem calcário.

**Tabela 3.7** - Análise de contrastes em valores de alumínio trocável da fase sólida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.

Contrastes	Alumínio trocável	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
	Probabilidade	
CC x SC	0,0001*	0,0523 <sup>ns</sup>
Sem K x Com K	0,0001*	0,0002*
DAP x SFT (todos)	0,0001*	0,0001*
P x Testemunha	0,0109*	0,0037*
SFT x DAP (com K)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (sem K)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (CC)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (SC)	0,0001*	0,0001*

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastess: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%; ns = não significativo.

A ausência de KCl promove maior incremento nos valores de Al comparado a sua presença (Tabela 3.6). As diferenças entre os grupos (sem e com KCl) foram de 2,9 e 3,55 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, para NV e CH, respectivamente (apêndice B). Com relação as diferentes fontes de fosfatos, os solos tratados com SFT foram sempre maiores que os tratados com DAP (Tabela 3.6), tendo em vista que os fosfatos de amônio eliminaram todo o alumínio presente nos solos estudados.

O corretivo de acidez é o meio mais fácil e econômico de eliminar o alumínio presente na solução do solo. Este nutriente é conhecido por ser tóxico às plantas causando inibição do desenvolvimento do sistema radicular e, consequentemente a diminuição da capacidade delas em absorver água e nutrientes. A diferença observada em nosso estudo entre a presença e ausência de calcário nos tratamentos se deve porque, a adição de calcário ao solo diminui a atividade do Al na solução, e isto ocorre porque o aumento de hidroxilas promove a precipitação do Al<sup>3+</sup>, formando monômeros (Al-OH<sup>2+</sup>, Al-OH<sub>2</sub><sup>+</sup>, Al-OH<sub>3</sub> e Al-OH<sub>4</sub><sup>-</sup>) e de polímeros [Al<sub>x</sub>(OH)<sub>y</sub><sup>(3x-y)</sup>] (ERNANI, 2008). Este efeito é mais eficiente conforme aumenta o contato entre o corretivo e o solo (ERNANI et al., 2004; AMARAL et al., 2004), fato que ocorreu em nosso estudo, na qual houve boa homogeneização entre ambos. Albuquerque et al. (2000), verificaram que o aumento das doses de calcário diminuiu a toxidez de Al<sup>3+</sup> em um Latossolo Bruno.

A presença de KCl combinado com SFT em altas concentrações, nos dois solos pode ter promovido a formação de compostos como o cloreto de alumínio, além de precipitados de fosfatos de alumínio. Com relação às diferenças observadas entre as fontes de fosfato podemos inferir que além do baixo pH no SFT, a presença de Ca em sua constituição e sua aplicação em grandes concentrações (como ocorreu neste trabalho) poderia ter deslocado o Al das cargas, aumentando sua concentração em solução, o que pode ser explicado pela teoria de Gapon (GAPON, 1933). Por outro lado, o DAP por elevar o pH nas adjacências de aplicação de seus grânulos pode ter diminuído a quantidade de Al trocável.

#### Efeito no cálcio

As concentrações de cálcio foram afetadas pela presença de calcário, pela adição de diferentes fertilizantes fosfatados, assim como as combinações dos fosfatos com o KCl e com o calcário, no NV. No outro solo, a presença isolada de calcário não influenciou o cálcio, provavelmente pelo alto coeficiente de variação (25,6%) (apêndice C), sendo este nutriente

somente afetado pela presença de KCl, pelas diferentes fontes de fosfatos e suas combinações com KCl e com calcário (Tabela 3.9).

Os tratamentos que receberam calcário promoveram um incremento nas concentrações de cálcio de  $1,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , no NV (apêndice C). Destacamos o SFT como o tratamento com maior valor de Ca, na qual atingiu  $7,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (Tabela 3.8). A presença de KCl influenciou as concentrações de Ca somente no CH, na qual os valores de Ca diminuíram com sua aplicação. A diferença entre os grupos com e sem KCl foi de  $2,02 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ .

Com relação às diferenças entre os fertilizantes fosfatados, as maiores concentrações de Ca foram apresentadas nos fosfatos de cálcio, com valores médios estimados de 28,7 e  $36,62 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  superiores aos fosfatos de amônio para NV e CH, respectivamente (apêndice C). Dentro destes grupos, as maiores concentrações de Ca foram encontradas no SFT+KCl-SC para o NV e no SFT-CC para o CH (Tabela 3.8).

**Tabela 3.8** - Concentrações de cálcio e magnésio trocáveis da fase sólida do solo 45 dias após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Médias de quatro repetições.

Tratamentos	Cálcio trocável		Mg trocável	
	NV	CH	NV	CH
Ca ( $\text{cmolc dm}^{-3}$ )				
Testemunha CC	1,6	6,9	1,5	0,5
Testemunha SC	0,6	1,8	0,5	0,0
SFT CC	7,5	14,7	1,6	2,5
SFT SC	5,9	6,6	1,4	0,2
DAP CC	0,4	1,2	0,6	0,6
DAP SC	0,2	0,9	0,8	0,6
KCl CC	0,9	6,5	0,4	0,4
KCl SC	0,6	1,8	0,2	0,8
SFT + KCl CC	7,4	13,8	1,4	0,3
SFT + KCl SC	9,3	5,8	1,3	1,0
DAP + KCl CC	0,6	1,2	0,4	1,2
DAP + KCl SC	0,3	1,0	0,1	1,6

Fonte: O Autor, 2013.

\*CC = com calcário; SC = sem calcário.

**Tabela 3.9** - Análise de contrastes em concentrações de cálcio e magnésio trocáveis da fase sólida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.

Contrastes	Cálcio trocável		Magnésio trocável	
	NV	CH	NV	CH
----- Probabilidade -----				
CC x SC	0,0001*	0,0937 <sup>ns</sup>	0,0001*	0,0001*
Sem K x Com K	0,1061 <sup>ns</sup>	0,0008*	0,0001*	0,0030*
DAP x SFT (todos)	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,5734 <sup>ns</sup>
P x Testemunha	0,0001*	0,0001*	0,3001 <sup>ns</sup>	0,0001*
SFT x DAP (com K)	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (sem K)	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (CC)	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (SC)	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastess: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contêm DAP x todos os tratamentos que contêm SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contêm SFT e KCl x todos os tratamentos que contêm DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contêm DAP e calcário x todos os tratamentos que contêm SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contêm DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contêm SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%; ns = não significativo.

A influência do calcário nas concentrações de cálcio no NV pode ter ocorrido devido à presença deste nutriente no calcário aplicado. A calagem aumenta as cargas negativas do solo, em decorrência do aumento do pH, com isto, a maioria dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  que ingressam no solo vão para as estas cargas criadas, e somente uma pequena quantidade deles permanece em solução. A criação destas novas cargas elétricas promove um rearranjo no equilíbrio dos cátions entre a fase sólida e a solução, favorecendo o deslocamento dos cátions preexistentes no solo para o lado da fase sólida (ERNANI, 2008). Oliveira et al., (2002) observaram o aumento de Ca e de Mg trocáveis num Cambissolo após aplicação de calcário dolomítico. Outros autores também observaram aumento do Ca trocável com a aplicação deste corretivo de acidez (RHEINHEIMER et al., 2000; CAIRES et al., 2002; AMARAL et al., 2004). Ao contrário do que aconteceu no NV, o efeito do calcário nos teores de cálcio no CH não ocorreu, provavelmente pela diferente textura (menor teor de argila) comparada ao CH.

Com relação à influência do KCl combinadas aos fosfatos nas concentrações de Ca no CH, podemos inferir que, esta fonte potássica pode ter favorecido o aumento da disponibilidade de cálcio, agindo como um competidor pelas cargas negativas, devido a

grande concentração das fontes aplicadas, usando neste caso novamente a lei de ação de massas.

O efeito das diferenças entre as fontes fosfatadas nas concentrações de Ca, em ambos os solos se deve pela presença deste nutriente nos fosfatos de cálcio favorecendo o aumento de suas concentrações. Além disso, o DAP por elevar o pH do solo nas adjacências de aplicação de seus grânulos, pode estar favorecendo a formação de precipitados de fósforo com cálcio e proporcionando diminuição de seus valores trocáveis (AKINREMI; CHO, 1991).

### Efeito do Mg

No NV, as concentrações de Mg no solo diferiram com relação a presença de calcário, a presença de KCl e a aplicação de diferentes fontes de fosfatos, além de suas combinações. Por outro lado, no CH, somente a presença de calcário, a presença de KCl e a aplicação das fontes fosfatadas combinadas com KCl e com calcário afetaram o Mg (Tabela 3.9).

A aplicação de calcário aumentou a concentração de Mg com relação aos tratamentos sem a sua aplicação. Em ambos os solos, destacamos o tratamento SFT com os maiores valores de Mg, sendo eles iguais a 1,6 e 2,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, no NV e CH, respectivamente (Tabela 3.8). A respeito da presença de KCl, as concentrações de Mg apresentaram comportamentos distintos em cada solo. Enquanto no NV as concentrações diminuíram com a aplicação da fonte potássica; no CH ocorreu o contrário.

As diferentes fontes de P afetaram as concentrações de Mg somente no NV, na qual o grupo dos fosfatos de cálcio apresentou uma concentração de Mg maior que o grupo dos fosfatos de amônio. A diferença estimada entre estas fontes foi igual a 3,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> (apêndice C).

A adição de KCl combinada com as fontes de P pode ter diminuído a concentração de Mg porque as altas concentrações de P aplicadas podem favorecer a formação de precipitados com o magnésio (FORDHAN; SCHWERTMANN, 1977). Por outro lado, a aplicação de KCl pode ter aumentado as concentrações de Mg devido ao aumento do K em solução que provavelmente deslocou o Mg das cargas negativas do solo.

O aumento de Mg trocável decorrente da aplicação de calcário dolomítico ao solo ocorre porque, além deste elemento fazer parte da sua composição, a calagem aumenta as cargas negativas do solo, devido ao aumento do pH (CAIRES et al., 2003). No entanto, por outro lado pode ter ocorrido a diminuição da concentração de Mg trocável onde não se aplicou calcário simplesmente pela formação de compostos com este elemento, devido a sua aplicação em grandes quantidades.

### Efeito do K

As concentrações de potássio foram influenciadas no NV, pela presença de KCl, pela aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados analisados como um todo, pelos diferentes fertilizantes fosfatados na presença de KCl e também pelas diferentes fontes de P na ausência de calcário. No CH, a influência só aconteceu quando avaliou-se a presença de KCl (Tabela 3.11).

A aplicação de KCl aumentou as concentrações de potássio trocável, em ambos os solos (Tabela 3.10). O incremento nas concentrações de K foram de 108176 mg dm<sup>-3</sup> para o NV e de 165642 mg dm<sup>-3</sup> para o CH. No NV, o SFT+KCl-SC foi o tratamento que apresentou a maior concentração de K, igual a 19179 mg dm<sup>-3</sup>. No outro solo, destacamos o solo tratado com KCl-SC com um valor de K igual a 32852 mg dm<sup>-3</sup> (apêndice B).

Na comparação entre os fertilizantes fosfatados, o grupo contendo SFT apresentou as maiores concentrações de K comparados ao grupo com DAP, no NV. A superioridade estimada na concentração de K adubadas com as fontes de cálcio foi de 2887 mg dm<sup>-3</sup>; e dentre estes tratamentos destacamos o SFT+KCl-SC (apêndice B).

**Tabela 3.10** - Concentração de potássio solúvel da fase sólida do solo 45 dias após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Médias de quatro repetições.

Tratamentos	Potássio solúvel	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
	K (mg dm <sup>-3</sup> )	
Testemunha CC	241,5	149,0
Testemunha SC	157,5	182,0
SFT CC	349,0	242,0
SFT SC	289,0	230,5
DAP CC	276,0	143,0
DAP SC	197,5	149,0
KCl CC	18452	29584
KCl SC	18452	32852
SFT + KCl CC	18574	25652
SFT + KCl SC	19178	24744
DAP + KCl CC	17787	26438
DAP + KCl SC	17242	27467

Fonte: O Autor, 2013.

\*CC = com calcário; SC = sem calcário.

**Tabela 3.11** - Análise de contrastes em concentrações de potássio solúvel da fase sólida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.

Contrastes	Potássio solúvel	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
	----- Probabilidade -----	
CC x SC	0,8858 <sup>ns</sup>	0,3062 <sup>ns</sup>
Sem K x Com K	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (todos)	0,0032*	0,2234 <sup>ns</sup>
P x Testemunha	0,0001*	0,0001*
SFT x DAP (com K)	0,0002*	0,0729 <sup>ns</sup>
DAP x SFT (sem K)	0,8006 <sup>ns</sup>	0,9248 <sup>ns</sup>
DAP x SFT (CC)	0,1920 <sup>ns</sup>	0,7195 <sup>ns</sup>
DAP x SFT (SC)	0,0034*	0,1730 <sup>ns</sup>

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastess: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%; ns = não significativo.

As concentrações de K foram diferentes na presença ou não de KCl, e isto provavelmente ocorreu porque a alta concentração aplicada no grupo de tratamentos com a fonte potássica aumentou seus valores na forma trocável comparado ao grupo sem KCl. Esta elevada concentração de K nas regiões adjacentes aos grânulos da fonte potássica demonstra que a atividade iônica dos nutrientes na solução do solo nestes locais é muito diferente daquela que ocorre no restante do solo (ERNANI; BARBER, 1991; ERNANI; BARBER, 1993; ERNANI; BARBER, 1996) e, portanto pode afetar as reações químicas de forma diferenciada. Além disso, é desta região que ocorre a absorção de grande parte dos íons em solos recentemente fertilizados, nas quais elas precisam ser conhecidas para que se possa entender melhor a disponibilidade dos nutrientes à plantas. Neves et al. (2009) também encontraram altas concentrações de K próximo a região fertilizada com KCl.

As diferenças nas concentrações de K obtidas pelas fontes de fosfatos distintas no NV podem ser explicadas devido as altas doses de KCl e das fontes fosfatadas aplicadas, na qual podemos inferir que provavelmente pode ter ocorrido a formação de precipitados de

fosfato de potássio (AKINREMI; CHO, 1993). Ademais, a fonte fosfatada pode ter proporcionado efeito diferenciado de solubilização deste elemento pelo solo.

Vale ressaltar que os maiores valores de K solúvel no CH comparado ao NV, se devem as maiores quantidades de KCl aplicadas neste solo, conforme exposto no material e métodos.

#### Efeito do P-Mehlich1

As concentrações de P quando extraídas com Mehlich 1 foram afetadas pela presença de fósforo, pela aplicação de diferentes fontes de fosfatos e pelas combinações destas fontes com o cloreto de potássio e com o calcário, no NV. No outro solo, os fatores que afetaram as concentrações deste nutriente foram a presença de P e as diferentes fontes de fosfatos na ausência de KCl e na ausência de calcário (Tabela 3.13).

**Tabela 3.12** - Concentrações de fósforo da fase sólida do solo 45 dias após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho (NV) e em um Cambissolo Húmico (CH), obtidas pelos métodos de extração Mehlich 1 e resina trocadora de ânions (RTA). Médias de quatro repetições.

Tratamentos	P Mehlich 1		P RTA	
	NV	CH	NV	CH
----- P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) -----				
Testemunha CC	3,9	4,7	3,6	2,0
Testemunha SC	7,3	7,1	6,1	3,4
SFT CC	10642	38110	10114	14556
SFT SC	10045	43680	9647	13574
DAP CC	8415	26376	11064	22076
DAP SC	9303	17600	14167	23986
KCl CC	3,8	3,4	5,2	2,4
KCl SC	7,2	9,4	6,2	3,0
SFT + KCl CC	11454	19370	4659	14808
SFT + KCl SC	10702	21140	5162	13197
DAP + KCl CC	7886	29913	5992	22900
DAP + KCl SC	8552	18946	8117	30336

Fonte: O Autor, 2013.

\*CC = com calcário; SC = sem calcário.

Os tratamentos com presença de fósforo aumentaram as concentrações deste nutriente, em ambos os solos comparados ao grupo das testemunhas. O incremento proporcionado pelo grupo que continha fósforo no solo foi igual a  $19238 \text{ mg dm}^{-3}$  de P no NV e  $53772 \text{ mg dm}^{-3}$  de P no CH (apêndice D). O aumento de P nos solos tratados com fosfatos já era de se

esperar, visto que a aplicação de um fertilizante ao solo após ser dissolvido tem a finalidade de liberar os nutrientes ao solo e, consequentemente aumentar suas concentrações tanto no solo quanto na solução.

**Tabela 3.13** - Análise de contrastes em concentrações de fósforo extraídos por Mehlich 1 e resina trocadora de ânions (RTA) da fase sólida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.

Contrastes	P Mehlich 1		P RTA	
	NV	CH	NV	CH
----- Probabilidade -----				
CC x SC	0,8226 <sup>ns</sup>	0,5449 <sup>ns</sup>	0,0586 <sup>ns</sup>	0,0494*
Sem K x Com K	0,8423 <sup>ns</sup>	0,0811 <sup>ns</sup>	0,0001*	0,0408*
DAP x SFT (todos)	0,0001*	0,0836 <sup>ns</sup>	0,0001*	0,0001*
P x Testemunha	0,0001*	0,0001*	0,0001*	0,0001*
SFT x DAP (com K)	0,0001*	0,4804 <sup>ns</sup>	0,0091*	0,0001*
DAP x SFT (sem K)	0,0001*	0,0026*	0,0012*	0,0001*
DAP x SFT (CC)	0,0001*	0,9195 <sup>ns</sup>	0,1512 <sup>ns</sup>	0,0001*
DAP x SFT (SC)	0,0001*	0,0210*	0,0001*	0,0001*

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastess: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%; ns = não significativo.

O grupo dos tratamentos com SFT apresentou a maior concentração de P comparado aos tratados com DAP, no NV. A diferença na concentração de P estimada neste solo foi igual a 8868 mg dm<sup>-3</sup> (apêndice D). Cabe ressaltar que o tratamento que apresentou a maior concentração de P foi o SFT+KCl-CC com valor igual a 11454 mg dm<sup>-3</sup> (Tabela 3.12). No entanto, no CH, as diferenças entre as fontes de fosfatos só foram observadas quando as contratamos sem a presença de KCl e sem a presença de calcário, sendo os tratamentos com fosfatos de cálcio com concentrações de P superiores aos com fosfatos de amônio.

O SFT promoveu maior incremento nas concentrações de P extraídas com Mehlich 1 comparado ao DAP porque este é um extrator com valor de pH muito ácido, o que pode superestimar as concentrações de fósforo devido à dissolução preferencial das formas de P ligadas ao Ca (AKINREMI; CHO, 1991; ERNANI et al., 1996). Aliado a isto, nos tratamentos onde combinou-se SFT + KCl, a presença de grandes concentrações de KCl

aumentou a concentração eletrolítica do meio, influenciando diretamente na concentração de P disponível. Ernani et al. (1996), trabalhando com solos ácidos, encontraram uma menor retenção de P devido a diminuição do potencial elétrico positivo do solo. As baixas concentrações no DAP com relação ao SFT podem ter ocorrido pela maior precipitação de fosfatos com o cálcio, favorecidos pelo pH alto promovido pelo DAP, além da presença de P e Ca (AKINREMI; CHO, 1991).

O presença de calcário avaliada isoladamente não afetou as concentrações de P provavelmente porque as grandes concentrações aplicadas de fosfatos e de cloreto podem ter mascarado seu efeito influenciando diretamente na magnitude das reações de adsorção, precipitação e dissolução.

#### Efeito do P-RTA

O P extraído pela resina trocadora de ânions, diferentemente do P obtido pelo Mehlich 1 foi influenciado pela presença de cloreto de potássio, pela presença de P, pela aplicação de diferentes fontes de fosfatos, assim como suas combinações, no NV. No outro solo, além destes fatores, a presença de calcário também influenciou a concentração de P-RTA (Tabela 3.13).

Os tratamentos com calcário no CH apresentaram uma concentração de P menor comparado aos tratamentos sem calcário. A diferença entre eles foi estimada em  $6756 \text{ mg dm}^{-3}$  (apêndice D), na qual podemos destacar o tratamento DAP+KCl-SC que extraiu  $30336 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, sendo esta a maior concentração encontrada (Tabela 3.12).

A presença de KCl afetou diferentemente as concentrações de P nos dois solos. Enquanto no NV, o fósforo foi menor onde se aplicou KCl; no CH ocorreu o contrário. As diferenças estimadas de P nos tratamentos sem e com KCl foram no NV de  $21060 \text{ mg dm}^{-3}$  maior na ausência de KCl e no CH de  $7049 \text{ mg dm}^{-3}$  maior na presença de KCl (apêndice D). Com isso, podemos inferir que a disponibilidade de P é afetada pelo método de extração, pelo tipo de solo e pela fonte de P e pela combinação desta com o cloreto de potássio.

Quando contrastamos todos os tratamentos que continham SFT com todos que continham DAP, os valores de P-RTA estimados foram maiores nos tratamentos com DAP, sendo estas diferenças de  $9757 \text{ mg dm}^{-3}$  no NV e de  $43163 \text{ mg dm}^{-3}$  no CH (apêndice D). Dentro os tratamentos avaliados destacam-se o DAP-SC no NV e o DAP+KCl-SC no CH, nas quais apresentaram as maiores concentrações de P, com valores respectivamente iguais a  $14167$  e  $30336 \text{ mg dm}^{-3}$  (Tabela 3.12).

A diferença de P-RTA observada somente no CH, pela presença de calcário se deve a elevação do pH proveniente da aplicação de calcário ao solo, na qual promove o aumento do número de hidroxilas no mesmo, fazendo com que o fosfato migre da fase sólida para a solução. Segundo Ernani (2008), o aumento de cada unidade de pH eleva as concentrações de hidroxilas na solução do solo em dez vezes, os quais competem com o fosfato pelos sítios de adsorção presentes nos componentes sólidos. Ademais, o efeito do pH também influencia a formação e a dissolução de precipitados de fósforo com Ca, Fe e Al, conforme mencionado anteriormente, interferindo nas concentrações de P.

Diferentemente do que ocorreu no Mehlich-1, as maiores concentrações de P na extração com RTA obtidas na fonte de fosfato de amônio pode ter ocorrido pela dissolução de alguns fosfatos, como os fosfatos de Fe e Al, que tem sua dissolução favorecida em pH mais elevado, e também porque a resina age por troca iônica, assemelhando-se as raízes das plantas, não havendo superestimação dos valores de P (SILVA; RAIJ, 1999; RHEINHEIMER et al., 2008).

No método da RTA observou-se uma diminuição dos valores de P quando aplicou-se o cloreto juntamente com o fosfato. Isto pode ter ocorrido porque, provavelmente, houve formação de precipitados e também pela elevada concentração salina do meio que pode ter prejudicado a eficiência de extração da RTA. O tipo de solo, com alto teor de argila pode ser outro fator que proporcionou a obtenção de menores concentrações de P (RHEINHEIMER et al., 2003).

Vale ressaltar que os maiores valores de P no CH comparado ao NV, em ambos os métodos de extração, se devem as maiores quantidades de fontes de P aplicadas neste solo, conforme exposto no material e métodos.

#### Efeito do pH da solução do solo

O pH da solução foi afetado pela presença de calcário, pela presença de KCl, pela aplicação de diferentes fontes de fosfatos, assim como suas combinações, em ambos os solos (Tabela 3.15). Os resultados de pH da solução e o pH do solo foram bastante similares indicando a forte relação existente entre as fases sólida e líquida para estas variáveis.

Os tratamentos com aplicação de calcário elevou o pH da solução comparado aos tratamentos sem sua adição, nos dois solos. Estimou-se uma diferença de 4,4 e 3,6 no NV e CH, respectivamente (apêndice E). Os maiores valores de pH onde se aplicou calcário foram obtidos nos solos tratados com DAP, atingindo respectivamente 7,2 e 7,4 para NV e CH (Tabela 3.14). Similar ao que ocorreu no pH do solo, os valores de pH em solução também

foram maiores onde não se aplicou KCl comparado a sua presença, e também onde se aplicou DAP comparado ao SFT.

**Tabela 3.14** - Valores de pH da solução do solo em função de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho (NV) e em um Cambissolo Húmico (CH). Média de quatro repetições.

Tratamentos	pH da solução	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
	pH	
Testemunha CC	6,2	6,3
Testemunha SC	4,1	4,9
SFT CC	4,9	4,2
SFT SC	4,6	3,9
DAP CC	7,2	7,4
DAP SC	7,4	6,9
KCl CC	5,9	5,2
KCl SC	4,0	3,7
SFT + KCl CC	4,6	3,6
SFT + KCl SC	4,4	3,6
DAP + KCl CC	7,0	6,4
DAP + KCl SC	6,7	6,6

Fonte: O Autor, 2013.

\*CC = com calcário; SC = sem calcário.

**Tabela 3.15** - Análise de contrastes em valores de pH da fase líquida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.

Contrastes	pH solução	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
	Probabilidade	
CC x SC	0,0001*	0,0001*
Sem K x Com K	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (todos)	0,0001*	0,0001*
P x Testemunha	0,0001*	0,0006*
SFT x DAP (com K)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (sem K)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (CC)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (SC)	0,0001*	0,0001*

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastess: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x

todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%; ns = não significativo.

Conforme comentado anteriormente para o pH do solo, a adição de calcário aumentou o pH comparado ao grupo dos tratamentos sem aplicação do mesmo (Tabela 3.14) porque após a aplicação de calcário no solo, o ânion  $\text{CO}_3^{2-}$  que é o principal responsável pela hidrólise da água e formação do íon  $\text{OH}^-$  neutralizou a acidez ativa ( $\text{H}^+$ ) do solo, conforme equações 1 e 2 mostradas para o pH do solo (NOVAIS et al., 2007; ERNANI, 2008).

A presença da fonte potássica ou a sua combinação com as fontes fosfatadas ou com calcário provavelmente pode ter ocorrido por causa do aumento da concentração eletrolítica proporcionado pelo sal potássico, ou seja, após a adição de fertilizantes minerais ou orgânicos em solos com carga líquida negativa, ocorre um aumento da concentração de eletrólitos que irá alterar o potencial elétrico das superfícies sólidas e o potencial dentro da camada elétrica difusa e, consequentemente promoverem um aumento no número de cargas negativas, caso o solo tenha carga líquida positiva ocorre o contrário (ERNANI, 2008).

Em ambos os solos, a diferença entre o pH com relação às fontes de P, ocorre porque quando aplicamos DAP ao solo há um consumo de hidrogênios ( $\text{H}^+$ ) decorrente da transformação de parte das moléculas de  $\text{HPO}_4^{2-}$  existentes neste adubo em moléculas de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  (ERNANI et al., 2002; ERNANI, 2008). Esta reação acontece devido ao equilíbrio químico existente entre essas duas formas fosfáticas ( $\text{H}_2\text{PO}_4^- = \text{HPO}_4^{2-} + \text{H}$ ), cuja constante de dissociação ácida é  $6,2 \times 10^{-8}$ , o que resulta num  $\text{pK}_a$  (potencial da constante de dissociação) de 7,21. Sendo assim, quando o pH do solo for 7,21 o meio terá 50 % de cada forma; abaixo e acima dele, haverá predomínio de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , respectivamente (Ernani, 2008). Isto ocorre nas proximidades do local onde se aplicou o adubo, ambiente que estamos simulando em nosso trabalho. Por outro lado, a aplicação de SFT normalmente diminui o pH do solo ao redor dos grânulos desse adubo (ERNANI et al., 2002; MANTOVANI et al., 2007) devido à liberação de íons  $\text{H}^+$  por ocasião da dissolução de suas moléculas [ $(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 = \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{HPO}_4^{2-} + \text{H}^+$ ] (FIGUEIREDO, 1985).

### Efeito do P da solução

No NV, a presença de KCl, a presença de diferentes fontes de fosfatos, a combinação de ambos e a combinação de fosfatos + calcário influenciaram os valores de P na solução do

solo. Porém no CH, com exceção da combinação de fosfato + calcário, os demais citados para o NV também afetaram o P na solução (Tabela 3.17).

As concentrações de P na solução foram maiores nos tratamentos que receberam cloreto de potássio, em ambos os solos. As diferenças das concentrações de P estimadas no NV e no CH foram respectivamente iguais a 6287 e 80743 mg dm<sup>-3</sup> de P (apêndice E); nas quais destacamos com as maiores concentrações de P em solução, no NV a combinação do fosfato de amônio com o cloreto na presença de calcário e, no CH a combinação do fosfato de cálcio com o cloreto sem o calcário (Tabela 3.16).

**Tabela 3.16** - Concentrações de fósforo na solução do solo (mg L<sup>-1</sup>), em função de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho (NV) e em um Cambissolo Húmico (CH). Média de quatro repetições.

Tratamentos	Fósforo da solução	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
	P (mg L <sup>-1</sup> )	
Testemunha CC	0,00	0,00
Testemunha SC	0,00	0,00
SFT CC	932	11313
SFT SC	1329	11585
DAP CC	3911	17978
DAP SC	4090	15546
KCl CC	0,00	0,00
KCl SC	0,07	0,07
SFT + KCl CC	2758	36938
SFT + KCl SC	3732	45654
DAP + KCl CC	5451	27215
DAP + KCl SC	4607	27357

Fonte: O Autor, 2013.

\*CC = com calcário; SC = sem calcário.

As diferentes fontes de P proporcionaram efeitos distintos nas concentrações de P da solução, nos solos avaliados. Enquanto no NV, o DAP promoveu maior incremento nas concentrações de P, com uma diferença estimada de 9307 mg L<sup>-1</sup>; no CH foi o SFT que se sobressaiu, proporcionando uma diferença estimada de 17393 mg L<sup>-1</sup> de P (apêndice E).

**Tabela 3.17** - Análise de contrastes em concentrações de fósforo da fase líquida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.

Contrastes	Fósforo da solução	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
----- Probabilidade -----		
CC x SC	0,4876 <sup>ns</sup>	0,3272 <sup>ns</sup>
Sem K x Com K	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (todos)	0,0001*	0,0032*
P x Testemunha	0,0001*	0,0001*
SFT x DAP (com K)	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (sem K)	0,0001*	0,0097*
DAP x SFT (CC)	0,0001*	0,4374 <sup>ns</sup>
DAP x SFT (SC)	0,0001*	0,0008*

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastess: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%; ns = não significativo.

De modo geral, no NV as diferenças entre as concentrações de fósforo no solo e na solução foram de respectivamente 91,2 e 86,8 % no SFT-CC e SFT-SC, de 53,5 e 56,0% no DAP-CC e DAP-SC, de 76 e 65% no SFT+KCl-CC e SFT+KCl-SC, e de 31 e 46% no DAP+KCl-CC e DAP+KCl-SC. Levando-se em consideração esta proporção, podemos observar que as maiores liberações de fósforo para a solução, com relação ao fósforo presente na fase sólida, ocorreram nos tratamentos com cloreto de potássio, ou seja, nestes tratamentos a fase sólida proporcionou maior incremento na disponibilidade de P à solução. Este efeito pode ser explicado porque a presença de sais aumenta a concentração eletrolítica do meio e com isto faz com que diminua o potencial negativo do solo (solos com potencial eletronegativo como é o caso do presente estudo), diminuindo assim a adsorção de P pelo solo (ERNANI, 2008).

No entanto, quando analisamos isoladamente a solução do solo no NV, a maior concentração de P neste meio foi obtida nos solos tratados com DAP, diferentemente da maior concentração encontrada no solo, a qual foi maior nos tratamentos com SFT quando extraídos com Mehlich-1 e com DAP quando extraídos pela RTA. Isto pode confirmar que o DAP foi o

tratamento que liberou a maior concentração de P para a solução, sendo neste caso e para este solo, o mais solúvel dos tratamentos com relação ao P. Podemos também inferir que nem sempre boas quantidades de P no solo refletem em quantidades suficientemente disponíveis para a planta. Além disso, a distinção dos resultados com relação ao método de extração e as diferentes fontes de P, nos faz pensar na hora de escolher qual o melhor método de extração utilizar para o fertilizante que aplicamos ao solo.

Diferentemente do que ocorreu no NV, a relação entre as diferenças das concentrações de P encontradas no solo e na solução para o CH foram distintas. Enquanto em alguns tratamentos a quantidade encontrada no solo foi superior a obtida em solução, em outros ocorreu o oposto. Os tratamentos que apresentaram maiores concentrações de P no solo foram os tratados com o SFT e as menores foram os tratados com DAP. À semelhança do que ocorreu no NV, a maior liberação de P para a solução no CH ocorreu nos tratamentos DAP.

No entanto, os tratamentos que apresentaram maior concentração de P em solução comparados à fase sólida foram os tratados com SFT. Neste caso, podemos dizer que as altas concentrações aplicadas destes fertilizantes, aliado ao tipo de solo, promoveu um maior acúmulo de P em solução, tendo em vista que este solo tem menor presença de óxidos de Fe e Al comparado ao NV e, consequentemente, menor poder adsorptivo pelo P (RAIJ et al., 1987).

Ademais, podemos inferir que a adição de KCl em conjunto com os fosfatos, neste solo, também proporcionou maior incremento na disponibilidade de P à solução, nos levando à crer que a liberação de fósforo para a fase líquida, quando aplicado SFT ou DAP é influenciada pela presença de KCl, fazendo com que aumente sua liberação. Este efeito pode ser explicado porque a presença de sais aumenta a concentração eletrolítica do meio e com isto faz com que diminua o potencial negativo do solo (solos com potencial eletronegativo como é o caso do presente estudo), diminuindo assim a adsorção de P pelo solo (ERNANI, 2008).

#### Efeito do K na solução

A concentração de potássio na solução do solo foi influenciada pela presença de calcário, pela presença de KCl, pela aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados, assim como pela combinação dos fosfatos com o calcário, no NV. Por outro lado, no CH o potássio em solução só foi influenciado pela presença de KCl (Tabela 3.19).

Ao contrário do que ocorre no solo, a adição de calcário diminui a disponibilidade de K na solução do solo. No grupo dos tratamentos sem calcário a concentração de K em solução foi  $23,7 \text{ mg L}^{-1}$  maior comparado ao grupo dos tratamentos com calcário, no NV (apêndice F).

Isto ocorreu possivelmente porque este produto promove o aumento das cargas negativas do solo e, consequentemente aumenta a adsorção do K diminuindo sua disponibilidade.

A aplicação de KCl aumentou as concentrações de K em solução, nos dois solos. No NV, as maiores concentrações de P em solução foram encontradas no tratamento com KCl com e sem calcário, nos quais seus valores atingiram, respectivamente, 1024 e 1023 mg L<sup>-1</sup>. No CH, as concentrações de K em solução também foram maiores nos solos tratados com KCl-CC e KCl-SC, com valores iguais a 12350 e 12000 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. No entanto quando combinamos a fonte potássica com o SFT ou DAP, este valor diminui pela metade, fato que não ocorreu no outro solo (Tabela 3.18).

**Tabela 3.18** - Concentrações de potássio na solução do solo (mg L<sup>-1</sup>), em função de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho (NV) e em um Cambissolo Húmico (CH). Média de quatro repetições.

Tratamentos	Potássio da solução	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
	K (mg L <sup>-1</sup> )	
Testemunha CC	3,4	7,0
Testemunha SC	4,2	7,3
SFT CC	17,8	24,1
SFT SC	20,7	22,3
DAP CC	26,2	18,7
DAP SC	29,5	20,1
KCl CC	1024	12350
KCl SC	1033	12000
SFT + KCl CC	1019	6700
SFT + KCl SC	1023	6450
DAP + KCl CC	1018	6200
DAP + KCl SC	1021	6250

Fonte: O Autor, 2013.

\*CC = com calcário; SC = sem calcário.

Diferentemente do que ocorreu no solo onde as maiores concentrações de K foram obtidas no SFT, em solução a aplicação de DAP proporcionou maior incremento nas concentrações de K, no NV. Isto nos leva a crer que o fosfato de amônio por liberar o cátion NH<sub>4</sub><sup>+</sup> irá saturar essas regiões, podendo promover um deslocamento do K das cargas do solo aumentando a concentração de K em solução.

**Tabela 3.19** - Análise de contrastes em concentrações de potássio da fase líquida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.

Contrastes	Potássio da solução	
	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Húmico
	Probabilidade	
CC x SC	0,0001*	0,2353 <sup>ns</sup>
Sem K x Com K	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (todos)	0,0001*	0,5041 <sup>ns</sup>
P x Testemunha	0,0001*	0,0001*
SFT x DAP (com K)	0,2452 <sup>ns</sup>	0,3514 <sup>ns</sup>
DAP x SFT (sem K)	0,0001*	0,9919 <sup>ns</sup>
DAP x SFT (CC)	0,0005*	0,4998 <sup>ns</sup>
DAP x SFT (SC)	0,0036*	0,7866 <sup>ns</sup>

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastess: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%; ns = não significativo.

Em ambos os solos, a diferença entre os grupos de tratamentos com KCl do grupo sem a presença do mesmo se deve as grandes doses de K aplicadas que saturaram os sítios de adsorção e promoveram um aumento de potássio em solução. No entanto, a diminuição do K no CH promovida pela presença de fosfatos provavelmente ocorreu pela alta concentração dos nutrientes fósforo e potássio que promoveram a formação de precipitados de fosfato de potássio (AKINREMI; CHO, 1993), ou também pela presença de outros cátions que poderiam competir com o K pelas cargas.

As maiores concentrações de P e K na solução do CH comparado ao NV, no presente estudo se deve a aplicação de maiores quantidades de SFT, DAP e KCl neste solo, conforme mencionado na metodologia.

#### Efeito na atividade de P e K

No NV, a atividade do íon  $\text{HPO}_4^{2-}$  foi influenciada pela presença de K, pela presença de P, pela aplicação de diferentes fontes fosfatadas, assim como a combinação dos fosfatos

com o KCl e também com o calcário. Porém no CH, além destes fatores, o  $\text{HPO}_4^{2-}$  também foi afetado pela presença de calcário (Tabela 3.21).

**Tabela 3.20** - Atividades de fósforo (nas formas de  $\text{HPO}_4^{2-}$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) e potássio (na forma de  $\text{K}^+$ ) da fase líquida do solo após a adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico, obtidas pelos métodos de extração Mehlich 1. Médias de quatro repetições.

Tratamentos	$\text{HPO}_4^{2-}$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{K}^+$
----- Cambissolo – mol L <sup>-1</sup> -----			
Testemunha CC	$4,52 \times 10^{-8}$	$3,57 \times 10^{-7}$	$1,80 \times 10^{-4}$
Testemunha SC	$1,96 \times 10^{-9}$	$3,90 \times 10^{-7}$	$1,88 \times 10^{-4}$
SFT CC	$1,18 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-1}$	$5,00 \times 10^{-4}$
SFT SC	$6,03 \times 10^{-5}$	$1,20 \times 10^{-1}$	$4,61 \times 10^{-4}$
DAP CC	$1,16 \times 10^{-1}$	$7,29 \times 10^{-2}$	$2,37 \times 10^{-4}$
DAP SC	$5,47 \times 10^{-2}$	$1,09 \times 10^{-1}$	$3,16 \times 10^{-4}$
KCl CC	$1,20 \times 10^{-20}$	$5,99 \times 10^{-17}$	$3,15 \times 10^{-1}$
KCl SC	$9,25 \times 10^{-11}$	$4,62 \times 10^{-17}$	$3,08 \times 10^{-1}$
SFT + KCl CC	$7,87 \times 10^{-5}$	$3,12 \times 10^{-1}$	$1,06 \times 10^{-1}$
SFT + KCl SC	$9,94 \times 10^{-5}$	$3,94 \times 10^{-1}$	$9,38 \times 10^{-2}$
DAP + KCl CC	$3,09 \times 10^{-2}$	$1,94 \times 10^{-1}$	$9,44 \times 10^{-2}$
DAP + KCl SC	$4,47 \times 10^{-2}$	$1,77 \times 10^{-1}$	$8,92 \times 10^{-2}$
----- Nitossolo – mol L <sup>-1</sup> -----			
Testemunha CC	$9,13 \times 10^{-18}$	$9,08 \times 10^{-17}$	$8,72 \times 10^{-5}$
Testemunha SC	$7,88 \times 10^{-20}$	$9,88 \times 10^{-17}$	$1,06 \times 10^{-4}$
SFT CC	$4,90 \times 10^{-5}$	$9,73 \times 10^{-3}$	$4,48 \times 10^{-4}$
SFT SC	$4,41 \times 10^{-5}$	$1,39 \times 10^{-2}$	$5,16 \times 10^{-4}$
DAP CC	$2,06 \times 10^{-2}$	$2,05 \times 10^{-2}$	$5,60 \times 10^{-4}$
DAP SC	$2,64 \times 10^{-2}$	$1,66 \times 10^{-2}$	$6,13 \times 10^{-4}$
KCl CC	$5,02 \times 10^{-9}$	$9,97 \times 10^{-8}$	$2,63 \times 10^{-2}$
KCl SC	$4,59 \times 10^{-10}$	$7,25 \times 10^{-7}$	$2,65 \times 10^{-2}$
SFT + KCl CC	$6,94 \times 10^{-5}$	$2,75 \times 10^{-2}$	$2,48 \times 10^{-2}$
SFT + KCl SC	$5,92 \times 10^{-5}$	$3,72 \times 10^{-2}$	$2,44 \times 10^{-2}$
DAP + KCl CC	$2,04 \times 10^{-2}$	$3,22 \times 10^{-2}$	$2,12 \times 10^{-2}$
DAP + KCl SC	$1,72 \times 10^{-2}$	$2,71 \times 10^{-2}$	$2,19 \times 10^{-2}$

Fonte: O Autor, 2013.

\*CC = com calcário; SC = sem calcário.

A atividade de  $\text{HPO}_4^{2-}$  foi maior onde não se aplicou KCl, em ambos os solos. Essa diferença foi de 0,009 mol L<sup>-1</sup> no NV e de 0,09 mol L<sup>-1</sup> no CH (apêndice G). Com relação as diferentes fontes de fosfatos, quando aplicou-se DAP as concentrações de  $\text{HPO}_4^{2-}$  foram

maiores comparados a aplicação de SFT, nos dois solos. O solo tratado com DAP-CC foi o que se destacou no CH com uma concentração de P igual a 0,116 mol L<sup>-1</sup>; no NV destacamos o DAP-SC, na qual atingiu uma concentração igual a 2,64x10<sup>-2</sup> mol L<sup>-1</sup> (Tabela 3.20).

A atividade do íon H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, no NV foi influenciada pela presença de K, pela presença de P, pelas diferentes fontes de fosfatos e pela combinação dos fosfatos com o calcário. No CH, além destes fatores o H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> também foi afetado pela combinação de fontes de P com o KCl (Tabela 3.21).

**Tabela 3.21** - Análise de contrastes em atividades de fósforo (nas formas de HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>) e potássio (na forma de K<sup>+</sup>) da fase líquida do solo entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico.

Tratamentos	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>
----- Cambissolo – mol L <sup>-1</sup> -----			
CC x SC	0,0116*	0,0759 <sup>ns</sup>	0,4019 <sup>ns</sup>
Sem K x Com K	0,0001*	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (todos)	0,0001*	0,0001*	0,4897 <sup>ns</sup>
P x Testemunha	0,0001*	0,0001*	0,0001*
SFT x DAP (com K)	0,0001*	0,0001*	0,3419 <sup>ns</sup>
DAP x SFT (sem K)	0,0001*	0,0973 <sup>ns</sup>	0,9812 <sup>ns</sup>
DAP x SFT (CC)	0,0001*	0,0001*	0,4860 <sup>ns</sup>
DAP x SFT (SC)	0,0001*	0,0001*	0,7787 <sup>ns</sup>
----- Nitossolo – mol L <sup>-1</sup> -----			
CC x SC	0,4888 <sup>ns</sup>	0,5029 <sup>ns</sup>	0,3097 <sup>ns</sup>
Sem K x Com K	0,0150*	0,0001*	0,0001*
DAP x SFT (todos)	0,0001*	0,1777 <sup>ns</sup>	0,0001*
P x Testemunha	0,0001*	0,0001*	0,0001*
SFT x DAP (com K)	0,0001*	0,2068 <sup>ns</sup>	0,0001*
DAP x SFT (sem K)	0,0001*	0,0026*	0,5773 <sup>ns</sup>
DAP x SFT (CC)	0,0001*	0,0007*	0,0001*
DAP x SFT (SC)	0,0001*	0,0841 <sup>ns</sup>	0,0001*

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastess: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%; ns = não significativo.

Com relação ao íon  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , as maiores atividades foram encontradas onde aplicou-se KCl, nos dois solos. As diferenças de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  estimadas entre eles foram iguais a 0,06 mol L<sup>-1</sup> no NV e 0,66 mol L<sup>-1</sup> no CH (apêndice G). A atividade de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  foi influenciada pelas diferentes fontes fosfatadas somente no CH, na qual o SFT apresentou as maiores atividades comparados ao DAP. Neste solo, a atividade de P na forma de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  foi maior no tratamento SFT+KCl-SC, na qual a média obtida foi igual a 0,394 mol L<sup>-1</sup>, no CH (Tabela 3.20).

Com relação à atividade de K em solução, esta foi afetada pela presença de K, pela presença de P, pelos diferentes fertilizantes fosfatados, assim como suas combinações no NV. Porém, no CH a influência da atividade de K foi afetada somente pela presença de K e pela presença de P (Tabela 3.21).

Semelhante ao que ocorre com o K em solução, a sua atividade também aumentou com a adição de fonte potássica ao solo, nos dois solos. A diferença estimada da atividade de K entre os tratamentos com e sem aplicação de K foi igual a 0,14 mol L<sup>-1</sup> no NV e 1,00 mol L<sup>-1</sup> no CH (apêndice F). Isto provavelmente ocorreu porque a alta concentração aplicada no grupo de tratamentos com a fonte potássica, aumentou seus valores na forma trocável comparado ao grupo sem KCl. Esta elevada concentração de K nas regiões adjacentes aos grânulos da fonte potássica demonstra que a atividade iônica dos nutrientes na solução do solo nestes locais é muito diferente daquela que ocorre no restante do solo (ERNANI; BARBER, 1991; ERNANI; BARBER, 1993; ERNANI; BARBER, 1996).

A atividade de K só apresentou diferenças com relação as fontes fosfatadas no NV. O grupo do DAP foi o que promoveu a maior atividade de K, na qual diferiu somente 0,005 mol L<sup>-1</sup> do grupo adubado com SFT (Apêndice F).

Na solução do solo, o P é encontrado nas formas de  $\text{HPO}_4^{2-}$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , no entanto, percebe-se que o primeiro ocorre em maiores proporções em valores de pH acima de 6,0, enquanto o segundo têm ocorrência na faixa mais importante de pH para os solos brasileiros, em torno de 5,0 a 6,0 (RAIJ, 2011). Em nossos resultados podemos observar que, em ambos os solos, onde o pH foi abaixo de 6,0, predominou a forma de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , fato que não foi observado para o íon  $\text{HPO}_4^{2-}$ , pois houve uma variação entre os tratamentos.

Podemos observar também que, no NV, no tratamento DAP-CC, as concentrações efetivas dos íons  $\text{HPO}_4^{2-}$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  foram praticamente iguais, com valores de 0,0206 e 0,0205 mol L<sup>-1</sup>. Isto ocorreu porque neste tratamento a média do valor do pH da solução foi igual a 7,2 e, segundo Ernani (2008), quando o pH do meio for 7,21 o meio terá 50 % de cada forma; abaixo e acima dele, haverá predomínio de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , respectivamente.

A atividade do cátion  $K^+$  foi maior no tratamento onde haviam maiores concentrações de potássio em solução (KCl), e neste caso podemos inferir que a presença de fosfato diminui a atividade deste cátion na solução. Isto pode ser explicado pela alta concentração de fosfato aplicado, que adiciona concomitantemente outros cátions para a solução competindo com o K. Além disso, pode ter ocorrido a formação de precipitados de fosfato de potássio (AKINREMI; CHO, 1993).

### 3.4. Conclusões

1. Independente da presença de calcário e de cloreto de potássio, o DAP promove maior aumento do pH em água, em sal e em solução comparado ao SFT, em ambos os solos;
2. A aplicação de DAP elimina o alumínio trocável, enquanto que o SFT aumenta sua concentração e a de Ca trocável em ambos os solos, e de Mg e K trocáveis somente no NV;
3. A concentração de P no solo varia com o método de extração e com o fertilizante fosfatado: o método Mehlich-1 extrai mais no solo tratado com SFT enquanto que a RTA naquele tratado com DAP;
4. O DAP aumenta a concentração de P em solução no Nitossolo Vermelho comparado ao SFT, enquanto no Cambissolo Húmico ocorre o contrário;
5. A combinação de cloreto de potássio com os fertilizantes fosfatados aumentam a disponibilidade de fósforo na solução do solo e diminuem a concentração de potássio na solução do solo e no solo, e consequentemente diminui sua atividade, sendo este decréscimo de K mais acentuado no solo com menor teor de argila;
6. O DAP proporciona maior incremento na atividade do íon  $HPO_4^{2-}$ , comparado ao fertilizante SFT, em ambos os solos independente da presença de calcário. No entanto, a atividade do íon  $H_2PO_4^-$  aumenta com adição de SFT comparado ao DAP, somente no Cambissolo Húmico.

#### **4. CAPÍTULO III – A APLICAÇÃO LOCALIZADA DE MONOAMÔNIO FOSFATO FAVORECE A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO ASSIM COMO SUA EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO E DE RECUPERAÇÃO**

##### **Resumo**

A baixa disponibilidade de fósforo encontrada em solos ácidos requer a adição de adubos fosfatados para obtenção de rendimentos vegetais satisfatórios. A aplicação localizada de P pode ser uma solução para o melhor aproveitamento deste nutriente, porém pouco se sabe sobre a eficiência de diferentes fertilizantes fosfatados no aproveitamento do P quando aplicado desta forma. Este trabalho objetivou avaliar a absorção de P e demais nutrientes pelas plântulas de milho em função da aplicação localizada de fosfatos de cálcio e de amônio, em um solo catarinense. O trabalho foi realizado em 2011, com amostra de um Cambissolo Húmico (CH). Os tratamentos consistiram da aplicação de superfosfato triplo (SFT), superfosfato simples (SS), diamônio fosfato (DAP) e monoamônio fosfato (MAP), além de uma testemunha sem a adição de P. As unidades experimentais foram constituídas por colunas de PVC com 10,0 cm de diâmetro e 12,0 cm de comprimento, preenchidas com 1,10 kg de solo (base seca). Elas foram montadas pela justaposição de anéis concêntricos com 1 e 2 cm de espessura vertical. Em todos os tratamentos com P adicionou-se 200 mg kg<sup>-1</sup> de P e 100 mg kg<sup>-1</sup> de K, na forma de KCl; a quantidade de N adicionada pelo DAP (160 mg kg<sup>-1</sup>) foi ajustada em todos os demais tratamentos pela adição de nitrato de cálcio. Os grânulos dos fertilizantes tinham diâmetro entre 0,5 e 2,0 mm, sendo que o CaNO<sub>3</sub> e o KCl foram aplicados uniformemente em todo o solo da coluna, os demais fertilizantes fosfatados foram aplicados somente na espessura do terceiro anel, ou seja, na terceira camada superior da coluna (2 a 3 cm de profundidade). As plantas de milho foram cultivadas por um período de 20 dias e ao final do experimento colheu-se a parte aérea e as raízes, além de uma amostra de solo. A produção de MSPA foi maior nos tratamentos com SFT, SS e MAP, nas quais os incrementos foram respectivamente 71, 67 e 62% maiores que a testemunha; enquanto com o DAP o incremento foi de somente 38%. Os teores de P na parte aérea e nas raízes foram maiores no solo tratado com MAP, nas quais atingiram valores máximos de 2,8 e 5,6 mg/vaso, respectivamente. Com relação as concentrações de P no solo, os maiores valores foram obtidos nos tratamentos SFT, MAP e DAP, cujo a média foi 93% superior comparado com a testemunha. A disponibilidade de P no solo e sua absorção são aumentadas pela aplicação localizada de MAP; por outro lado, a aplicação localizada de DAP inibe o crescimento de raízes. A produção de MSPA é favorecida pela aplicação localizada de SFT, SS e MAP.

**Palavras-chave:** Fontes de fósforo. liberação de nutrientes. localização do fertilizante. milho.

##### **4.1 Introdução**

O milho em termos de cultivo e consumo é um dos cereais mais importantes no mundo, com projeções de produção e consumo nacional em 2012/13 de, aproximadamente, 60

e 50 mil toneladas, respectivamente (MAPA, 2013). Assim como a maioria dos cereais, esta cultura apresenta altas produtividades quando aplicadas quantidades suficientes de fósforo em solos com deficiência nutricional deste nutriente. Isto ocorre porque o milho necessita de P para a formação e desenvolvimento de seus grãos e espigas e sua falta pode limitar a produtividade (WERZEL et al., 1979; LUCENA et al., 2000).

A elevada acidez e a baixa disponibilidade de fósforo encontradas nos solos da região Sul do país requerem a adição de corretivo de acidez e de fontes fosfatadas para obtenção de melhores rendimentos vegetais. Porém, a eficácia do fósforo adicionado ao solo varia de acordo com o tipo de fertilizante fosfatado (ERNANI; BARBER, 1990; 1991; CORRÊA et al., 2008), com o método de aplicação (MUZILLI, 1983; ANGHINONI, 1992; ERNANI et al., 2001; MOTOMIYA et al., 2004), e com a quantidade aplicada (ANGHINONI, 1992; ERNANI et al., 2000; RESENDE et al., 2006), além de características de solo, como o pH (ERNANI et al., 1996; VIÉGAS et al., 2010), a umidade (COX; BARBER, 1992; RANNO et al., 2007), o teor de argila (COX, 1994; HUFFMAN et al., 1996; VALLADARES et al., 2003), o teor de Ca (AKINREMI; CHO, 1991) e as formas de Fe (HERNÁNDEZ; MEURER, 1998; ALMEIDA et al., 2003).

No que diz respeito ao método de aplicação, entretanto, em algumas ocasiões, mesmo com a baixa mobilidade do P no solo, o método de aplicação do fertilizante fosfatado ao solo (superficial ou incorporado), não apresenta alterações na absorção de P e no rendimento das culturas (MUZILLI, 1983; KLEPKER; ANGHINONI, 1996). Isto nos leva a crer que, a eficácia do P adicionado sobre a superfície poderá estar, provavelmente, relacionada com a maior disponibilidade de P na solução do solo nesta região, resultante da redução do contato do fertilizante com o solo e, consequentemente, do aumento da saturação dos sítios de adsorção.

Com isso, podemos inferir que a aplicação localizada de fósforo, diminui o volume de solo fertilizado com o qual as raízes entram em contato, podendo prejudicar a absorção do nutriente (ZHANG; BARBER, 1992), especialmente em períodos de déficit hídrico. Alguns autores relatam que à medida que aumenta o contato fertilizante-solo, deve-se aumentar a dose de fósforo a ser aplicada (ANGHINONI; BARBER, 1980; SOUZA; LOBATO, 2004). Barber (1995) relatou ainda que a aplicação localizada dos fertilizantes fosfatados na cultura do milho promove maior desenvolvimento radicular nestas regiões, e que a quantidade aplicada ao solo, assim como seu nível inicial influenciam no grau de proliferação deste sistema.

Em sistema de plantio direto, por exemplo, há maior eficiência de aproveitamento do fósforo pelas plantas, sendo atribuído ao menor contato entre fertilizante e partículas do solo, promovido pela ausência de revolvimento, além da presença de resíduos vegetais sob a superfície do solo que favorece a retenção de umidade e a taxa de difusão do fósforo até as raízes. Ademais, o aumento da atividade biológica decorrente do maior teor de matéria orgânica, pode favorecer a mineralização do fósforo da fração orgânica do solo, podendo se constituir em importante fonte de fósforo às plantas (COELHO; ALVES, 2003).

Com relação às fontes solúveis, os fertilizantes fosfatados diferem entre si, principalmente na sua composição química, na sua solubilidade e em seu cátion acompanhante. Estas podem influenciar a taxa de solubilização dos fosfatos e as suas reações, especialmente de precipitação e adsorção química de fósforo nas regiões próximas aos grânulos ou partículas de fosfato, cuja intensidade é alta. Isto irá refletir na concentração de P na solução do solo e poderá influenciar a eficiência de utilização deste nutriente pelas plantas e, consequentemente o seu rendimento (ERNANI; BARBER, 1991; COUTINHO et al., 1991, PRADO et al., 2001).

Assim sendo, após serem solubilizados no solo, as reações que ocorrem, incluindo adsorção específica, precipitação e alterações no pH, variam significativamente entre eles. Os fosfatos de cálcio (FIGUEIREDO, 1985; ERNANI et al., 2002; MANTOVANI et al., 2007) e o monoamônio fosfato podem diminuir drasticamente o pH (ERNANI et al., 2002), e com isto aumentar a adsorção de P e formação de precipitados com Fe e Al (FIGUEIREDO, 1985); e também por ser um fosfato de cálcio pode originar precipitados de fósforo com cálcio (AKINREMI; CHO, 1991). Por outro lado, o diamônio fosfato pode elevar o pH nas adjacências dos grânulos (ERNANI; BARBER, 1991; ERNANI et al., 2002), e com isto diminuir a adsorção química de P (ERNANI; BARBER, 1990; ERNANI et al., 1996), a formação de precipitados do P com Fe e Al (ERNANI; BARBER, 1991) e a atividade do Al (ERNANI; BARBER, 1991).

No entanto, a aplicação de fertilizantes ao solo, normalmente é realizada próximo das plantas ou das sementes, a fim de facilitar o processo de contato com as raízes. Como foi comentado anteriormente, logo após a aplicação os fertilizantes são solubilizados, promovendo grandes alterações na composição química dessas microrregiões, uma vez que os grânulos entram em contato com pequeno volume de solo. Após, seus íons migram dessas microrregiões para suas adjacências, que no exemplo do fósforo ocorre por difusão em proporções que dependem do elemento químico. É dessas regiões ou de suas proximidades, que as raízes absorvem os nutrientes aplicados, entretanto, são raros os trabalhos visando à

aplicação localizada de diferentes fontes fosfatadas. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a absorção de P e demais nutrientes pelas plântulas de milho sob efeito da aplicação localizada de diferentes fertilizantes fosfatados.

#### 4.2 Material e Métodos

O experimento foi realizado em casa de vegetação, na faculdade de Agronomia da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, SC, em 2011. Utilizou-se amostra de um Cambissolo Húmico (CH), coletada na profundidade de 0-20 cm. Posteriormente à coleta, o solo foi passado em peneira com abertura de malha de 0,4 cm. As unidades experimentais foram constituídas por colunas de PVC (semelhante à figura 2.1) com 10,0 cm de diâmetro e 12,0 cm de comprimento, preenchidas com 1,10 kg de solo (base seca). Cada unidade experimental foi constituída pela justaposição de anéis concêntricos, sendo um com 2,0 cm de espessura, localizado na extremidade superior, seguido de cinco outros com 1,0 cm de espessura cada e de um último com 5,0 cm de espessura, localizado na extremidade inferior. A classificação e algumas características químicas do mesmo são apresentadas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Características químicas de um Cambissolo Húmico do estado de Santa Catarina utilizado no estudo<sup>(1)</sup>. Média de três repetições.

Características	Cambissolo Húmico
pH em água	4,5
Matéria orgânica (%)	5,0
Argila (%)	40,0
P (mg dm <sup>-3</sup> )	7,3
K (mg dm <sup>-3</sup> )	182,0
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,4
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,8
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,5
CTC efetiva (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,2
CTC pH 7,0 (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	30,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,0
CMAP (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>(2)</sup>	831,0
CMEP (RTA) (mg dm <sup>-3</sup> )	800,0

Fonte: O Autor, 2013.

<sup>(1)</sup>Avaliações analíticas foram realizadas com metodologias descritas por Tedesco et al. (1995).

<sup>(2)</sup>CMAP = capacidade de adsorção máxima de fósforo; CMEP=capacidade de extração máxima de fósforo pela resina trocadora de ânions.

Os tratamentos consistiram da adição de superfosfato triplo (SFT), superfosfato simples (SS), diamônio fosfato (DAP) e monoamônio fosfato (MAP), todos na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> de P, além de uma testemunha sem a adição de P. Em todos os tratamentos com P adicionou-se 100 mg kg<sup>-1</sup> de K, na forma de KCl; a quantidade de N adicionada pelo DAP (160 mg kg<sup>-1</sup>) foi ajustada em todos os demais tratamentos pela adição de nitrato de cálcio.

Antes da aplicação dos tratamentos, a acidez dos solos foi corrigida pela adição de calcário dolomítico para elevar o pH a 6,0. O corretivo de acidez foi aplicado 15 dias antes da montagem do experimento. As quantidades dos fertilizantes aplicadas nos tratamentos foram as seguintes (apêndice H):

Testemunha (T): 0,2 g de KCl e 1,6 g de CaNO<sub>3</sub>;

Superfosfato triplo (SFT): 1,09; 0,2 e 1,6 g de SFT, KCl e CaNO<sub>3</sub>, respectivamente;

Superfosfato simples (SS): 2,53; 0,2 e 1,6 g de SS, KCl e CaNO<sub>3</sub>, respectivamente;

Diamônio fosfato (DAP): 1,0 e 0,2 g de DAP e KCl, respectivamente;

Monoamônio fosfato (MAP): 0,95 g de MAP, 0,2 g de KCl e 0,75 g de CaNO<sub>3</sub>.

Os grânulos de cada fertilizante (SFT, SS, DAP, MAP e KCl) tinham diâmetro entre 0,50 e 2,0 mm. O CaNO<sub>3</sub> e o KCl foram distribuídos uniformemente em todo o solo da coluna, e os fertilizantes fosfatados foram aplicados somente no solo que compreendeu a espessura do terceiro anel, ou seja, na camada 2-3 cm da coluna.

Os solos de cada unidade experimental foram umedecidos até a capacidade de campo antes de serem colocados nas colunas, cuja umidade foi reposta diariamente ao longo de todo o período experimental. Cultivaram-se três plantas de milho (Codetec 35) por unidade experimental, durante 20 dias após a emergência. Ao final do período experimental colheu-se a parte aérea e separaram-se as raízes do solo por meio de peneiras e lavagem em água corrente. Logo após, estes materiais foram colocados em sacos de papel e armazenados em estufa a 65°C até atingir peso constante. Após a secagem foram determinadas a massa seca de parte aérea (MSPA) e de raízes (MSR), realizando-se na sequência a moagem das amostras para efetivação do processo de digestão para análise nutricional. Após a colheita, o solo de todas as camadas da coluna foi homogeneizado e amostrado, acondicionados em estufa a 65°C por 48h, posteriormente foi armazenado para ser utilizado nas determinações químicas.

Nas plantas de milho, além da massa seca da parte aérea e de raiz foram determinadas a concentração de P no tecido e raízes. No tecido vegetal, nas raízes e no solo foram determinados os valores de Ca, Mg, K e P, de acordo com metodologia proposta por TEDESCO et al. (1995). Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os resultados obtidos foram avaliados estatisticamente por meio de análise da variância utilizando-se o teste de Tukey ( $P < 0,05$ ).

#### 4.3 Resultados e Discussão

##### Efeitos na planta

###### *Efeito na MSPA*

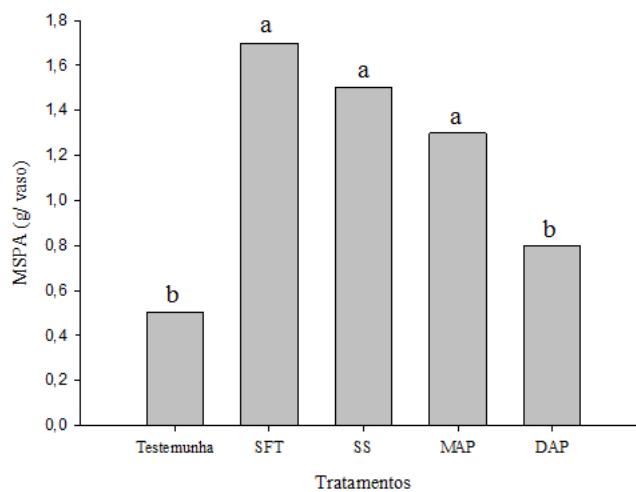
A produção de MSPA diferiu entre os fosfatos (Figura 4.1). Os maiores rendimentos foram obtidos nos tratamentos que receberam SFT, SS e MAP. A aplicação de DAP não proporcionou aumento no rendimento de MSPA. Na testemunha a produção de MSPA foi igual a 0,5 g/vaso, aumentando para 0,9 g/vaso no solo tratado com DAP e para 1,3; 1,5 e 1,7 g/vaso nos que receberam MAP, SS e SFT, respectivamente. A diferença entre as médias dos maiores tratamentos e a testemunha foi de 66,7%.

A resposta do milho à adubação fosfatada provavelmente ocorreu devido à elevada necessidade de P requerida por esta cultura para o seu crescimento inicial. Neste caso, os

resultados indicam que as fontes solúveis promoveram uma liberação rápida do nutriente e proporcionaram maior incremento na quantidade de MSPA comparado ao tratamento sem adubo. Este resultado também foi observado em um estudo com plantas de milho, onde altos rendimentos foram atingidos no primeiro cultivo, quando utilizou-se fosfato solúvel no plantio (KAMINSKI; PERUZZO, 1997).

A menor produção de MSPA observada no solo tratado com DAP se deve, provavelmente, ao efeito tóxico promovido pelo DAP, pois ele possui  $\text{NH}_4^+$  em sua composição comparado aos demais tratamentos, nos quais o N foi adicionado principalmente na forma de nitrato de cálcio. Além disto, o DAP possui maior índice salino dentre as fontes fosfatadas aplicadas, fator que promoveu uma desidratação na planta e prejudicou a produção de raízes e, consequentemente, a produção de MSPA (TISDALE, et al., 1985; NOVAIS et al, 2007). Alguns autores relatam que a adubação localizada de fósforo proporciona efeitos negativos sobre a produtividade, o que pode ser atribuído à salinidade, na qual afetariam a germinação de sementes e o crescimento de raízes (PERYEÀ, 1990). BARRETO; FERNANDES (2002) verificaram que plantas de milho adubadas com SFT a lanço obtiveram produtividades maiores comparadas com adubações realizadas no sulco de plantio, na qual ele atribuiu essa diferença entre as produtividades à possível salinidade ou toxidez pela aplicação localizada da fonte de P.

**Figura 4.1** - Quantidades de massa seca da parte aérea (MSPA) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.



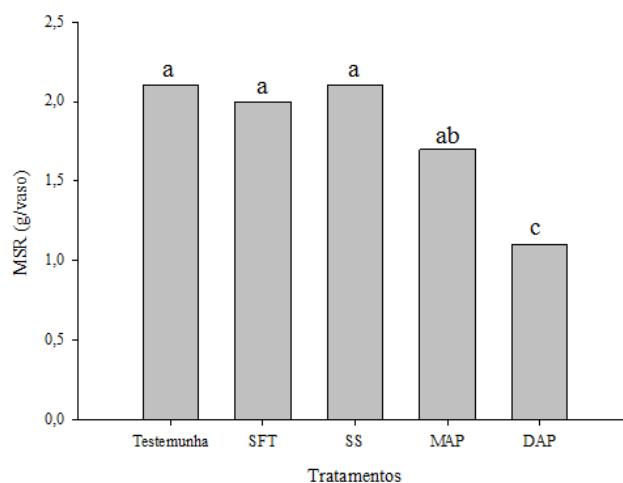
Fonte: O Autor, 2013.

### *Efeito na MSR*

Os tratamentos diferiram a produção de massa seca de raiz (Figura 4.2). As maiores quantidades de MSR foram encontradas nos tratamentos com SS, T e SFT. A aplicação de MAP promoveu um incremento semelhante a estes tratamentos. Por outro lado, o solo tratado com DAP não proporcionou aumento no rendimento. A produção de MSR nos solos tratados com SS, T e SFT foram iguais a 2,1; 2,1 e 2,0 g/vaso, respectivamente; no MAP ela atingiu 1,7 g/vaso. No tratamento com DAP a produção foi de 1,1g/vaso. A diferença entre a média dos tratamentos com maior produção de MSR (SS, SFT e T) e o tratamento com menor produção (DAP) foi de 47%.

A maior produção de massa de raiz observada na testemunha pode ser devida à distribuição da energia de assimilação dos produtos da fotossíntese, que são direcionados para a formação e desenvolvimento do sistema radicular quando a concentração do nutriente é baixa, visando aumentar a sua área de absorção. Quando ocorre de alguns nutrientes encontrarem-se limitando o crescimento das plantas, especialmente P e N, as raízes tornam-se os drenos preferenciais de fotoassimilados (CLARKSON, 1985; ALVES et al., 1988; FÖHSE et al., 1988), o que pode ser uma estratégia de adaptação desenvolvida para aumentar a eficiência de absorção quando há limitação de P (FÖHSE et al., 1988; HORST et al., 1993).

**Figura 4.2** - Quantidades de massa seca da raiz (MSR) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.



Fonte: O Autor, 2013.

A capacidade do DAP em não promover incremento na produção de matéria seca de raiz no milho relativamente aos demais fosfatos provavelmente está relacionada com a presença de fosfato de amônio deste fertilizante criando uma barreira tóxica que pode ter inibido o crescimento e o desenvolvimento das raízes comparado aos demais tratamentos que receberam nitrato de cálcio como fonte de N. Além disso, o DAP é o que possui maior índice salino (34% comparado ao nitrato de sódio que tem 100%), o que pode promover uma desidratação na planta e prejudicar a produção de raízes e, em consequência diminuir a absorção de nutrientes (TISDALE et al., 1985; NOVAIS et al., 2007).

#### *Efeito no P da parte aérea e da raiz*

Os teores de P na parte aérea variaram com os tratamentos avaliados (Figura 4.3 A). Todos os tratamentos proporcionaram aumento nos teores de P na parte aérea, na qual destaca-se o MAP com maior incremento. O teor de P no tratamento testemunha foi igual a 0,3 mg/vaso. Nos solos tratados com DAP, SS e SFT eles atingiram 1,6; 2,0 e 2,3 mg/vaso, respectivamente. O tratamento com MAP foi 89% maior que a testemunha.

Com relação aos maiores valores no MAP podemos inferir que o mesmo age no solo alterando o pH ao redor de seus grânulos de maneira semelhante ao SFT, ou seja, nos períodos subsequentes a sua aplicação ao solo ele diminui o pH devido ao consumo de H<sup>+</sup> pela transformação de parte das moléculas de HPO<sub>4</sub><sup>-2</sup> em H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, em função do equilíbrio existente entre essas duas formas. Isto favorece a dissolução de fosfatos que estejam ligados ao Ca, podendo aumentar assim a disponibilidade de P (ERNANI, 2008). No entanto, não encontraram-se muitos trabalhos na literatura relatando a utilização do MAP.

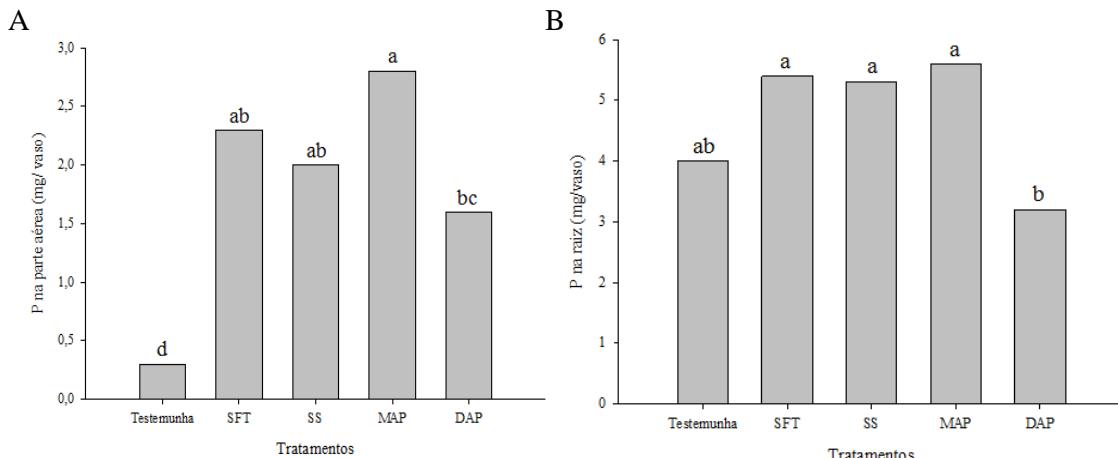
Vale salientar que nem sempre a eficiência de absorção de nutrientes pela planta depende somente do tipo de fertilizante utilizado. O tipo de híbrido utilizado também pode influenciar esta absorção, assim como os seus valores nutricionais de reserva, nas quais estudos mostraram a existência de diferenças geneticamente controladas no acúmulo de P por híbridos de milho (MACHADO et al., 1999). Todas as fontes aplicadas promoveram um acréscimo nos teores de P na parte aérea, na qual ficaram dentro da faixa de suficiência para esta cultura que é de 1,0 a 1,5 g kg<sup>-1</sup> (MALAVOLTA, 1987; LOPES; COELHO, 1988; RAIJ et al., 1997; FURLANI, 2004).

Os teores de P nas raízes das plântulas de milho variaram com os tratamentos (Figura 4.3 B). A aplicação de MAP, SFT e SS proporcionou aumentos do teor de P nas raízes, enquanto o DAP não o afetou. Nos solos tratados com MAP, SFT e SS os teores de P foram

semelhantes entre si e variaram entre 5,3 e 5,6 mg/vaso; já o DAP apresentou valor igual a 3,2 mg/vaso. No entanto, na testemunha o teor foi intermediário igual a 4,0 mg/vaso.

O tratamento com MAP apresentou efeito semelhante ao SFT e ao SS; no entanto, observou-se que o efeito do DAP foi semelhante à testemunha. Isto nos leva a acreditar que o DAP favoreceu uma maior precipitação do P (na forma de fosfatos de Ca) ao redor de seus grânulos comparado aos demais tratamentos e com isto diminuiu a sua disponibilidade e absorção. Além disso, o DAP é uma fonte de fosfatos de amônio e este pode ter sido tóxico para a planta, tendo em vista que a aplicação desta fonte foi realizada localizadamente próxima à semente. Além disso, a fonte de P possui maior índice salino (34% comparado ao nitrato de sódio que tem 100%) dentre os fertilizantes utilizados, fato que pode promover uma desidratação na planta e prejudicar a produção de raízes e, em consequência diminuir a absorção de nutrientes (TISDALE, et al., 1985; NOVAIS et al., 2007).

**Figura 4.3** - Teores de fósforo na parte aérea (A) e na raiz (B) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.



Fonte: O Autor, 2013.

#### *Efeito no Ca da parte aérea e da raiz*

Os teores de Ca na parte aérea foram afetados pelos diferentes tratamentos (Figura 4.4 A). O maior teor de Ca foi encontrado no SS. A testemunha e o SFT obtiveram teores iguais entre si; enquanto o MAP e DAP não promoveram aumentos nos teores de Ca na parte aérea. O cálcio presente no tecido atingiu 0,9% quando tratado com SS. Na testemunha e SFT seus teores foram iguais a 0,8% em ambos, e no MAP 0,7%. O DAP apresentou 0,6% de cálcio na parte aérea. Os maiores teores de Ca na parte aérea proporcionados pelas fontes de fosfato de

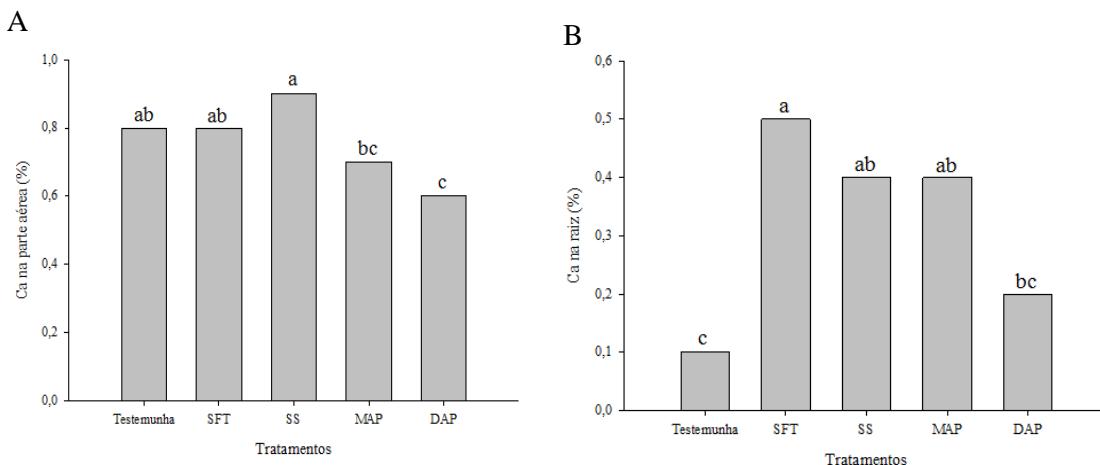
cálcio se deve à presença deste nutriente na fórmula do superfosfato simples e superfosfato triplo, que apresentam aproximadamente 18% e 15% de Ca, respectivamente (apêndice H). No entanto, pode-se observar que os valores não variaram muito comparados à testemunha, o que pode ser explicado pelo pouco tempo de cultivo (20 dias).

Comparando os resultados dos teores de Ca obtidos com a literatura, os valores encontrados em todos os tratamentos estão dentro da faixa de suficiência que é de 0,2 a 0,8% para a cultura do milho (MALAVOLTA, 1987; LOPES; COELHO, 1988; RAIJ et al., 1997; FURLANI, 2004). Vale ressaltar que estes valores são com base em coletas após o florescimento e, em nosso estudo a parte aérea foi coletada antes deste período.

Todos os tratamentos promoveram aumentos nos teores de Ca nas raízes das plantas de milho (Figura 4.4 B). O maior incremento foi proporcionado no SFT na qual atingiu 0,5% de Ca. Entretanto, a variação nos demais tratamentos foi pequena de 0,2 a 0,4%. A testemunha apresentou um teor igual a 0,1%. Podemos observar que houve diferença estatística entre eles, porém os resultados foram muito próximos nas diferentes fontes.

Os maiores teores de Ca obtidos nas plantas que receberam SFT pode ser influência da presença deste nutriente na sua composição que proporciona maiores concentrações de cálcio em solução e, consequentemente, maior absorção. MANTOVANI et al. (2007) observaram que a aplicação combinada de nitrato de cálcio com SFT aumentou a lixiviação de cálcio em um Nitossolo Vermelho.

**Figura 4.4** - Teores de cálcio na parte aérea (A) e na raiz (B) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.



Fonte: O Autor, 2013.

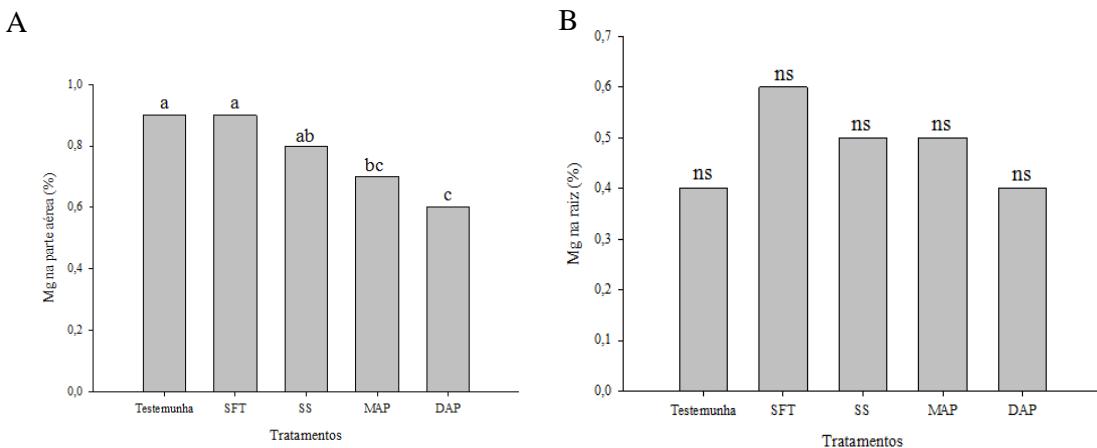
### *Efeito no Mg da parte aérea*

Os teores de Mg na parte aérea variaram entre os tratamentos (Figura 4.5 A). A testemunha e o SFT apresentaram teores iguais de Mg na parte aérea; no SS, o resultado foi significativamente menor, porém semelhante à testemunha e ao SFT. Por outro lado, o MAP, o DAP não influenciou o valor deste nutriente na planta. Os solos testemunha e tratados com SFT apresentaram os maiores teores de Mg no tecido com o valor igual a 0,9%, para ambos. O DAP apresentou o menor valor de Mg no tecido entre todos os tratamentos avaliados, sendo este igual a 0,6%. Nos tratamentos com SS e MAP os teores variaram entre 0,7 e 0,8%.

As fontes de P não influenciaram os teores de Mg na parte aérea, sendo sua maior absorção no tratamento testemunha, possivelmente porque as quantidades de Mg presentes no solo antes da aplicação dos tratamentos (Tabela 4.1) eram suficientes para suprir a necessidade deste nutriente para as plantas. Além disso, no tratamento testemunha foi aplicado o nitrato de cálcio, na qual foi distribuído no solo que preencheu toda a coluna, e este possuía na sua composição química aproximadamente 18% de cálcio (apêndice H), favorecendo assim sua absorção. Segundo alguns autores, os teores de Mg nas plantas de milho na faixa de suficiência variam de 0,2 a 0,5% (MALAVOLTA, 1987; LOPES; COELHO, 1988; RAIJ et al., 1997; FURLANI, 2004), e estes valores foram alcançados pelos teores obtidos em nosso estudo, em todos os tratamentos.

Nenhum dos tratamentos afetou os teores de Mg presentes nas raízes, na qual obteve uma média entre os tratamentos igual a 0,5% (Figura 4.5 B). Isto nos leva a crer que o valores de Mg no Cambissolo Húmico estavam suficientes, permitindo uma boa absorção por parte da planta, visto que os teores dele na parte aérea estão dentro dos níveis de suficiência para esta cultura.

**Figura 4.5** - Teores de magnésio na parte aérea (A) e na raiz (B) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.



Fonte: O Autor, 2013.

#### Efeito no K da parte aérea

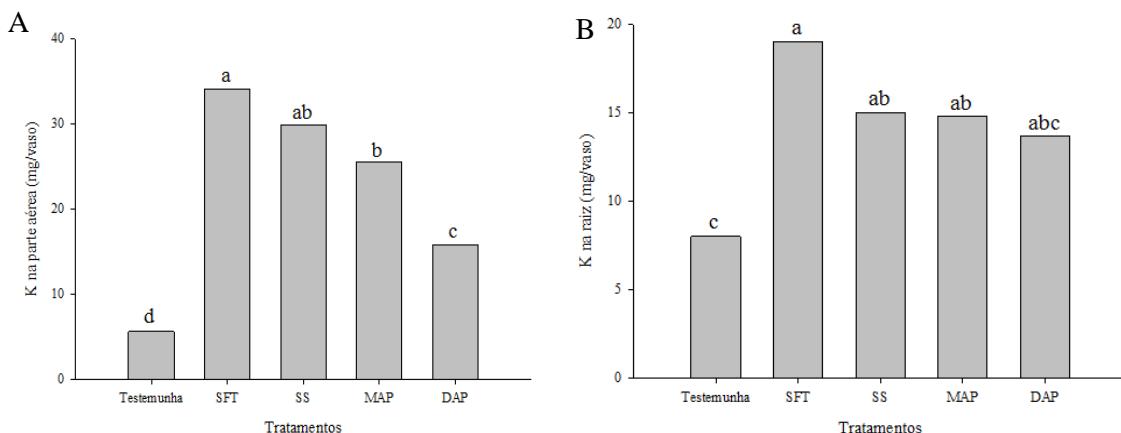
Todos os tratamentos aumentaram os teores de K da parte aérea (Figura 4.6 A). O maior teor de K foi obtido no tratamento com SFT, seguido na ordem decrescente dos teores de K os tratamentos com SS, MAP e DAP. O SFT apresentou 34 mg/vaso de K, diminuindo para 29,8; 25,5 e 15,8 mg/vaso nos que receberam SS, MAP e DAP, respectivamente. A diferença entre o SFT e a testemunha foi de 84%.

A maior absorção de K pela planta correspondente ao tratamento com SFT e seguido do SS pode ser explicado pela presença do Ca nestas fontes, que provavelmente deslocou o K das cargas do solo e consequentemente o disponibilizou na solução para então ser absorvido pelas raízes (ERNANI, 2008).

Os teores suficientes de K no tecido vegetal para a cultura do milho variam de 1,0 a 3,0%; plantas com deficiência geralmente apresentam teores foliares menores que 0,8% (MALAVOLTA, 1987; LOPES; COELHO, 1988; RAIJ et al., 1997; FURLANI, 2004). No presente trabalho, todos os tratamentos apresentaram teores de K superiores a 1,8%.

O comportamento do potássio na raiz foi semelhante ao que ocorreu na parte aérea, na qual todos os tratamentos promoveram incremento nos teores de K (Figura 4.6 B). O maior teor deste nutriente na raiz foi obtido no solo tratado com SFT e o menor naquele com DAP. Os valores de K nas raízes para os solos tratados com SFT, SS, MAP e DAP foram, respectivamente, 19,0; 15,0; 14,8 e 13,7 mg/vaso. A diferença entre o SFT e a testemunha foi de aproximadamente 58%.

**Figura 4.6** - Teores de potássio na parte aérea (A) e na raiz (B) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.



Fonte: O Autor, 2013.

Os maiores teores de K nas raízes das plantas de milho obtidos no SFT pode ser explicado pelo que foi mencionado, anteriormente na parte aérea, pois o comportamento do K foi semelhante nestas duas partes da planta.

Cabe salientar, que em nosso estudo, todos os fosfatos utilizados demonstraram satisfazer as necessidades desta cultura com relação aos teores presentes no tecido vegetal.

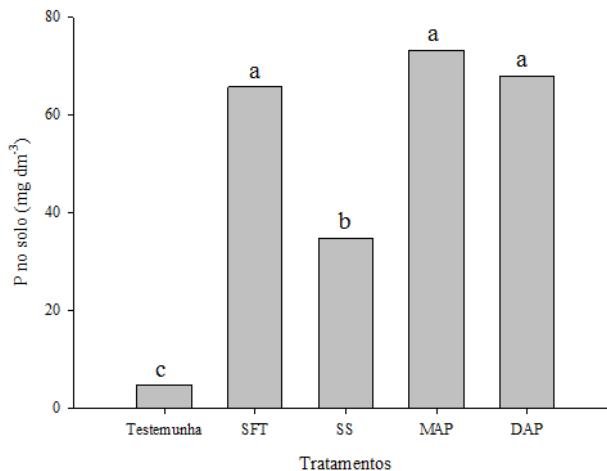
#### Efeitos no solo:

##### *Efeito no P*

As concentrações de P no solo aumentaram em todos os tratamentos (Figura 4.7). O MAP, o DAP e o SFT foram os tratamentos que proporcionaram as maiores concentrações de P no solo, com valores respectivamente iguais a 73; 68 e 66 mg dm<sup>-3</sup>. O tratamento com SS apresentou concentração inferior aos anteriores, com valor igual a 35 mg dm<sup>-3</sup>. A diferença entre a testemunha e os tratamentos com MAP, DAP e SFT foi em média de 93%.

Exceto no tratamento testemunha, as quantidades de fósforo presentes nos solos após o cultivo de milho, com relação ao fósforo aplicado no início do experimento variaram de 35 a 73 mg dm<sup>-3</sup>. Estes valores de P equivaleram a 17,3 e 36,6% do P aplicado.

**Figura 4.7** - Concentrações de fósforo no solo (P no solo) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.



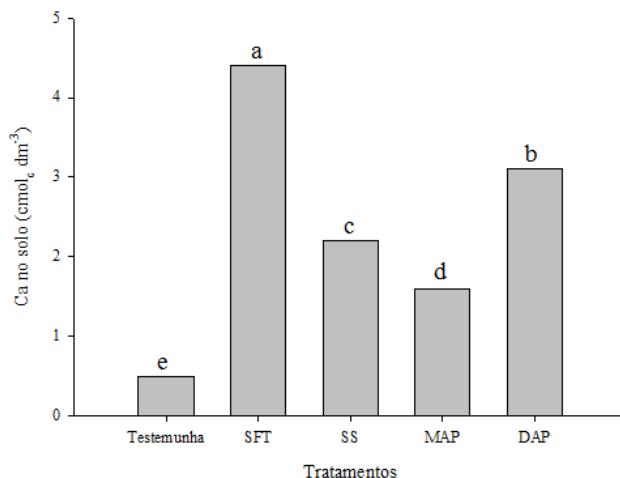
Fonte: O Autor, 2013.

Isto nos permite inferir que a dose aplicada ao solo, pouco foi aproveitada pela cultura, fato que ocorre, geralmente em nossos solos logo após a aplicação do fertilizante fosfatado, na qual a maior parte do P aplicado pode ser adsorvido especificamente por óxidos de ferro, alumínio e manganês, nas arestas das argilas silicatadas e nos aluminossilicatos amorfos, além de ter a possibilidade de formar precipitados. Segundo PARFITT (1989), a adsorção de fósforo ocorre em três estádios e na forma binucleada, conforme o tempo de reação: no primeiro, a reação dá-se rápida e fortemente em sítios muito reativos, onde silicatos, OH<sup>-</sup> e OH<sub>2</sub><sup>+</sup>, são trocados por fosfato; no segundo, ele é adsorvido em sítios menos reativos e, no terceiro, em longo prazo, migra via porosidade para os lóbulos internos dos cristais, podendo, também, ser considerado como precipitação.

#### *Efeito no Ca*

As concentrações de Ca no solo apresentaram diferenças entre os tratamentos avaliados (Figura 4.8). O tratamento com SFT foi o que promoveu maior incremento na concentração de Ca no solo, seguido do solo tratado com DAP que diferiu também do SS, o que recebeu MAP foi o que apresentou a menor concentração de Ca, porém foram semelhantes entre si. Os valores encontrados para SFT, DAP, SS e MAP foram respectivamente 4,4; 3,1; 2,2 e 1,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. O SFT apresentou uma concentração de Ca 89% maior que na testemunha.

**Figura 4.8** - Concentrações de cálcio no solo (Ca no solo) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.



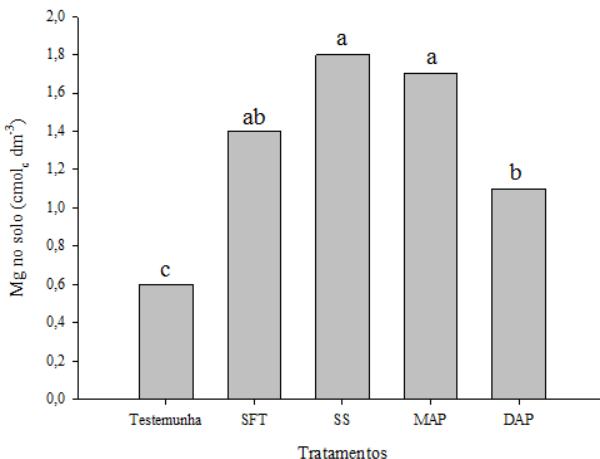
Fonte: O Autor, 2013.

A maior liberação de Ca para o solo encontrado nos tratamentos com SFT e SS provavelmente ocorreu pela presença deste nutriente na formulação destes fertilizantes (apêndice H), o que promove um incremento tanto dos seus valores no solo, quanto na planta. Por outro lado, o DAP apresentou concentrações altas deste nutriente no solo, provavelmente porque a planta não conseguiu absorver, em consequência da barreira de fosfato de amônio criada por este fertilizante, na qual impediu o crescimento e desenvolvimento das raízes e consequentemente menor absorção de Ca (Figura 4.8).

#### *Efeito no Mg*

Todos os tratamentos avaliados aumentaram as concentrações de Mg no solo (Figura 4.9). As maiores concentrações de Mg foram observadas nos tratamentos com SS e MAP, sendo seus valores iguais a  $1,8$  e  $1,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente. Não tão diferente encontrou-se o solo tratado com SFT, com valor igual a  $1,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . O DAP assemelhou-se ao SFT, com a concentração de Mg no solo igual a  $1,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Os tratamentos com SS e MAP foram respectivamente 67 e 65% maiores que a testemunha.

**Figura 4.9** - Concentrações de magnésio no solo (Mg no solo) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.



Fonte: O Autor, 2013.

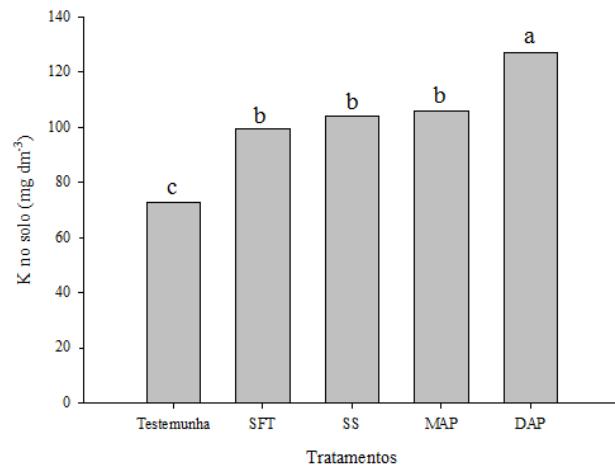
As maiores concentrações de Mg obtidas nos tratamentos com SS e MAP se devem principalmente porque o Ca e o  $\text{NH}_4^+$  respectivamente presentes no SS e MAP estarem em maiores quantidades no solo e podem ter aumentado a disponibilidade do Mg através do deslocamento deles para a solução.

O DAP foi a fonte fosfatada que apresentou a menor concentração de Mg no solo, e isto provavelmente ocorreu pela formação de precipitados de fosfatos de magnésio. A presença dos elementos P e Mg (1,6% de Mg no DAP, apêndice H), aliado ao pH elevado nas regiões próximas aos grânulos proporcionado pela adição de DAP ao solo, favorece a formação de fosfatos de Mg.

#### *Efeito no K*

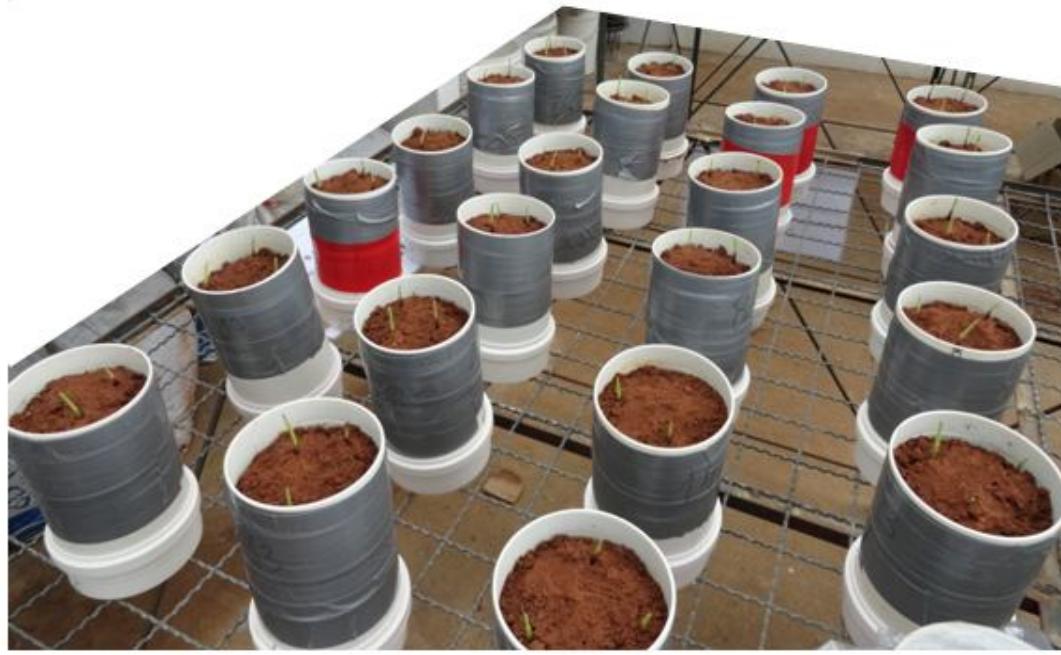
Os tratamentos avaliados promoveram diferenças nas concentrações de K no solo (Figura 4.10). Todos os tratamentos aplicados aumentaram os valores de K no solo, sendo a sua maior concentração obtida no tratamento com DAP, na qual atingiu  $127 \text{ mg dm}^{-3}$ . O MAP, SS e SFT apresentaram concentrações de K no solo iguais a 106; 104 e  $99\% \text{ mg dm}^{-3}$ , respectivamente. A testemunha obteve uma concentração igual a  $72 \text{ mg dm}^{-3}$  e foi 76% menor que o DAP. Os maiores valores de K no solo obtidos pelo DAP podem ter ocorrido porque foi neste tratamento que as plantas absorveram as menores concentrações de K, o que pode ter favorecido a sua maior permanência no solo.

**Figura 4.10** - Concentrações de potássio no solo (K no solo) de plântulas de milho cultivadas por 20 dias em função da adição de adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP e monoamônio fosfato, MAP) em um Cambissolo Húmico. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.



Fonte: O Autor, 2013.

**Figura 4.11** – Experimento com milho, plântulas com seis dias.



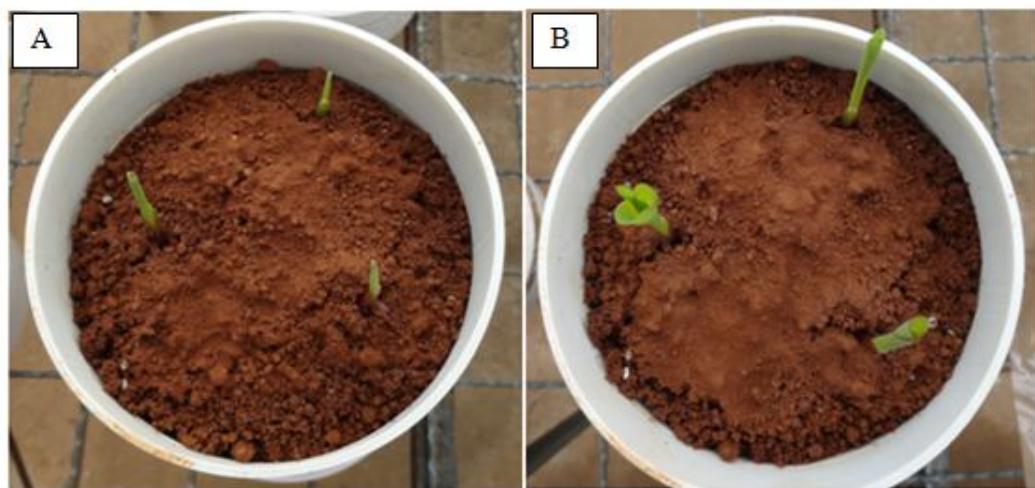
Fonte: O Autor, 2013.

**Figura 4.12** – Experimento com milho, plântulas com dezesseis dias.



Fonte: O Autor, 2013.

**Figura 4.13** – Experimento com milho, plântulas com seis (A) e oito (B) dias, em um Nitossolo Vermelho.



Fonte: O Autor, 2013.

#### 4.4 Conclusões

1. A aplicação localizada de MAP favorece o aumento da disponibilidade de P no solo e consequentemente sua absorção pela planta;
2. A aplicação localizada de SFT, SS e MAP aumenta a produção de MSPA das plantas de milho, com destaque para o SFT; por outro lado o rendimento de raízes é inibido pela aplicação localizada de DAP;
3. Dentre as fontes fosfatadas, o SS é o que promove menor incremento na concentração de P no solo;
4. Entre as fontes fosfatadas solúveis, o SFT se destaca na absorção de K pelas plantas de milho.

### **CONCLUSÕES GERAIS**

1. A composição química do solo nas adjacências dos grânulos dos fertilizantes fosfatados minerais é alterada distintamente pelas fontes de fosfatos avaliadas, na qual o SFT se mostra mais eficiente na disponibilidade de P comparado ao DAP.
2. A aplicação localizada dos fertilizantes aumenta a movimentação dos nutrientes no solo, sendo este fato importante para aumentar a distribuição deles em uma área maior e consequentemente favorecer sua maior absorção pelas plantas, principalmente para o fósforo.
3. A eficiência de um fertilizante fosfatado na disponibilidade de P é dependente do tipo de solo, da presença do íon acompanhante e do método de extração. Nos solos que recebem SFT, a utilização do extrator Mehlich 1 deve ser evitada por superestimar os valores de P disponíveis.
4. Os fertilizantes fosfatados promovem incrementos distintos nas fases sólida e líquida do solo, nas quais o SFT aumenta os teores de P no solo quando extraídos pelo método Mehlich 1 e o DAP aumenta as concentrações de  $\text{HPO}_4^-$  na solução do solo.
5. Como a utilização do fertilizante MAP ocorreu somente no terceiro estudo não se sabe quais as principais reações que ele promove nas adjacências de seus grânulos, no entanto esta fonte mostra ser eficiente na liberação e absorção de P pelas plantas.
6. Independente de o fertilizante diamônio fosfato aumentar as concentrações de P na solução do solo, ele não se mostra eficiente na liberação e absorção de P pelas plantas de milho.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, F.; BURMESTER, C.; HUE, N.V.; LONG, F.L. A comparison of column-displacement and centrifuge methods for obtaining soil solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.733-735, 1980.
- AKINREMI, O.O.; CHO, C.M. Phosphate transport in calcium saturated systems: II. Experimental results in a model system. **Soil Science Society of America Journal**, v.55, p.1282-1287, 1991.
- AKINREMI, O.O.; CHO, C.M. Phosphorus diffusion retardation in a calcareous system by coapplication of potassium chloride. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.845-850, 1993.
- ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. ERNANI, P.R.; FONTANA, E.C. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.295-300, 2000.
- ALMEIDA, J.A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.985-1002, 2003.
- ALVES, V.M.C.; VASCONCELLOS, C.A.; PITTA, G.V.E.; MAGNAVACA, R. Seleção de genótipos de milho para eficiência ao fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.23, n.10, p.1083-1090, 1988.
- AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F.C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.115-123, 2004.
- ANDERSEN, M.K.; RAULUND-RASMUSSEN, K.; STROBEL, B.W.; HANSEN, H.C.B. Adsorption of cadmium, copper, nickel, and zinc to a poly(tetrafluorethene) porous soil solution sampler. **Journal of Environmental Quality**, v.31, n.1, p.168-175. 2002.
- ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.349-353, 1992.
- ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, v.72, p.1041-1044, 1980.
- BARBER, S.A. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. **Soil Science**, v.93, p.39-49, 1962.
- BARBER, S.A. Mecanismos de absorção de fósforo sob condições de estresse ambiental. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTRESSE AMBIENTAL, 1., Belo Horizonte. 1992, Anais... Sete Lagoas, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, p.233-237, 1995.
- BARRETO, A.C.; FERNANDES, M.F. Produtividade e absorção de fósforo por plantas de milho em função de doses e modos de aplicação de adubo fosfatado em solo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.151-156, 2002.

- BIGHAM, J.M.; GOLDEN, D.C.; BUOL, S.W.; WEED, S.B.; BOWEN, L.H. Iron oxide mineralogy of well-drained Ultisols and Oxisols: II. Influence on color, surface area, and phosphate retention. **Soil Science Society of America Journal**, v.42, p.825-830, 1978.
- CAIRES, E.F.; FELDHAUS, I.C.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agricola**, v.59; p.357-364, 2002.
- CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; KUSMAN, M.T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.275-286, 2003.
- CLARKSON, D. T. Adaptações morfológicas e fisiológicas das plantas a ambientes de baixa fertilidade. In: REUNIÃO DE FERTILIDADE DO SOLO, Anais... Ilhéus: P. Cabala Rosand, p. 45-75, 1985.
- COELHO, A.M.; ALVES, V.M.C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Piracicaba, 2003. Anais... Piracicaba, Potafos/Anda, 31p. 2003, CD-ROM.
- COSTA, J. P. V. da. **Fluxo difusivo de fósforo e de potássio em latossolos**. 1998. 67p. Tese de Doutorado (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Universidade Federal de Viçosa: UFV. Viçosa, MG. 1998.
- CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, C.W.A.; FREIRE, F.J.; SOUZA, S.K.S.; SILVA, G.B. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v.3, n.3, p.218-224, 2008.
- COUTINHO, E.L.M.; NATALE, W.; VILLA NOVA, A.S.; SITTA, D.S.X. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados para a cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.26, p.1393-1399, 1991.
- COX, F.R. Predicting increases in extractable phosphorus from fertilizing soils of varying clay content. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1249-1253, 1994.
- COX, M.S.; BARBER, S.A. Soil phosphorus level for equal P uptake from four soils with different water contents at the same water potential. **Plant Soil**, v.143, p.93-98, 1992.
- CURI, N.; FRANZMEIER, D.P. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.341- 346, 1984.
- DIEROLF, T.S.; ARYA, L.M. & YOST, R.S. Water and cation movement in an Indonesian Ultisol. **Agronomy Journal**, v.89, p.572- 579, 1997.
- ERNANI, P.R. The effect of ionic strength on soil P reactions is negligible. **Fertilizer Research**, v.45, p.193-197, 1996.
- ERNANI, P.R. **Química do solo e disponibilidade de micronutrientes**. Lages, 2008. 230 p.
- ERNANI, P.R.; ALMEIDA, J.A. Comparação de métodos analíticos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p.143-150, 1986.

- ERNANI, P.R.; BARBER, S.A. Comparison of P-availability from monocalcium and diammonium phosphates using a mechanistic nutrient uptake model. **Fertilizer Research**, v.22, p.15-20, 1990.
- ERNANI, P.R.; BARBER, S.A. Corn growth and changes of soil and root parameters as affected by phosphate fertilizers and liming. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.26, p.1309-1314, 1991.
- ERNANI, P.R.; BARBER S.A. Composição da solução do solo e lixiviação de cátions afetadas pela aplicação de cloreto e sulfato de cálcio em um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, p.41-46, 1993.
- ERNANI, P.R. BAYER, C., ALMEIDA, J.A.; CASSOL, P.C. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.393-402, 2007.
- ERNANI, P.R.; BAYER, C.; MAESTRI, L. Corn yield affected by liming and tillage system on an acid Brazilian Oxisol. **Agronomy Journal**, v.94, p.305-309, 2002.
- ERNANI, P.R.; BAYER, C.; RIBEIRO, M.F.S. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.35, p.889-901, 2004.
- ERNANI, P.R.; DIAS, J.; FLORE, J.A. Annual additions of potassium to the soil increased apple yield in Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.33; p.1291-1304, 2002.
- ERNANI, P.R.; FIGUEIREDO, O.R.A.; BECEGATO, V.; ALMEIDA, J.A. Decréscimo da retenção de fósforo no solo pelo aumento do pH. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.159-162, 1996.
- ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L.; CAMPOS, M.L.; CAMILLO, R.J. Influência da combinação de fósforo e calcário no rendimento de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.537-544, 2000.
- ERNANI, P.R.; 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.939-946, 2001.
- FIGUEIREDO, O.A.R. **Reações de superfosfato triplo e de cama de galinha poedeira com um solo Latossolo Bruno**. 1985. 74f. Dissertação de Mestrado. (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 1985.
- FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.110, p.101-109, 1988.
- FORDHAN, A.W.; SCHWERTMANN, U. Composition and reaction of liquid manure (gülle), with particular reference to phosphate - II: Solid phase components. **Journal Environmental of Quality**, v.6, p.136-140, 1977.

FURLANI, A.M.C. Butrição Mieral. In: KERBAUY, G.B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan. 2004, p.40-75.

GAHOONIA, T.S.; NIELSEN, N.E. Root traits as tools for creating phosphorus efficient crop varieties. **Plant and Soil**, v.260, p.47-57, 2004.

GAPON, E.N. Theory of exchange adsorption in soils. **Journal General Chemistry**, v.3, p.144-163, 1933.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S. & SAGGIN, A. Quantificação do fósforo disponível por extrações sucessivas com diferentes extratores em Latossolo Vermelho distroférrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1023-1029, 2002.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S. & BRUNETTO, G. Superphosphate and rock phosphates as Phosphorus sources for grass-clover pasture on a limed acid soil in Southern Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, p.2503-2514, 2003.

GILLMAN, G.P.L. **A centrifuge method for obtained soil solution**. S.l.: CSIRO, 1976. 6p (Div. Soil Divisional Report, 16).

GUSTAFSSON, J.P. **Visual MINTEQ**. Disponível na Internet:  
<http://www.lwr.kth.se/English/OurSoftware/Vminseq>. Capturado em 15 DEZ 2012. Online.

HORNUNG, M. Soil solution sampling and lysimetry (Appendix E). In: ANDERSON, J.M. & INGRAM, J.S.I. **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. Wallingford (UK): CAB International, p.145-157, 1996.

HORST, W.J.; ABDOU, M.; WIESLER. Genotypic differences in phosphorus efficiency of wheat. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.155/156, p.293-296, 1993.

HUFFMAN, S.A.; COLE, C.V.; SCOTT, N.A. Soil texture and residue addition affects on soil phosphorus transformation. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, p.1095-1101, 1996.

JONES, R.C. X-ray diffraction line profile analysis vs. phosphorus sorption by 11 Puerto Rican soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, p.818-825, 1981.

JUNGK, A. Soil-root interactions in the rhizosphere affecting plant availability of phosphorus. **Journal of Plant Nutrition**, v.10, p.1197-1224, 1987.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. **Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo**. Santa Maria, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 31p. (Boletim Técnico, 3).

KELLER, C. Application of centrifuging to heavy metal studies in soil solutions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.26, n.9-1, p.1621-1636. 1995.

KELLY, S.F.; GREEN, J.L.; SELKER, J.S. Fertilizer diffusion in container medium. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.122, p.122- 128, 1997.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Modos de adubação, absorção de nutrientes e rendimento de milho em diferentes preparos do solo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.2, p.79-86, 1996.

LOPES, A.S.; COELHO, J.G. Micronutrientes: critérios de diagnose para o solo e planta, correção de deficiências e excessos. In: BORKERT, C.M. & LANTAMAN, A.F. (Ed.) **Enxofre e micronutrientes na agricultura Brasileira**. Londrina: Embrapa –IAPAR – SBCS, 1988. p.133-178.

LUCENA, L. F. C.; OLIVEIRA, F.A.; SILVA, I.F.; ANDRADE, A.P. Respostas do milho a diferentes níveis de nitrogênio e fósforo aplicados ao solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 334-337, 2000.

MACHADO, C.T. de T.; GUERRA, J.G.M.; ALMEIDA, D.L. de; MACHADO, A.T. Variabilidade entre genótipos de milho para eficiência no uso de fósforo. **Bragantia**, Campinas, v.58, n.1, p.109-124, 1999.

MALAVOLTA, E. Nutrição mineral de plantas. In: **Curso de atualização em fertilidade do solo**. Ilha Solteira: Fundação Cargill, 1987. p.32-101.

MANTOVANI, A.; ERNANI, P. R.; SANGOI, L. . A adição de superfosfato triplo e a percolação de nitrogênio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.887-895, 2007.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO.  
**Projeções do Agronegócio Brasil**, 2011/12 a 2021/22. 7p.  
[http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/Ministerio/gestao/projacao/Tabelas%20gerais.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Ministerio/gestao/projacao/Tabelas%20gerais.pdf). Acesso 12 NOV 2012.

McKEAN, J. & WARREN, G.P. Determination of phosphate desorption characteristics in soils using successive resin extractions. **Comm. Soil Sci. Plant. Anal.**, 27:2397-2417, 1996.

MOTOMIYA, W.R.; FABRÍCIO, A.C.; MARCHETTI, M.E.; GONÇALVES, M.C.; ROBAINA, A.D.; NOVELINO, J.O. Métodos de aplicação de fosfato na soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.307-312, 2004.

MURPHY, J. RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, v 27, p.31-36, 1962.  
 MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, p.95-102, 1983.

NEVES, L.S.; ERNANI, P.R. & SIMONETE, M.A. Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, V.33, P.25-32, 2009.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.737-768.

OLIVEIRA, H.J.; ERNANI, P.R.; AMARANTE, C.V.T. Alterações na composição química das fases sólida e líquida de um solo ácido pela aplicação de calcário e gesso agrícola. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.1, p.93-101, 2002.

OLIVEIRA, R.H.; ROsolem, C.A.; TRIGUEIRO, R.M. Importância do fluxo de massa e difusão no suprimento de potássio ao algodoeiro como variável de água e potássio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.439-445, 2004.

PARFITT, R.L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. **Journal Soil Science**, v.40; p.359-369, 1989.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; ROQUE, C.G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo, em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.83-90, 2001.

PÉREZ, D. V. **Avaliação de Parâmetros Críticos para Espéciação de Al, Fe e Mn em Solução de Solos sob diferentes Sistemas de Uso e Manejo**. 2002. 197 fl. Tese de doutorado. (Doutorado em Química) – Programa de Pós-graduação em Química Analítica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2002.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. IPNI. Piracicaba, SP. 2011. 420p.

RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.L. **Recomendações de adubação e de calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1987. 170p.

RANNO; S.K.; SILVA, L.S.; GATIBONI, L.C.; RHODEN, A.C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.21-28, 2007.

RAUSCH, C.; BUCHER, M. Molecular mechanisms of phosphate transport in plants. **Planta**, v.216, p. 23-37. 2002

RESENDE, A.V. de; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C.; MUNIZ, J.A.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KINPARA, D.I.; SANTOS, J.Z.L.; CARNEIRO, L.F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da Região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.453-466, 2006.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L.C. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, p.1053-1059, 2003.

RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.2, p.576-586, 2008.

RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L.C.; BORTOLUZZI, E.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.797-805, 2000.

SAS INSTITUTE. **Getting started with the SAS learning edition**. Cary: SAS, 2002. 200p.

SILVA, F.C.; RAIJ, B.V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.267-288, 1999.

SOUZA, D.M.G. de; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416p.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; WOLKWEISS, S.J.; BOHNEN, H. **Análise do solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. (Boletim Técnico de Solos, 5)

TISDALE, S.L.; BEATON, J.D.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers**. 4.ed. New York: Mac Millan, 1985. 754p.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; BARRÓN, V. Fast and slow phosphate sorption by goethite-rich natural materials. **Clays and Clay Minerals**, v.40, n.1, p.14-21, 1992.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; BARRÓN, V. Phosphate sorption by natural hematites. **European Journal of Soil Science**, v.45, p.45- 51, 1994.

TRAINA, S.J.; SPOSITO, G.; HESTERBERG, D.; KAFKAFI, U. Effects of pH and organic acids on orthophosphate solubility in a acidic montmorillonitic soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.45-51, 1986.

VALLADARES, G.S.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.1, p.111-118, 2003.

VIÉGAS, R.A.; NOVAIS, R.F.; SCHULTHAIS, F. Availability of a soluble phosphorus source applied to soil samples with different acidity levels. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1125-1136, 2010.

ZHANG, J.; BARBER, S.A. Mayze root distribution between phosphorus-fertilized and unfertilized soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.819-822, 1992.

WHELAN, B.R.; BARROW, N.J. A study of a method for displacing soil solution by centrifuging with an immiscible liquid. **Journal of Environmental Quality**, v.9, n.2, p. 315-319. 1980.

WOLT, J. **Soil solution chemistry: applications to environmental science and agriculture**. New York: John Wiley, 1994. 345p.

## **APÊNDICES**

**Apêndice A -** Valores estimados de pH em água (pH-H<sub>2</sub>O) e em sal (pH-CaCl<sub>2</sub>) da fase sólida do solo obtidos na análise de contraste entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Média de quatro repetições.

Contrastes	pH-H <sub>2</sub> O		pH-CaCl <sub>2</sub>	
	NV	CH	NV	CH
CC x SC	5,1	2,625	4,725	2,475
Sem K x Com K	3,05	2,475	1,575	1,225
DAP x SFT (todos)	10,025	10,825	9,9	10,475
P x Testemunha	0,43125	0,06875	1,575	1,28125
DAP x SFT (com K)	4,875	4,9	4,725	4,575
DAP x SFT (sem K)	5,15	5,925	5,175	5,9
DAP x SFT (CC)	4,825	5,425	4,675	5,3
DAP x SFT (SC)	5,2	5,4	5,225	5,175
CV (%)	1,9	2,4	2,3	2,7

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastes: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contêm DAP x todos os tratamentos que contêm SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contêm SFT e KCl x todos os tratamentos que contêm DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contêm DAP e calcário x todos os tratamentos que contêm SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contêm DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contêm SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%.

**Apêndice B** - Valores estimados de alumínio trocável (Al trocável) e potássio trocável (K trocável) da fase sólida do solo obtidos na análise de contraste entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Média de quatro repetições.

Contrastes	Al trocável		K trocável	
	NV	CH	NV	CH
	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		----- mg dm <sup>-3</sup> -----	
CC x SC	- 4,6	1,75	162,0	- 3415,5
Sem K x Com K	2,9	3,55	- 108176,0	- 165642,5
DAP x SFT (todos)	- 12,6	- 8,45	- 2887,0	3328,5
P x Testemunha	0,675	1,2375	18074,2	25935,6
DAP x SFT (com K)	- 5,475	- 3,625	- 2722,5	3509,0
DAP x SFT (sem K)	- 7,125	- 4,825	- 164,5	- 180,5
DAP x SFT (CC)	- 5,85	- 5,525	- 859,5	687,5
DAP x SFT (SC)	- 6,75	- 2,925	- 2027,5	2641,0
CV (%)	23,4	47,2	7,0	13,6

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastes: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%.

**Apêndice C** - Valores estimados de cálcio trocável (Ca trocável) e magnésio trocável (Mg trocável) da fase sólida do solo obtidos na análise de contraste entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Média de quatro repetições.

Contrastes	Ca trocável		Mg trocável	
	NV	CH	NV	CH
	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			
CC x SC	1,5	26,375	1,55	1,3375
Sem K x Com K	- 2,9	2,025	2,55	- 0,6875
DAP x SFT (todos)	- 28,7	- 36,625	- 3,8	0,10
P x Testemunha	5,7	2,50625	0,175	1,4375
DAP x SFT (com K)	- 15,825	- 17,45	- 2,225	1,55
DAP x SFT (sem K)	- 12,875	- 19,175	- 1,575	- 1,45
DAP x SFT (CC)	- 12,375	- 26,15	- 2,075	- 0,95
DAP x SFT (SC)	- 16,325	- 10,475	- 1,725	1,05
CV (%)	13,6	25,6	25,2	15,4

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastes: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%.

**Apêndice D** - Valores estimados de fósforo extraído por Mehlich 1 (P-Mehlich 1) e pela resina trocadora de ânions (P-RTA) da fase sólida do solo obtidos na análise de contraste entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Média de quatro repetições.

Contrastes	P - Mehlich 1		P - RTA	
	NV	CH	NV	CH
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----			
CC x SC	- 212,025	- 12394,5	- 5267,225	- 6755,8
Sem K x Com K	- 188,075	36396,05	21060,025	- 7049,0
DAP x SFT (todos)	- 8688,25	- 29465,5	9757,75	43163,0
P x Testemunha	19238,59	53772,52	17220,712	38853,85
DAP x SFT (com K)	- 5718,25	8349,75	4289,0	25232,0
DAP x SFT (sem K)	- 2970,0	- 37814,25	5468,75	17931,0
DAP x SFT (CC)	- 5795,0	- 1191,75	2283,0	15612,0
DAP x SFT (SC)	- 2893,25	- 28273,75	7474,75	27551,0
CV (%)	8,4	65,3	27,1	14,8

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastes: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%.

**Apêndice E** - Valores estimados do pH da solução e do fósforo da solução (P da solução) da fase líquida do solo obtidos na análise de contraste entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Média de quatro repetições.

Contrastes	pH da solução		P da solução	
	NV	CH	NV	CH
----- mg L <sup>-1</sup> -----				
CC x SC	4,425	3,6	- 706,2375	- 6698,325
Sem K x Com K	1,775	4,5	- 6287,2075	- 80743,245
DAP x SFT (todos)	9,675	12,025	9307,125	- 17393,25
P x Testemunha	1,41875	0,55625	6702,856	48397,2375
DAP x SFT (com K)	4,65	5,825	3567,125	- 28019,75
DAP x SFT (sem K)	5,025	6,2	5740,0	10626,5
DAP x SFT (CC)	4,60	6,075	5671,775	- 3057,0
DAP x SFT (SC)	5,075	5,95	3635,35	- 14336,25
CV (%)	3,4	3,6	26,0	24,1

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastes: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%.

**Apêndice F** - Valores estimados de potássio da solução (K da solução) e de sua atividade da fase líquida do solo obtidos na análise de contraste entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Média de quatro repetições.

Contrastes	K da solução		Atividade de K	
	NV	CH	NV	CH
			----- mg L <sup>-1</sup> -----	----- mol L <sup>-1</sup> -----
CC x SC	- 23,725	1550,1	- 0,000664	0,025016
Sem K x Com K	- 6039,275	- 50850,45	0,142895	1,004495
DAP x SFT (todos)	14,65	- 707,6	- 0,005690	- 0,016805
P x Testemunha	1036,8375	6406,95	0,023453	0,09602
DAP x SFT (com K)	- 2,5	- 700,0	- 0,0059	- 0,0164
DAP x SFT (sem K)	17,15	- 7,6	0,000209	- 0,000405
DAP x SFT (CC)	8,05	- 505,4	- 0,003313	- 0,011985
DAP x SFT (SC)	6,6	- 202,2	- 0,002377	- 0,004819
CV (%)	0,4	17,4	3,0	20,3

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastes: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%.

**Apêndice G -** Valores estimados das atividades de fósforo (nas formas de  $\text{HPO}_4^{2-}$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) da fase líquida do solo obtidos na análise de contraste entre diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT, e diamônio fosfato, DAP) e potássico (cloreto de potássio, KCl) e de algumas combinações, na presença ou não de calcário, em um Nitossolo Vermelho e em um Cambissolo Húmico. Média de quatro repetições.

Contrastes	$\text{HPO}_4^{2-}$		$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	
	NV	CH	NV	CH
			----- mol L <sup>-1</sup> -----	
CC x SC	- 0,002535	0,047751	- 0,004878	- 0,1032
Sem K x Com K	0,009264	0,095585	- 0,063393	- 0,658499
DAP x SFT (todos)	0,084378	0,246157	0,008092	- 0,3905
P x Testemunha	0,021205	0,061785	0,046176	0,374124
DAP x SFT (com K)	0,037521	0,075421	- 0,005350	- 0,335
DAP x SFT (sem K)	0,046856	0,170736	0,013442	- 0,0555
DAP x SFT (CC)	0,040906	0,147053	0,015485	- 0,16235
DAP x SFT (SC)	0,043471	0,099104	- 0,007392	- 0,22815
CV (%)	29,6	50,3	27,0	26,1

Fonte: O Autor, 2013.

\* Contrastes: CC x SC = todos os tratamentos com calcário x todos os tratamentos sem calcário; Sem K x Com K = todos os tratamentos sem KCl x todos os tratamentos com KCl; DAP x SFT (todos) = todos os tratamentos que contenham DAP x todos os tratamentos que contenham SFT; P x Testemunha = todos os tratamentos com fontes de fósforo x todas as testemunhas; SFT x DAP (com K) = todos os tratamentos que contenham SFT e KCl x todos os tratamentos que contenham DAP e KCl; DAP x SFT (sem K) = todos os tratamentos com DAP e sem KCl x todos os tratamentos com SFT e sem KCl; DAP x SFT (CC) = todos os tratamentos que contenham DAP e calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e calcário; DAP x SFT (SC) = todos os tratamentos que contenham DAP e sem calcário x todos os tratamentos que contenham SFT e sem calcário. \* Probabilidade de 5%.

**Apêndice H –** Composição química dos diferentes adubos fosfatados (supersfosfato triplo, SFT; superfosfato simples, SS; diamônio fosfato, DAP; e monoamônio fosfato, MAP), de cálcio (nitrato de cálcio, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) e potássico (cloreto de potássio, KCl) utilizados nos experimentos. Média de quatro repetições.

Fertilizante	Ca (%)	Mg (%)	P (%)
DAP	1,6	1,5	20,0
KCl	0,01	0,03	-
SFT	14,6	0,6	18,3
SS	18,1	0,6	7,9
MAP	1,0	1,0	21,0
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	18,4	0,1	-

Fonte: O Autor, 2013.

\*As avaliações analíticas foram realizadas com metodologias descritas por Tedesco et al. (1995). (¹) Não foram realizadas as determinações.

**Apêndice I** – Concentração de fósforo acumulado nas distintas camadas, em função de diferentes fontes de P aplicadas em um Nitossolo Vermelho, obtidos por extrações sucessivas com Mehlich-1.

Fonte de P	1º Extrato	2º Extrato	3º Extrato	4º Extrato	5º Extrato	6º Extrato	7º Extrato	8º Extrato	9º Extrato
----- camada 0-1 cm -----									
SFT	2093 A	3301 A	4465 ns	5341 ns	5929 ns	6174 ns	6338 ns	6411 ns	6457 ns
DAP	1644 B	2726 B	3852	4673	5023	5208	5332	5393	5437
CV	7,2	5,7	7,0	8,0	9,3	10,2	10,7	10,8	10,7
----- camada 1-2 cm -----									
SFT	1295 ns	2120 ns	2704 ns	2953 ns	3092 ns	3191 ns	3257 ns	3290 ns	3332 ns
DAP	1195	2044	2629	2883	3025	3136	3209	3246	3274
CV	19,4	12,7	16,6	8,0	16,4	16,4	16,4	16,4	16,1
----- camada 2-3 cm -----									
SFT	54,7 ns	98,7 B	174 B	217 ns	251 ns	288 ns	318 ns	335 ns	350 ns
DAP	49,4	115 A	216 A	270	314	359	397	420	438
CV	28,7	2,0	2,4	18,4	18,5	16,9	15,9	15,2	14,6
----- camada 3-4 cm -----									
SFT	9,7 ns	13,1 ns	19,4 ns	24,9 ns	31,7 ns	36,8 ns	-	-	-
DAP	12,5	16,2	22,0	26,9	30,0	32,7	-	-	-
CV	82,4	60,2	44,4	36,1	30,4	27,1	-	-	-

Fonte: O Autor, 2013.

\*SFT = superfosfato triplo; DAP=diamônio fosfato; KCl=Cloreto de potássio; CV=coeficiente de variação. Ns = não significativo.\*Médias seguidas de letras distintas, nas colunas e em cada tipo de solo, diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

**Apêndice J – Concentração de fósforo acumulado nas distintas camadas, em função de diferentes fontes de P aplicadas em um Cambissolo Húmico, obtidos por extrações sucessivas com Mehlich-1.**

Fonte de P	1º Extrato	2º Extrato	3º Extrato	4º Extrato	5º Extrato	6º Extrato	7º Extrato	8º Extrato	9º Extrato
----- camada 0-1 cm -----									
SFT	4258 A	7114 A	8206 A	8943 A	9425 A	9733 <sup>ns</sup>	9934 <sup>ns</sup>	10115 <sup>ns</sup>	10247 <sup>ns</sup>
DAP	3064 B	4989 B	5828 B	6511 B	6934 B	7218	7396	7564	7692
CV	6,3	13,1	12,6	12,3	12,6	13,2	13,3	13,5	13,6
----- camada 1-2 cm -----									
SFT	2055 <sup>ns</sup>	2925 B	3317 B	3537 B	3680 <sup>ns</sup>	3787 B	3877 <sup>ns</sup>	3964 B	4022 B
DAP	2192	3966 A	4496 A	4826 A	5014	5155 A	5242	5334 A	5407 A
CV	8,7	12,0	10,8	12,0	14,6	12,8	13,5	13,0	12,3
----- camada 2-3 cm -----									
SFT	95,6 B	148 B	155 B	171 B	185 B	200 B	210 B	218	225
DAP	247 A	412 A	426 A	435 A	442 A	453 A	461 A	468	473
CV	0,4	11,6	11,5	10,8	11,5	10,4	10,7	11,3	11,8
----- camada 3-4 cm -----									
SFT	5,2 B	8,3 B	10,5 B	12,1 B	13,8 B	16,5 B	-	-	-
DAP	12,4 A	24,0 A	29,0 A	33,7 A	38,2 A	40,9 A	-	-	-
CV	2,1	3,1	1,9	13,5	20,7	16,2	-	-	-

Fonte: O Autor, 2013.

\*SFT = superfosfato triplo; DAP=diamônio fosfato; KCl=Cloreto de potássio; CV=coeficiente de variação. Ns = não significativo.\*Médias seguidas de letras distintas, nas colunas e em cada tipo de solo, diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

**Apêndice L** – Concentração de fósforo acumulado nas distintas camadas, em função de diferentes fontes de P aplicadas em um Nitossolo Vermelho, obtidos por extrações sucessivas com resina trocadora de ânions (RTA).

Fonte de P	1º Extrato	2º Extrato	3º Extrato	4º Extrato	5º Extrato	6º Extrato	7º Extrato	8º Extrato	9º Extrato
----- camada 0-1 cm -----									
SFT	1215 <sup>ns</sup>	1989 <sup>ns</sup>	2587 <sup>ns</sup>	3065 <sup>ns</sup>	3557 <sup>ns</sup>	3753 <sup>ns</sup>	3899 <sup>ns</sup>	4006 <sup>ns</sup>	4121 <sup>ns</sup>
DAP	1294	2242	2683	3062	3377	3541	3647	3716	3788
CV	10,8	13,2	10,8	11,7	10,7	10,8	11,1	11,8	11,4
----- camada 1-2 cm -----									
SFT	572 <sup>ns</sup>	962 <sup>ns</sup>	1283 <sup>ns</sup>	1589 <sup>ns</sup>	1846 <sup>ns</sup>	1939 <sup>ns</sup>	2012 <sup>ns</sup>	2072 <sup>ns</sup>	2146 <sup>ns</sup>
DAP	787	1120	1439	1645	1848	1917	1980	2038	2088
CV	41,0	29,8	20,9	19,7	19,1	19,3	19,1	19,3	18,7
----- camada 2-3 cm -----									
SFT	39,7 B	88,5 B	120 B	143 B	163 B	173 B	181 B	-	-
DAP	112 A	185 A	222 A	249 A	282 A	293 A	303 A	-	-
CV	8,7	9,8	18,2	18,3	18,2	18,4	19,8		
----- camada 3-4 cm -----									
SFT	11,3 <sup>ns</sup>	24,2 A	32,6 A	41,7 A	53,0 A	64,3 A	-	-	-
DAP	5,8	14,3 B	16,8 B	20,7 B	24,8 B	30,6 B	-	-	-
CV	47,0	22,1	19,9	23,8	23,0	22,6	-	-	-

Fonte: O Autor, 2013.

\*SFT = superfosfato triplo; DAP=diamônio fosfato; KCl=Cloreto de potássio; CV=coeficiente de variação.

\*Médias seguidas de letras distintas, nas colunas e em cada tipo de solo, diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

**Apêndice M – Concentração de fósforo acumulado nas distintas camadas, em função de diferentes fontes de P aplicadas em um Cambissolo Húmico, obtidos por extrações sucessivas com resina trocadora de ânions (RTA).**

Fonte de P	1º Extrato	2º Extrato	3º Extrato	4º Extrato	5º Extrato	6º Extrato	7º Extrato	8º Extrato	9º Extrato
----- camada 0-1 cm -----									
SFT	2163 <sup>ns</sup>	2779 <sup>ns</sup>	3304 <sup>ns</sup>	3798 <sup>ns</sup>	4106 <sup>ns</sup>	4252 <sup>ns</sup>	4328 <sup>ns</sup>	4383 <sup>ns</sup>	4450 A
DAP	2141	2841	3308	3761	3938	4020	4071	4101	4122 B
CV	11,8	8,1	6,3	5,6	5,7	5,5	5,3	5,2	5,1
----- camada 1-2 cm -----									
SFT	432 <sup>ns</sup>	796 <sup>ns</sup>	1022 B	1228 <sup>ns</sup>	1332 <sup>ns</sup>	1372 B	1379 B	1393 B	1410 B
DAP	510	825	1103 A	1367	1472	1514 A	1541 A	1563 A	1587 A
CV	8,3	4,5	4,0	5,3	6,0	7,2	6,4	6,2	7,4
----- camada 2-3 cm -----									
SFT	36,6 <sup>ns</sup>	53,6 <sup>ns</sup>	67,5 <sup>ns</sup>	79,4 <sup>ns</sup>	87,3 <sup>ns</sup>	93,5 <sup>ns</sup>	100 <sup>ns</sup>	-	-
DAP	10,6	20,4	30,0	39,9	43,4	47,3	50,8	-	-
CV	7,3	13,7	61,2	50,0	50,9	45,8	41,9	-	-
----- camada 3-4 cm -----									
SFT	4,7 <sup>ns</sup>	6,1 <sup>ns</sup>	7,6 B	9,8 B	11,2 B	15,9 <sup>ns</sup>	-	-	-
DAP	9,1	16,2	24,9 A	29,1 A	31,3 A	40,4	-	-	-
CV	27,8	18,9	11,7	13,4	17,5	21,8	-	-	-

Fonte: O Autor, 2013.

\*SFT = superfosfato triplo; DAP=diamônio fosfato; KCl=Cloreto de potássio; CV=coeficiente de variação.

\*Médias seguidas de letras distintas, nas colunas e em cada tipo de solo, diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

**Apêndice N – Tabelas com análise estatística do Cambissolo Húmico referente ao experimento 3. Média de quatro repetições.**

Tratamento	MSPA	MSR	P solo	PPA	P raiz	Ca solo	Ca PA	Ca raiz	Mg solo	Mg PA	Mg raiz	K solo	K PA	K raiz
	mg/vaso	mg dm <sup>-3</sup>	mg/vaso	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	%	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	%	mg dm <sup>-3</sup>	mg/vaso			mg dm <sup>-3</sup>	mg/vaso	
SFT	1,7 a	2,0 a	65,6 a	2,3 ab	5,4 a	4,4 a	0,8 ab	0,5 a	1,4 ab	0,9 a	0,6 ns	99,5 c	34,0 a	19,0 a
SS	1,5 a	2,1 a	34,6 b	2,0 ab	5,3 a	2,2 c	0,9 a	0,4 ab	1,8 a	0,8 ab	0,5	103,8 c	29,8 ab	15,0 ab
MAP	1,3 a	1,7 ab	73,2 a	2,8 a	5,6 a	1,6 d	0,7 abc	0,4 ab	1,7 a	0,7 bc	0,5	105,8 c	25,5 b	14,8 ab
DAP	0,8 b	1,1 c	67,8 a	1,6 bc	3,2 b	3,1 b	0,6 c	0,2 bc	1,1 b	0,6 c	0,4	126,8 b	15,8 c	13,7 abc
Testemunha	0,5 b	2,1 a	4,8 d	0,3 d	4,0 ab	0,5 e	0,8 ab	0,1 c	0,6 c	0,9 a	0,4	72,5 d	5,6 d	8,0 c
CV	17,1	12,6	10,9	29,8	19,0	6,4	7,6	22,5	15,1	9,2	18,8	8,0	17,1	20,9

Fonte: O Autor, 2013.

\* SFT = superfosfato triplo; SS = superfosfato simples; MAP=monoamônio fosfato; DAP= diamônio fosfato; CV=coeficiente de variação; MSPA= massa seca de parte aérea; MSR= massa seca de raiz; P solo= fósforo no solo; PPA= fósforo na parte aérea; P raiz= fósforo na raiz; Ca solo=cálcio no solo; CaPA =cálcio na parte aérea; Ca raiz= cálcio na raiz; Mg solo=magnésio no solo; MgPA = magnésio na parte aérea; Mg raiz= magnésio na raiz; K solo=potássio no solo; KPA =potássio na parte aérea; K raiz= potássio na raiz; ns=não significativo.\*Médias seguidas de letras distintas, nas colunas e em cada tipo de solo, diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.