

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**KELI CRISTINA SILVA GUERA**

**MUDANÇAS NA FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE  
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA DECORRENTE DA APLICAÇÃO ANUAL DE  
FOSFATOS NA SUPERFÍCIE: EFEITOS EM LONGO PRAZO**

**PONTA GROSSA  
2018**

KELI CRISTINA SILVA GUERA

**MUDANÇAS NA FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE  
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA DECORRENTE DA APLICAÇÃO ANUAL DE  
FOSFATOS NA SUPERFÍCIE: EFEITOS EM LONGO PRAZO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Ponta Grossa para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração: Agricultura. Linha de Pesquisa: Uso e Manejo do Solo

Orientador: Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca

PONTA GROSSA  
2018

**Ficha Catalográfica**  
**Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG**

G929           Guera, Keli Cristina Silva  
                  Mudanças na fertilidade do solo em sistema integrado de produção agropecuária decorrente da aplicação anual de fosfatos na superfície: efeitos em longo prazo/  
Keli Cristina Silva Guera. Ponta Grossa, 2018.  
                  57f.

                  Dissertação (Mestrado em Agronomia - Área de Concentração: Agricultura), Universidade Estadual de Ponta Grossa.  
                  Orientador: Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca.

                  1.Agricultura conservacionista.  
                  2.Fosfatos solúveis e insolúveis em água.  
                  3.Metodologia de análise de solo. 4.Aporte de nutrientes. I.Fonseca, Adriel Ferreira da. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em Agronomia. III. T.

CDD: 631.42



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

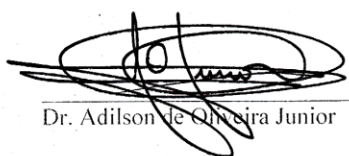
Título da Dissertação: “**Mudanças na fertilidade do solo em sistema integrado de produção agropecuária decorrente da aplicação anual de fosfatos na superfície: efeitos em longo prazo**”.

Nome: Keli Cristina Silva Guera

Orientador: Adriel Ferreira da Fonseca

Aprovado pela Comissão Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Adilson de Oliveira Junior

  
\_\_\_\_\_  
Dr.ª Laíse da Silveira Pontes

Data da Realização: 27 de fevereiro de 2018.

À pessoa que me ensinou a caminhar sempre em frente,  
e que nunca deixou de segurar a minha mão,  
mesmo nos momentos mais difíceis.

À Eliane de Fátima Castanho e Silva, minha mãe,

**DEDICO** este trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida, bênçãos, oportunidades, aprendizados, por ter a graça de ter colocado em um caminho pessoas de bem e que sempre me estenderam a mão.

A minha família, que sempre me apoiou, compreendeu e dispuseram seu tempo para ajudar quando era preciso, acalmar quando tudo parecia difícil e sorrir comigo nas conquistas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca, por toda a dedicação e incentivo de um mestre para com seus alunos, que sempre terei como exemplo de profissional.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), pela formação acadêmica e profissional, e em especial a todos os professores por instruíram a buscar a excelência intelectual.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Alex Assumpção de Arruda, meu querido companheiro, pela paciência, compreensão e carinho.

A amizade de Janaine Ritter, que a muito tempo está caminhando comigo e sempre me apoiou em todos os momentos.

Aos colegas de Laboratório de Nutrição de Plantas: Jéssica Alves dos Santos, Flávia Biassio Reifert, Sandoval Carpinelli, Julienne de Geus Moro, Bruna Siqueira, Jasmine Pillati, Guilherme Ramon Moll, Emerson Homenchuk, Juliano Garda de Oliveira e Roberto Dias Garbuio por toda a ajuda, que de alguma forma, colaborou para a concretização deste trabalho.

GUERA, Keli Cristina Silva. **Mudanças na fertilidade do solo em sistema integrado de produção agropecuária decorrente da aplicação anual de fosfatos na superfície: efeitos em longo prazo.** 2018. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual de Ponta Grossa.

## RESUMO

O sistema integrado de produção agropecuária (SIPA), tem sido uma prática que pode melhorar os atributos químicos do solo e otimizar a adubação de sistemas de produção. Todavia, os solos brasileiros são altamente intemperizados, com elevada acidez e baixa disponibilidade em P. Dessa forma, estratégias que resultem em aumento da eficiência do uso de fósforo contribuem para a produção de alimentos de maneira sustentável. Os objetivos desse trabalho foram: (i) analisar os atributos químicos do solo, ao longo do tempo, decorrente da aplicação anual na superfície de fosfatos de diferentes solubilidades e; (ii) avaliar as concentrações de P disponível no solo pelos extratores Mehlich-1 e resina trocadora de íons (RTI), a longo prazo, decorrente da aplicação de fosfatos em SIPA. O experimento foi instalado no município de Castro-PR, em abril/2009, em um Cambissolo Háptico argiloso. Foi empregado delineamento experimental em blocos casualizados, em esquema fatorial incompleto (3 x 3 +1), com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de três fontes de P [superfosfato triplo (SFT), fosfato natural reativo - Arad (FNR) e termofosfato magnésiano (TFM)] e três doses de P (60; 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup>), além do controle (sem adição de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Amostras de terra das camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm foram coletadas aos 24, 36, 48 e 60 meses após o início do experimento, e os seguintes atributos químicos foram avaliados: pH, concentrações de Ca, Mg e K trocáveis, saturação por bases (V%) e concentrações de P disponível pelos extratores Mehlich-1 e RTI. A aplicação de TFM proporcionou aumento de pH do solo, elevação da V% e eficiência no fornecimento de Mg<sup>2+</sup> às plantas. As concentrações de P disponíveis no solo pelo extrator Mehlich-1 foram maiores com o uso de FNR superestimando as concentrações de P. O uso de diferentes fontes fosfatadas não influenciou as concentrações de RTI, mostrando-se como o extrator de P mais adequado para prever as concentrações deste nutriente, independente da solubilidade do fertilizante fosfatado utilizado. Em condições de solo adequadamente conservado e manejado, a aplicação anual de fosfatos em superfície pode garantir a manutenção da fertilidade do solo a longo prazo. A renovação do sistema radicular decorrente do pastejo animal, maior produção de ácidos orgânicos e a deposição de excretas favoreceram a melhoria dos atributos químicos do solo e aumento da concentração de P, ao longo do tempo.

**PALAVRA – CHAVE:** agricultura conservacionista. fosfatos solúveis e insolúveis em água. metodologia de análise de solo. aporte de nutrientes

GUERA, Keli Cristina Silva. **Changes in soil fertility in integrated crop-livestock system resulting from the annual application of surface phosphates: long-term effects.** 2018. Master's Dissertation in Agronomy - State University of Ponta Grossa.

### ABSTRACT

The integrated crop-livestock system (ICLS) has been a practice that can improve the chemical attributes of the soil and optimize the fertilization of production systems. However, Brazilian soils are highly weathered, with high acidity and low availability in P. Thus, strategies that result in increased phosphorus efficiency contribute to sustainable food production. The objectives of this work were: (i) to analyze the chemical attributes of the soil, over time, due to the annual application on the surface of phosphates of different solubilities; (ii) to evaluate the concentrations of P available in the soil by the Mehlich-1 and ion exchange resin (IER) extractors, in the long term, due to the application of phosphates in ICLS. The experiment was installed in the municipality of Castro, Paraná, Brazil, in April/2009, in Typic Distrudept. A randomized complete block design was used in an incomplete factorial scheme (3 x 3 +1), with four replications. The treatments consisted of three sources of P [triple superphosphate (TSP), rock phosphate - Arad (RP) and magnesium thermophosphate (MTP)] and three levels of total P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (60, 120 and 180 kg ha<sup>-1</sup>) control (without addition of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Soil samples from the 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 and 20-30 cm layers were collected at 24, 36, 48 and 60 months after the start of the experiment, and the following chemical attributes were evaluated: pH, exchangeable Ca, Mg and K concentrations, base saturation (V%) and P concentrations available by the Mehlich-1 and RTI extractors. The application of TFM provided increase of soil pH, increase of V% and efficiency in the supply of Mg<sup>2+</sup> to plants. The concentrations of P available in the soil by the Mehlich-1 extractor were higher with the use of FNR overestimating the concentrations of P. The use of different phosphate sources did not influence the concentrations of RTI, proving to be the most suitable P extractor to predict concentrations of this nutrient, regardless of the solubility of the phosphate fertilizer used. Under properly maintained and managed soil conditions, the annual application of surface phosphates can ensure the long-term maintenance of soil fertility. Renewal of the root system due to animal grazing, increased production of organic acids and deposition of excreta favored the improvement of soil chemical attributes and increased P concentration over time.

**KEYWORDS:** conservationist agriculture. phosphates soluble and insoluble in water. soil analysis methodology. nutrient supply



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Concentrações de fósforo disponível (Mehlich-1) no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo – FNR e termofosfato magnésiano – TFM) e doses ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$ ) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições..... 29
- Figura 2 - Concentrações de fósforo disponível [resina trocadora de íons (RTI)] no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo – FNR e termofosfato magnésiano – TFM) e doses ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$ ) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições..... 30
- Figura 3 - Concentrações de fósforo disponível (Mehlich-1) no solo tratado com fontes [( $\diamond$ ) superfosfato triplo, ( $\square$ ) fosfato natural reativo e ( $\Delta$ ) termofosfato magnésiano] e doses ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$ ) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Pontos são média de quatro repetições. \*\* $P < 0.01$  e \*  $P < 0.05$ ..... 34
- Figura 4 - Concentrações de fósforo disponível [resina trocadora de íons (RTI)] no solo tratado com fontes [( $\diamond$ ) superfosfato triplo, ( $\square$ ) fosfato natural reativo e ( $\Delta$ ) termofosfato magnésiano] e doses ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$ ) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Pontos são média de quatro repetições. \*\* $P < 0.01$  e \*  $P < 0.05$ ..... 35
- Figura 5 - Rendimento relativo (%) das culturas de grãos [ ( $\blacklozenge$ ) milho (*Zea mays* L.) e ( $\circ$ ) soja (*Glycine max* L.)] em resposta a concentração de fósforo disponível [Mehlich-1(PM1) e resina trocadora de íons (P RTI)] no solo tratado com fontes (superfosfato triplo, fosfato natural reativo e termofosfato magnésiano) e doses ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$ ) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária..... 36
- Figura 6 - Valores de pH ( $\text{CaCl}_2$ ) no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo – FNR e termofosfato magnésiano – TFM) e doses ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$ ) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições..... 44

- Figura 7 - Concentrações de cálcio trocável no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo – FNR e termofosfato magnésiano – TFM) e doses ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$ ) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições..... 45
- Figura 8 - Concentrações de magnésio trocável no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo – FNR e termofosfato magnésiano – TFM) e doses ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$ ) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições..... 47
- Figura 9 - Concentrações de potássio trocável no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo – FNR e termofosfato magnésiano – TFM) e doses ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$ ) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições..... 48
- Figura 10 - Saturação por base no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo – FNR e termofosfato magnésiano – TFM) e doses ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$ ) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições..... 49

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Temperatura e precipitação média (abril 2009 a abril de 2014) no período experimental..... 23
- Tabela 2 - Composição química das fontes fosfatadas utilizadas durante o período experimental ..... 24
- Tabela 3 - Sequência de eventos das culturas no período experimental: época de semeadura, espaçamento entre linhas e densidade de semeadura, cultivar ou híbrido, aporte de nutrientes via adubação ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e manejo de cobertura (forragens) ou colheita (grãos)..... 25
- Tabela 4 - Valores de F referentes as concentrações de P para os extratores Mehlich-1 e resina trocadora de íons (RTI) após 24, 36, 48 e 60 meses de avaliação..... 27
- Tabela 5 - Valores de F referentes aos atributos químicos do solo pH ( $\text{CaCl}_2$ ),  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e V% aos 24, 36, 48 e 60 meses de avaliação..... 43

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
3.1 Sistema Integrado de Produção Agropecuária .....	13
3.2 Disponibilidade e Fluxo de Fósforo no Solo em SIPA.....	13
3.3 Estratégia de Fertilização Fosfatada e Respostas das Culturas em SIPA .....	15
3.4 Avaliação da Disponibilidade de Fósforo no Solo .....	17
<b>4. DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO A LONGO PRAZO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOB APLICAÇÃO ANUAL DE FOSFATOS EM SUPERFÍCIE</b> .....	<b>19</b>
<b>4.1 RESUMO</b> .....	<b>19</b>
<b>4.2 ABSTRACT</b> .....	<b>20</b>
<b>4.3 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>4.4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>22</b>
4.4.1 Localização, histórico e caracterização da área experimental.....	22
4.4.2 Delineamento, tratamentos, condução do experimento e amostragem do solo .....	23
4.4.3 Determinações laboratoriais e análises estatísticas.....	25
<b>4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>26</b>
4.5.1 Concentrações de fósforo no solo a longo prazo por diferentes métodos de extração.....	26
4.5.2 Avaliação da disponibilidade de fósforo em SIPA mediante aplicação anual de fosfatos em superfície .....	28
<b>4.6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>37</b>
<b>5. IMPACTOS A LONGO PRAZO DO SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO DECORRENTE DA APLICAÇÃO ANUAL DE FOSFATOS EM SUPERFÍCIE</b> .....	<b>38</b>
<b>5.1. RESUMO</b> .....	<b>38</b>
<b>5.2. ABSTRACT</b> .....	<b>39</b>
<b>5.3. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>40</b>
<b>5.4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>41</b>
5.4.1 Localização, histórico da área, delineamento experimental, condução do experimento e amostragem de solo .....	41
5.4.2 Determinações laboratoriais e análises estatísticas .....	41
<b>5.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>42</b>
<b>5.6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>51</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>53</b>

## MUDANÇAS NA FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA DECORRENTE DA APLICAÇÃO ANUAL DE FOSFATOS NA SUPERFÍCIE: EFEITOS EM LONGO PRAZO

### 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a agricultura moderna vem enfrentando o desafio da maximização da produção de alimentos vinculada a um sistema que reduza os impactos ambientais. Assim o sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) tornou-se uma opção sustentável para alcançar tais objetivos. Caracterizado como um sistema que permite o cultivo de grãos no verão e pastagens no outono-inverno, esta prática é muito difundida nos subtrópicos brasileiros, onde os índices produtivos na agropecuária são reconhecidos nacionalmente.

Os solos dessas regiões são altamente intemperizados, com acidez elevada e baixa disponibilidade de fósforo (P). Ricos em óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), estes solos tem a disponibilidade de P reduzida para as plantas, devido as reações de adsorção a esses grupos funcionais, formando fosfatos de Fe e Al. No entanto, em SIPA a dinâmica de P é alterada. Fatores como a constante renovação de raízes, maior liberação de ácidos orgânicos, aumento da matéria orgânica no solo, deposição de resíduos (fezes e urina) no solo; auxiliam na redução da adsorção de fosfatos na superfície dos coloides, além de contribuir para melhor distribuição de P no perfil do solo.

Além disso, a estratégia de adubação fosfatada contribui para eficiência de uso de P (EUP), uma vez que, a escolha adequada da fonte fosfatada é um fator chave para a melhoria da disponibilidade de P no solo. O uso de fontes insolúveis em água aplicadas anualmente na superfície do solo na semeadura de outono-inverno, vem sendo discutida como estratégia viável em SIPA. Esta é uma alternativa que visa disponibilizar nutriente à produção de forragem e, também, o aproveitamento pelas culturas anuais de verão através de efeito residual dessa aplicação. A melhor eficiência destas fontes tem sido relatada, podendo garantir a manutenção da fertilidade do solo e níveis adequados de P ao longo do tempo.

Porém, é necessário que haja avaliações eficientes das concentrações de P no solo, para que se possa afirmar sobre estes ganhos de P em sistemas mais eficientes, como o SIPA. Atualmente, o extrator Mehlich-1 é questionado pelos seus princípios de extração, que pode apresentar valores superestimados de P no solo quando da aplicação de fontes de fosfatos de cálcio. Entretanto, outras técnicas de extração de P como a resina trocadora de íons (RTI) tem seu embasamento teórico mais consistente, e mostra-se como uma técnica mais verossímil.

## 2. OBJETIVOS

Os objetivos desse trabalho foram:

- (i) Analisar os atributos químicos do solo, ao longo do tempo, devido a aplicação anual em superfície de fontes [superfosfato triplo (SFT), termofosfato magnesiano (TFM) e fosfato natural reativo (FNR)] e doses de P (0, 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total), por ocasião da semeadura de forrageiras anuais de inverno e;
- (ii) Avaliar as concentrações de P disponível no solo mediante o uso de diferentes extratores Mehlich-1 e resina trocadora de íons (RTI) a longo prazo, decorrente da aplicação de fosfatos em SIPA.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Sistema Integrado de Produção Agropecuária**

No sul do Brasil, o sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) tem sido proposto pela diminuição de risco no agronegócio e pela otimização no uso da área agrícola. Atualmente, nessa região, este sistema representa 12,7% das áreas cultivadas (MORAES et al., 2017). Caracterizado pela a rotação de cultivo entre pastagens anuais, destinadas à alimentação animal, e culturas destinadas à produção de grãos, é uma estratégia de elevada importância no Sul do país. Ainda, o SIPA tem proporcionado maior sustentabilidade ao sistema de produção, devido a maior produção de alimentos por unidade de área e à melhoria da qualidade do solo (BALBINOT JÚNIOR et al., 2009; CARVALHO et al., 2011; LEMAIRE et al., 2014; MORAES et al., 2014).

Esse sistema pode proporcionar muitas vantagens em relação aos sistemas de produção convencionais (MORAES et al., 2014), destacando como características: (i) o aumento da ciclagem de nutrientes (CARVALHO et al., 2010; ANGHINONI et al., 2011); (ii) a melhoria da qualidade do solo, promovendo maior agregação e bioporosidade do solo, devido ao maior crescimento e desenvolvimento das raízes (SOUZA et al., 2010); (iii) recuperação/renovação de pastagens degradadas; (iv) cobertura permanente do solo (VILELA et al., 2011); (v) quebra do ciclo de doenças (GÖRGEN et al., 2010); (vi) mitigação dos gases se efeito estufa (FEIGL et al., 2001).

No ano agrícola de 2016/2017 no estado do Paraná, apenas 14,3% das áreas cultivadas no verão, foram utilizadas com cereais de inverno, como a aveia (*Avena strigosa* Schreb), azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), cevada (*Hordeum vulgare* L.) e, principalmente, trigo (*Triticum aestivum* L.). Uma redução de 1,4% comparado ao ano agrícola anterior (PARANÁ, 2017). Este cenário indica a subutilização de áreas, e, portanto, o adequado uso e manejo no SIPA pode representar oportunidade para intensificar o uso econômico das propriedades nas áreas cultivadas durante o verão (SILVA et al., 2012).

Portanto o SIPA torna-se uma opção rentável na propriedade, onde áreas subutilizadas durante o período outono-inverno tornam-se fonte lucrativa através da implantação da pastagem fornecendo alimento aos animais no período de maior escassez de forragem oriunda de campos naturais (BALBINOT JÚNIOR et al., 2009).

#### **3.2 Disponibilidade e Fluxo de Fósforo no Solo em SIPA**

Os solos das regiões tropicais e subtropicais no Brasil são, em sua maioria, altamente intemperizados, com elevada acidez e baixa concentração em fósforo (P). Dessa maneira, após

a correção da acidez do solo, a aplicação adequada de fertilizantes fosfatados visando o manejo da fertilidade do solo torna-se prática fundamental para alcançar alto rendimento (NOVAIS & SMITH, 1999).

A dinâmica do P no solo está associada a fatores ambientais que controlam a atividade dos microrganismos e, as propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo. Nos solos altamente intemperizados, predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia e as formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). De acordo com o maior ou menor grau de estabilidade destes compostos, são enquadrados como fosfatos lábeis (compostos fosfatados capazes de repor rapidamente a solução do solo) e não-lábeis (compostos fosfatados adsorvidos as partículas do solo e indisponíveis as plantas) (NOVAIS & SMITH, 1999).

No entanto, a dinâmica do P em solos sob SIPA tende a ser mais complexa. A exploração de nutrientes, bem como a deposição de resíduos vegetais e animais (urina e fezes) é influenciada pelo pastejo, alterando a distribuição de P no perfil do solo (HAYNES & WILIAMS, 1993). A decomposição dos resíduos libera o nutriente para a solução do solo, à biomassa microbiana e para as formas orgânicas e inorgânicas, de diferentes labilidades (CARVALHO et al., 2010; ANGHINONI et al., 2011). As concentrações de P disponível oriundas desses sistemas, podem ser 32% maiores comparado aos sistemas convencionais. Isto representa formas de P mais prontamente disponíveis as forrageiras e também às culturas subsequentes (BALBINOT JÚNIOR et al., 2009; DEISS et al., 2016).

Além disso, a atividade animal, promovida pelo pastejo, estimula a produção e a liberação de maiores quantidades de exsudatos de ácidos orgânicos pelas raízes (CARVALHO et al., 2010). Estes são capazes de complexar metais na solução do solo, liberando quantidades significativas de P a partir de fosfatos de Al, Fe e Ca (BÜNEMANN & CONDRON, 2007). Ainda, favorece o crescimento das raízes e, assim, promove a formação de bioporosidade, levando à migração de P e outros nutrientes, para as camadas mais profundas do solo (SOUZA et al., 2009; COSTA et al., 2014).

Compreender e avaliar essas alterações na disponibilidade de P em sistemas que integram grãos e forragens, torna-se uma prioridade ao lidar com este nutriente, que tem disponibilidade limitada em solos intemperizados (LAWRENCE & SCHLESINGER, 2001). Porém, os dados relativos a disponibilidade de P a longo prazo são escassos, especialmente em SIPA. Estas questões surgem do ponto de vista da sustentabilidade, sobre como estes sistemas podem melhorar a eficiência de uso de P (EUP), buscando diminuir o uso de insumos e aumentar a produção de alimentos, com o mínimo impacto ambiental.



### 3.3 Estratégia de Fertilização Fosfatada e Respostas das Culturas em SIPA

A escolha da fonte fosfatada para o uso nos distintos sistemas de produção, constitui um dos princípios importantes na nutrição de plantas, principalmente quando se almeja melhores resultados de EUP (FAGERIA, 1998). Para isso, é necessária a compreensão dos fatores que governam a solubilidade e a disponibilidade de P no sistema, bem como o cultivo de plantas que favorecem a ciclagem deste nutriente.

Os fosfatos mais comumente utilizados no Brasil são fosfatos solúvel em água, fosfatos solúveis em ácido cítrico e fosfatos com baixa solubilidade em água e ácido cítrico (MOREIRA & MALAVOLTA, 2001). As fontes de maior solubilidade como superfosfato triplo (SFT) e o termofosfato magnésiano (TFM) apresentam melhor desempenho em relação às fontes de menor solubilidade, como o fosfato natural reativo (FNR), pois este último apresenta liberação lenta de P para as culturas (DA SILVA et al., 2009; FRANCISCO et al., 2007).

Entretanto, quando se considera a produção acumulada de vários cultivos após a adubação, o desempenho de alguns FNR pode se equiparar ao das fontes mais solúveis (RESENDE et al., 2006; GALETTO et al., 2014a). A capacidade dessa fonte insolúvel em água em fornecer P às plantas está ligada a reatividade do FNR aplicado (NOVAIS & SMITH, 1999). Neste caso, os fosfatos naturais de origem sedimentar (e.g. Arad) apresentam uma estrutura microcristalina pobremente consolidada, com grande superfície específica e alta substituição isomórfica, o que lhes confere alta reatividade e, portanto, sendo eficientes no uso para aplicação direta como fertilizante para produção de culturas (SANYAL & DATTA, 1991).

Tem sido relatada a melhor eficiência e efeito residual desta fonte fosfatada, quando da aplicação em superfície (GALETTO et al, 2014a,b). Esta prática aumenta a taxa de dissolução da rocha, pois promove o maior contato entre as superfícies das raízes e as partículas de FNR (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2008). Ainda, o efeito acidificante da rizosfera e a liberação de exsudatos de ácidos orgânicos estimulado pelo pastejo (CARVALHO et al., 2010), pode promover a liberação gradual de P no sistema de produção, fazendo com que o uso de FNR disponibilize quantidades significativas de P ao longo do tempo.

A solubilidade do TFM, quando comparado aos fosfatos totalmente acidulados e fosfatos naturais reativos, normalmente apresenta solubilidade intermediária (RAIJ, 2011). Estes apresentam alta solubilidade em ácido cítrico e alta eficiência no fornecimento gradativo de P às culturas (PAVINATO & ROSOLEM, 2008). O TFM contém silicatos em sua constituição que, quando aplicado ao solo, promovem a reação dos ânions  $\text{SiO}_3^{2-}$  com os prótons de  $\text{H}^+$  dissociando-se da superfície dos coloides. Dessa maneira, ocorre a redução de adsorção

específica de íons fosfato, deixando o P mais disponível para as plantas e, também, o aumento do pH do solo (BÜLL et al., 1997). Além disso, o TFM apresenta Mg em sua constituição, interagindo de forma sinérgica com o P, torna-se carregador de P na planta, nas reações de transferência de fosfato (BALIGAR et al., 2001).

No entanto, a maximização da EUP será determinada pela estratégia de adubação fosfatada. A aplicação de fertilizante fosfatado junto à semeadura da cultura de outono-inverno é uma técnica que pode ser interessante como estratégia de adubação em SIPA. Podendo disponibilizar nutriente à produção de forragem e, também, viabilizar o aproveitamento pelas culturas anuais de verão através de efeito residual dessa aplicação.

Na região dos Campos Gerais, a antecipação da adubação fosfatada de fontes com alta solubilidade em água + citrato neutro de amônio tem se mostrado promissora. Trabalhos nessa região tem demonstrado maior acúmulo de P quando na cultura de outono-inverno podendo, após a dessecação da forragem, disponibilizar P gradativamente para a cultura subsequente e viabilizar a antecipação da adubação fosfatada para as culturas produtoras de grãos em SIPA (GALETTO et al., 2014a; HARKATIN, 2014).

Entretanto, a antecipação da adubação fosfatada é um tema complexo, considerando a capacidade dos fertilizantes fosfatados em garantir liberação de P para a cultura subsequente. Este fato implica, sobretudo, no uso de fonte fosfatada de determinada solubilidade que garanta suprimento contínuo deste nutriente a longo prazo. Porém, ainda são escassos os trabalhos sobre efeitos da antecipação da adubação fosfatada, principalmente em sistemas de produção de grãos e forragens, e, portanto, necessita de mais investigações para que se possa afirmar os efeitos positivos desta prática.

Respostas positivas das culturas à aplicação anual de P em superfície, com o uso antecipado de doses de TFM e FNR, tem sido relatada. Para cada quilograma de P aplicado dessas fontes, haveria um aumento de 14 e 44 kg de grãos de milho produzidos, respectivamente (GALETTO et al., 2014b). Ainda, foi observado aumento do rendimento da cultura da soja de até 25% com a utilização de fontes como SFT, TFM e FNR, além de alterações positivas no peso de mil sementes, devido ao maior acúmulo de ácido fítico nos grãos, influenciando na sua massa (HARKATIN, 2014).

Na fase de pastagem em SIPA, as espécies forrageiras têm demonstrado elevado potencial na EUP. As pastagens de aveia e azevém têm apresentando aumento da produção de matéria seca e maior acúmulo de P na parte aérea decorrente da adubação antecipada de fosfatos (GALETTO et al., 2014a). Maiores concentrações de P acumulados nos resíduos das gramíneas, acarretam em maiores retornos deste nutriente para o sistema e, conseqüentemente, para a

cultura sucessora, após a decomposição da palhada (SÁ et al., 2010). Dessa forma, a estratégia de fertilização fosfatada antecipada pode garantir o uso eficiente de P pelas culturas de inverno, recuperação deste nutriente pelas culturas de verão e, assim, auxiliar na otimização do manejo da fertilidade do solo ao longo do tempo.

Nesse contexto, a antecipação da adubação fosfatada implica, acima de tudo, no uso de fonte(s) fosfatada(s) que garanta(m) suprimento contínuo deste nutriente a longo prazo: (i) P para a cobertura do solo no período outono-inverno; (ii) fornecimento e/ou liberação de P para promover adequado crescimento, desenvolvimento e produção de grãos no período primavera-verão. Desse modo, o aumento da ciclagem de nutrientes (CARVALHO et al., 2010), e as mudanças na distribuição de P no perfil do solo sob sistemas de rotação culturas anuais/pastagem, são fatores que podem potencializar o efeito da adubação fosfatada e a melhoria da fertilidade do solo.

### **3.4 Avaliação da Disponibilidade de Fósforo no Solo**

A análise de solo tem como objetivo avaliar a disponibilidade de nutrientes às plantas e, em caso de deficiência, estimar a quantidade a aplicar de corretivos e/ou fertilizantes de maneira econômica e racional (SCHLINDWIEIN & GIANELLO, 2008). No entanto, os diferentes métodos de extração de nutrientes, em especial o P, tem sido questionada e podem não estar representando os reais *status* de fertilidade deste nutriente no solo (SILVA & RAIJ, 1999).

Os extratores utilizados para predição do P disponível são, normalmente, soluções de reagentes químicos e podem ser classificados em quatro grandes grupos, segundo seus modos de ação: a) dissolução ácida; b) troca iônica; c) complexação de cátions e d) hidrólise de cátions (SANTOS et al., 2008). No Brasil, os métodos de extração de P mais utilizados incluem o uso do extrator Mehlich-1, sendo este método oficial no Estado do Paraná (SBCS/NEPAR, 2017); e a resina trocadora de íons (RTI), desenvolvido por RAIJ et al. (1986) empregado nos laboratórios que adotam o sistema de controle de qualidade oficial do Estado de São Paulo.

O extrator ácido Mehlich-1 é composto de uma mistura de ácidos fortes em baixas concentrações ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,0125 mol  $\text{L}^{-1}$  e HCl 0,05 mol  $\text{L}^{-1}$ ), com pH entre 2,0 e 3,0. A extração de P ocorre pela dissolução ácida dos compostos fosfatados de fraca energia, sendo maior para os fosfatos de Ca e apenas uma pequena proporção de elementos ligados a Fe e Al (PAVAN et al., 1992). No entanto, o princípio de extração com a solução de Mehlich-1 contrasta com a realidade brasileira, de solos ácidos e em que predominam os fosfatos de Fe e Al, que são mais solúveis a medida que o pH aumenta. Dessa maneira, os extratores ácidos não deveriam ser a

melhor opção para extrair P de tais solos (RAIJ, 2014). Ainda, outro fator que implica em erros na interpretação através do método, é a superestimativa das quantidades extraídas de P em solos onde foram aplicados fosfatos de rocha e, pode subestimar esse nutriente em solo rico em argila oxídrica. (CORRÊA et al., 2008; SCHLINDWEIN & GIARELLO, 2008; SOUZA et al., 2014; GALETTO et al., 2014b).

A resina trocadora de íons (RTI) para a extração de P, ao contrário do extrator de Mehlich-1, desde o começo das pesquisas realizadas foi concebido como um procedimento com embasamento teórico mais consistente (RAIJ, 2004). O princípio do extrator RTI consiste na remoção contínua da solução pela troca com bicarbonato ou cloreto de sódio, criando um gradiente de concentração que força a saída da superfície dos colóides, até que seja alcançado um equilíbrio eletroquímico entre o solo e a RTI (RAIJ, 2011). O uso da RTI como extrator de P é mais adequado comparado a outros extratores, pois o processo de extração assemelha-se as raízes das plantas, não ocorre perda de força de extração do P em solos com alto teor de argila e não há dissolução química de constituintes do solo (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

No que se refere à estratificação no perfil do solo, a literatura é consistente em afirmar que há maior acúmulo de P na camada de 0-10 cm em relação à de 0-20 cm (SCHLINDWEIN & ANGHINONI, 2000; CIOTTA et al., 2002; COSTA et al., 2009), devido a sua menor mobilidade e retenção em formas não lábeis nas superfícies de óxidos de Fe e Al, presentes em expressiva quantidade em solos altamente intemperizados (VIEIRA et al., 2012).

Porém, as alterações que ocorrem na disponibilidade dos nutrientes [e. g. mudanças na distribuição do P no perfil do solo (COSTA et al., 2014), aumento das concentrações de P orgânico (DEISS et al., 2016)] em solos sob SIPA podem refletir em mudanças na avaliação de P no solo e, conseqüentemente, nos critérios de adubação das culturas. Desse modo, há necessidade de serem conduzidos estudos visando calibrar e determinar indicadores de teores críticos de nutrientes em solos sob SIPA, especialmente de longa duração, os quais apresentam maior variabilidade vertical dos atributos do solo (SCHLINDWEIN & ANGHINONI, 2000; SCHLINDWEIN & GIARELLO, 2004)

No entanto, pouco é explorado sobre a avaliação da disponibilidade de P e calibração de métodos de determinação dos teores críticos com o uso de fosfatos solúveis e insolúveis no solo, especialmente em sistemas integrados de produção. Necessita-se de maior compreensão para maximizar a precisão das recomendações com base nas reais concentrações de P no solo e o uso eficiente dos fertilizantes fosfatados.

#### 4. DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO A LONGO PRAZO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOB APLICAÇÃO ANUAL DE FOSFATOS EM SUPERFÍCIE

##### 4.1 RESUMO

A disponibilidade de fósforo no solo tem sido um dos fatores mais limitantes na produção agrícola em solos tropicais, porém em sistemas de manejo conservacionista do solo, como os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), a dinâmica desse nutriente é alterada de maneira a favorecer o aumento das concentrações no solo. No entanto, dependendo da fonte utilizada ou as frações de P predominantes no solo, a eficiência dos métodos de extração, para prever os teores de fósforo, tem sido questionada. Os objetivos deste trabalho foram: (i) determinar as concentrações de P disponível pelos extratores Mehlich-1 e resina trocadora de íons (RTI), em longo prazo, decorrente da aplicação anual de fosfatos na superfície do solo, e (ii) avaliar os métodos de extração que proporcionem melhor relação das concentrações de P disponível com o uso de diferentes fontes fosfatadas em SIPA. O experimento foi instalado no município de Castro-PR, em abril/2009, em um Cambissolo Háplico argiloso. Foi empregado delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial incompleto (3 x 3 +1), com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de três fontes de P (superfosfato triplo- SFT, fosfato natural reativo - Arad -FNR e termofosfato magnésiano - TFM) e três doses de P (60; 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), além do tratamento controle (sem adição de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Amostras de terra das camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm foram coletadas aos 24, 36, 48 e 60 meses após o início do experimento, sendo determinados os teores de P disponível pelos extratores Mehlich-1 e RTI. Maiores concentrações de P disponível foram observadas com a aplicação anual de FNR em superfície a longo prazo, pelo extrator Mehlich-1. O uso de diferentes fontes fosfatadas não influenciou as concentrações de P disponível pela RTI, mostrando-se como procedimento mais adequada para prever a disponibilidade deste nutriente em SIPA. Altas concentrações de P no perfil do solo foram observadas a longo prazo em SIPA, decorrente do efeito potencial do sistema de uso e manejo na relação solo-planta-animal.

**Palavra-chave:** agricultura sustentável. pastejo animal. fosfatos solúveis e insolúveis em água. adubação de sistema

## PHOSPHORUS AVAILABILITY ON LONG-TERM IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEM UNDER ANNUAL APPLICATION OF SURFACE PHOSPHATES

### 4.2 ABSTRACT

The availability of phosphorus in the soil has been one of the most limiting factors in agricultural production in tropical soils, but in systems of soil conservation management, such as integrated crop livestock systems (ICLS), the dynamics of this nutrient is altered in a way that favors the increase in soil concentrations. However, the efficiency of the extraction methods, to predict the phosphorus contents, has been questioned. The aims of this work were: (i) determine the concentrations of available P extracted by Mehlich-1 and ion exchange resin (IER), in the long-term, due to the annual application of surface phosphates and (ii) evaluate the extractant that provide better interpretation of the available P concentrations with the use of different phosphate sources under in ICLS. The experiment was installed in the municipality of Castro, Paraná, Brazil, in April / 2009, in a Inceptisol Typic. A randomized complete block design (3 x 3 +1) with four replications was used. The treatments consisted of three sources of P [triple superphosphate (TSP), rock phosphate - Arad (RP) and magnesium thermophosphate (MTP)] and three levels of total P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (60, 120 and 180 kg ha<sup>-1</sup>) beyond control (without addition of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Samples of soil from the 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 and 20-30 cm layers were evaluated at 24, 36, 48 and 60 months after the start of the experiment by Mehlich-1 and RTI to predict the concentrations of P available in the soil. Higher concentrations of available P were observed with the annual application of long-term surface FNR by the Mehlich-1 extractant. The use of different phosphate sources did not influence the concentrations of P available by IER, proving to be an adequate extractant to evaluate soil available P in ICLS. High P concentrations in the soil profile were observed in the long term in ICLS, due to the potential effect of the use and management in the soil-plant-animal relationship.

**Key words:** sustainable agriculture. grazing animal. phosphates soluble and insoluble in water. system fertilization

### 4.3 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios na agricultura moderna é a utilização de sistemas que combinem níveis mais baixos de insumos com maior produção de alimentos e impactos ambientais mínimos. Neste contexto, o sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) é caracterizado como uma opção para a intensificação sustentável no tocante à produção de alimentos. Este sistema representa 12,7% das áreas cultivadas no Sul do país (MORAES et al., 2017), onde se encontram grandes índices de produtividade no Brasil.

O manejo da fertilidade do solo é uma prática chave para alcançar altos rendimentos nos sistemas de produção, onde os solos são altamente degradados, com elevada acidez e com baixa concentração em fósforo (P) (NOVAIS & SMITH, 1999). Em SIPA, a dinâmica do P torna-se diferenciada dos cultivos exclusivos de culturas anuais, devido à maior reserva e ciclagem de nutrientes, decorrente da distribuição de resíduos vegetais e animais (fezes e urina) no solo (CARVALHO et al., 2010).

Entretanto, muitos são os fatores que influenciam a disponibilidade do P no solo, sendo o fornecimento de P uma prática de elevada importância, bem como a escolha da fonte fosfatada. Os fosfatos mais utilizados no Brasil incluem (i) fosfatos solúveis em água – superfosfatos e; (ii) fosfatos insolúveis em água e com alta solubilidade em ácido cítrico – termofosfatos e fosfato natural reativo (RAIJ, 2011). As diferentes estratégias de aplicação de P, também contribuem para a aumentar, ou não, eficiência do uso de P. As aplicações antecipadas de fosfatos em superfície, tem demonstrado ser uma forma eficiente de fornecimento de P para as culturas de inverno e, também, com adequada recuperação pelas culturas de verão, auxiliando na otimização da adubação de sistemas de produção (GALETTO et al., 2014a, b).

A análise química do solo é a principal ferramenta para a adequada recomendação da adubação fosfatada (PAZ-FERREIRO; VAZQUEZ; ABREU, 2005). No entanto, são recorrentes os questionamentos quanto a eficácia dos extratores usados para avaliar a disponibilidade de P, uma vez que, frequentemente são verificadas falhas na avaliação das reais condições da fertilidade do solo (SILVA & RAIJ, 1999). Os laboratórios de análise química do solo utilizam a extração de Mehlich-1 para avaliar o P como método oficial adotado pelos laboratórios de análise no Estado do Paraná (PAVAN et al., 1992). Porém, esse método tem sido um dos menos recomendado para solos argilosos, podendo subestimar a disponibilidade de P pela neutralização parcial da solução extratora, e, também, superestimar as concentrações no solo quando aplicado fosfatos insolúveis em água (SCHLINDWEIN & GIANELLO, 2008; BORTOLON; GIANELLO; KOVAR, 2011).

Por outro lado, o método de extração de resina trocadora de íons (RTI) tem mostrado ser mais eficaz na avaliação da disponibilidade de P do solo do que os outros extratores comumente usados no Brasil (RAIJ; QUAGGIO; SILVA, 1986; SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008; SCHLINDWEIN & GIANELLO, 2008). Porém, a baixa praticidade do extrator RTI, em seu uso em larga escala, tem sido criticada (MOREIRA & MALAVOLTA, 2001; GALETTO et al., 2014b).

No entanto, a eficiência de diferentes métodos de extração na avaliação da biodisponibilidade de P em SIPA não foi adequadamente estudada e necessita de maior compreensão para se maximizar o uso eficiente dos fertilizantes fosfatados. Neste contexto, é possível que: (i) o uso de fontes fosfatadas, de diferentes solubilidades, auxiliem na melhoria da disponibilidade de P no solo ao longo do tempo em SIPA; (ii) o manejo do solo em SIPA poderá contribuir com a melhoria dos atributos químicos do solo e, conseqüentemente, favorecer o aumento da concentração P no perfil do solo e, (iii) a estratégia de antecipação da adubação fosfatada em SIPA maximizará a eficiência do uso de P, podendo disponibilizar P paulatinamente as culturas.

Os objetivos deste estudo foram: (i) determinar as concentrações de P disponível extraído pelo extrator Mehlich-1 e RTI, em longo prazo decorrente da aplicação anual de diferentes fosfatos em superfície em SIPA e; (ii) avaliar os métodos de extração que proporcionem melhor interpretação das concentrações de P disponível com o uso de diferentes fontes fosfatadas em SIPA.

## **4.4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.4.1 Localização, histórico e caracterização da área experimental**

O experimento foi instalado em abril de 2009 no município de Castro-PR (latitude: 24°51'49", longitude: 49°56'61" e altitude média: 1.020 m), situado no Primeiro Planalto Paranaense. O clima predominante na região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfb – verões frescos com a ocorrência de geadas frequentes, sem a presença de estação seca (CAVIGLONE et al., 2000). As precipitações médias e temperaturas do ar durante os 60 meses de estudo estão descritos na Tabela 1. A área encontrava-se, há oito anos em sistema plantio direto com as culturas em sucessão de soja e milho, no verão e aveia preta, azevém anual e trigo, no inverno.

O solo foi classificado como Cambissolo Háptico argiloso (EMBRAPA, 2006), cujos atributos químicos e granulométricos na camada de 0-20 cm foram: pH (CaCl<sub>2</sub>) 4,8; acidez total (H + Al) 9,2 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; saturação por bases 38%; Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup> de 0,04; 3,1; 2,3 e



0,35 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente; P disponível 4,2 e 18 mg dm<sup>-3</sup> pelos extratores Mehlich-1 e resina trocadora de íons, respectivamente; carbono orgânico total (COT) e o nitrogênio total (N) de 29,6 e 2,0 g dm<sup>-3</sup>, respectivamente; e argila, silte e areia de 605, 225 e 170 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. A análise mineralógica do solo apresentou mineralogia simples, predominante, quartzo, caulinita e gibsita e, subordinadamente, hematita e goetita. Na fração argila, os minerais caulinita e gibsita foram dominantes e os óxidos de ferro (principalmente hematita e goetita), menos expressivos (GALETTO et al., 2014a; GALETTO et al., 2014b).

Tabela 1 - Temperatura e precipitação média (abril 2009 a abril de 2014) no período experimental

Período	-----Meses-----												Média	Acumulado
	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar		
<b>Temperatura média do ar, °C</b>														
<b>2009/10</b>	18	15	15	12	14	13	17	17	20	19	19	19	17	-
<b>2010/11</b>	19	16	14	12	14	14	17	17	20	21	21	18	17	-
<b>2011/12</b>	17	14	12	13	14	14	17	17	19	19	21	19	16	-
<b>2012/13</b>	17	14	13	12	15	16	18	18	21	19	20	18	17	-
<b>2013/14</b>	17	15	13	12	13	15	17	18	20	22	21	20	17	-
<b>2014</b>	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19	-
<b>Média</b>	18	15	13	12	14	14	17	17	20	20	20	19		
<b>Histórico<sup>(1)</sup></b>	18	15	14	12	14	13	17	17	19	19	19	19		
<b>Precipitação, mm</b>														
<b>2009/10</b>	21	78	89	314	69	222	181	115	124	200	110	122	137	1413
<b>2010/11</b>	151	113	55	75	21	53	112	109	212	214	250	75	120	1115
<b>2011/12</b>	63	30	113	185	278	34	189	116	140	192	150	94	132	1340
<b>2012/13</b>	176	76	179	65	9	194	146	109	207	60	237	96	130	1221
<b>2013/14</b>	91	100	395	125	23	138	85	62	50	251	108	181	134	1320
<b>2014</b>	111	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	111	111
<b>Média</b>	102	79	166	153	80	128	143	102	147	183	171	114		
<b>Histórico<sup>(2)</sup></b>	92	112	113	91	79	134	156	126	152	198	162	150		

<sup>(1)</sup> Média histórica para temperatura do ar, referente à área experimental nos últimos 8 anos

<sup>(2)</sup> Média histórica para precipitação, referente à área experimental nos últimos 40 anos

#### 4.4.2 Delineamento, tratamentos, condução do experimento e amostragem do solo

O delineamento experimental empregado foi de blocos casualizados em esquema fatorial incompleto (3 x 3 + 1), com quatro repetições, a saber: Tratamento 1 (T1) – sem aplicação de P (controle absoluto); T2, T3 e T4 – aplicação de 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total, respectivamente na forma de SFT (granulado); T5, T6 e T7 – aplicação de 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total, respectivamente na forma de FNR (farelado) e; T8, T9 e T10 – aplicação de 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total, respectivamente na forma de TFM (pó). A composição química das diferentes fontes fosfatadas utilizadas encontra-se na Tabela 2. As quantidades utilizadas de cada fonte foram calculadas com base no teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total dos fertilizantes e aplicadas anualmente na superfície (em área total), por ocasião da semeadura da forrageira de inverno.

Tabela 2 – Composição química das fontes fosfatadas utilizadas durante o período experimental

Fonte de fósforo	Composição química				
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> solúvel em ácido cítrico a 20 g L <sup>-1</sup>		MgO	SiO <sub>2</sub>
		g kg <sup>-1</sup>			
<b>Superfosfato triplo</b>	460	380	130	-	-
<b>Fosfato natural reativo – Arad</b>	330	100	370	-	-
<b>Termofosfato magnesiano</b>	180	165	180	70	100

Durante o período primavera-verão a área experimental foi dividida em parcelas (52 unidades experimentais) correspondendo a uma área total e área útil de 425 m<sup>2</sup> e 273 m<sup>2</sup> (desprezando-se 2 m de bordadura) respectivamente, para cada parcela. No período outono-inverno, foi adotado o sistema de pastejo rotacionado em que durante os pastejos, os blocos foram divididos em piquetes (totalizando 4 piquetes com 5525m<sup>2</sup> cada). Os animais utilizados para o experimento corresponderam a 21 novilhas da raça holandesa, com peso médio de 250 kg, equivalente a 5,2 unidades animal (U.A.). Estas permaneceram em cada piquete de 4 -7 dias dependendo da espécie forrageira, respeitando-se as alturas de entrada (20 cm) e saída (10 cm) dos animais. A sequência dos cultivos das culturas no período experimental de 60 meses é apresentada na Tabela 3.

No ano de 2008, antes da instalação do experimento, foram aplicados 3 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico em toda a área experimental (2,21 ha), que foi a quantidade recomendada para elevar a saturação por bases para 60%. No decorrer do período experimental (de abril/2009 a abril/2014), com exceção do P, todos os demais nutrientes foram aplicados nas doses recomendadas, conforme os resultados de análise química de solos e exigência das culturas. Foram utilizados os fertilizantes cloreto de potássio (KCl) e ureia [CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>] como fonte de K e N às plantas, respectivamente, distribuídos na superfície do solo em área total. As sementes de soja foram inoculadas com estirpes selecionadas de *Bradyrhizobium japonicum* e tratadas com cobalto e molibdênio, nas doses comumente utilizadas na região (SBCS/NEPAR, 2017). Havendo necessidade, foram empregadas demais práticas agrônômicas (tratamento de sementes, controle de plantas daninhas, pragas e doenças) de modo a permitir o adequado crescimento e desenvolvimento das culturas.

No mês de abril aos 24, 36, 48 e 60 meses após o início do experimento, foram coletadas amostras compostas de terra das camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm, mediante uso de trado calador, retirando-se 12 amostras simples para formar uma amostra composta. Em seguida, as amostras de terra foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 40°C, destorroadas, moídas e peneiradas em peneira de malha de 2,0 mm, sendo então chamadas de terra fina seca em estufa (TFSE) conforme Pavan et al. (1992).

Tabela 3 - Sequência de eventos das culturas no período experimental: época de semeadura, espaçamento entre linhas e densidade de semeadura, cultivar ou híbrido, aporte de nutrientes via adubação (kg ha<sup>-1</sup>) e manejo de cobertura (forragens) ou colheita (grãos).

Cultura	Época de semeadura	Espaçamento entre linhas e densidade de semeadura	Cultivar ou Híbrido	Aporte de nutrientes N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> )	Manejo de cobertura (forragens) e colheita (grãos)
<b>Aveia preta (2009)</b>	Abril	0,17 cm e 250 sementes m <sup>-2</sup>	IAPAR-61	26-00-26 <sup>(1)</sup>	Dessecação <sup>(4)</sup> 21 dias após a retirada dos animais da área
<b>Milho (2009/2010)</b>	Setembro	0,80 m e 5 sementes m <sup>-1</sup>	30F53	75-00-75 <sup>(1)</sup>	Abril/2010
<b>Azevém (2010)</b>	Abril	0,17 cm e 450 sementes m <sup>-2</sup>	FABC-1 e Barjumbo	50-00-50 <sup>(1)</sup>	Dessecação <sup>(4)</sup> 28 dias após a retirada dos animais da área
<b>Soja (2010/2011)</b>	Novembro	0,40 m e 16 sementes m <sup>-1</sup>	Dom Mario 5.81	00-00-60 <sup>(2)</sup>	Março/2011
<b>Aveia preta (2011)</b>	Abril	0,17 cm e 250 sementes m <sup>-2</sup>	IAPAR-61	50-00-50 <sup>(1)</sup>	Dessecação <sup>(4)</sup> 21 dias após a retirada dos animais da área
<b>Milho (2011/2012)</b>	Setembro	0,80 m e 5 sementes m <sup>-1</sup>	30F53	75-00-75 <sup>(1)</sup>	Abril/2012
<b>Azevém (2012)</b>	Abril	0,17 cm e 450 sementes m <sup>-2</sup>	FABC-1 e Barjumbo	50-00-50 <sup>(1)</sup>	Dessecação <sup>(4)</sup> 4 dias após a retirada dos animais da área
<b>Soja (2012/2013)</b>	Novembro	0,40 m e 16 sementes m <sup>-1</sup>	BMX-Apolo	00-00-60 <sup>(2)</sup>	Abril/2013
<b>Aveia preta (2013)</b>	Abril	0,17 cm e 250 sementes m <sup>-2</sup>	IAPAR-61	40-00-40 <sup>(1)</sup>	Dessecação <sup>(4)</sup> 21 dias após a retirada dos animais da área
<b>Milho (2013/14)</b>	Setembro	0,80 m e 5 sementes m <sup>-1</sup>	30F53	176 <sup>(3)</sup> -00-90 <sup>(2)</sup>	Abril/2014

<sup>(1)</sup>Formulado NPK

<sup>(2)</sup>K<sub>2</sub>O na forma de Cloreto de potássio (KCl)

<sup>(3)</sup>N na forma de ureia [CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]

<sup>(4)</sup>Dessecação por meio de herbicida *glyphosate* (1500 g ha<sup>-1</sup> do i.a.).

#### 4.4.3 Determinações laboratoriais e análises estatísticas

As amostras de terra fina seca em estufa (TFSE) foram analisadas visando determinar P em extratos de terra obtidos com o extrator de Mehlich-1 [0,05 mol L<sup>-1</sup> ácido clorídrico (HCl) + 0,025 mol L<sup>-1</sup> ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)], e pela resina trocadora de íons (RTI) [Amberlite IRA-410 e Amberlite IRA-120]. As determinações do P disponível no solo foram realizadas conforme os procedimentos sugeridos por Pavan et al. (1992). As concentrações de P disponíveis também foram estimadas para a camada de 0-10 cm (com base na média ponderada entre as camadas de 0-5 e 5-10 cm) e a camada de 0-20 cm (com base na média ponderada entre 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm).

Os resultados de rendimento de grãos das culturas de milho (2011/12) e soja (2012/13) foram relacionados com os valores de concentrações de P no solo, determinados pelos extratores Mehlich-1 e RTI. Buscando estabelecer a estimativa de teores críticos de P, faixas de fertilidade no solo e doses de fertilizantes fosfatados para a utilização em SIPA.

Ainda, os resultados foram submetidos à análise estatística univariada de acordo com o modelo de experimento em blocos casualizados em esquema fatorial incompleto. Nos casos de F significativo ( $p < 0,05$ ), foi aplicado o teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). A Equação 1 mostra o modelo estatístico utilizado para a análise de variância (ANOVA). Todas as análises estatísticas foram realizadas mediante uso do programa SAS Versão 9.2 (SAS, 2010).

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + F_j + D_k + P_l + (FD)_{jk} + (FP)_{jl} + (DP)_{kl} + (FDP)_{jkl} + E_{ijkl} \quad (1)$$

onde:

$\mu$  = média geral do experimento;

$B$  = blocos ( $i = 1, 2, 3, 4$ );

$F$  = fontes fosfatadas ( $j = 1, 2, 3$ );

$D$  = doses de  $P_2O_5$  total ( $k = 1, 2, 3, 4$ );

$P$  = períodos de avaliação ( $l = 1, 2, 3, 4$ ) e;

$E$  = erro experimental.

## 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.5.1 Concentrações de fósforo no solo a longo prazo por diferentes métodos de extração

Houve interações entre os tratamentos (fontes e doses de P) e períodos de avaliação para as concentrações de P disponível pelo extrator Mehlich-1 (PM1) e pela RTI (PRTI) (Tabela 4). Considerando as fontes estudadas, o FNR apresentou maiores concentrações de PM1 na dose  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  total, aos 48 meses de avaliação, na camada de 0-5 cm ( $44,4 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Maiores concentrações de PM1 foram observadas na dose de  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  total aos 36 meses nas camadas de 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm, nas concentrações de 12,5; 6,4; 9,3 e  $5,9 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, respectivamente (Figura 1).

Para a solubilização de FNR, uma das condições favoráveis é seu contato em meio ácido (NOVAIS & SMYTH, 1999). A liberação de exsudatos de ácidos orgânicos estimulado pelo pastejo e o efeito acidificante da rizosfera (CARVALHO et al., 2010), pode ter otimizado a solubilização das partículas de FNR e, conseqüentemente, resultou em maiores concentrações de PM1. Ainda, os fosfatos naturais de origem sedimentar (e.g. Arad) apresentam estrutura cristalina pobremente consolidada e alta substituição isomórfica, o que lhes confere elevada

reatividade e, portanto, sendo eficientes no uso para aplicação direta em superfície, como fertilizante para produção de culturas (SANYAL & DATTA, 1991).

No entanto, em solos onde foram aplicados fosfatos de rocha, o extrator de Mehlich-1 normalmente extrai quantidades superestimadas de P. Isso se deve ao caráter ácido desse extrator, que pode dissociar formas de P ligado a Ca dessas fontes, sendo pouco disponíveis para as plantas a curto prazo (CORRÊA et al., 2008; SCHLINDWEIN & GIARELLO, 2008; SOUZA et al., 2014). Outro fator que também pode ter implicado na superestimativa de P, pode estar relacionado com o tempo de experimentação. As condições do solo estudado, no decorrer do período experimental ( $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  5,0 a 6,2), enquadram-se em uma faixa que favorece, ao longo do tempo, a solubilização de P (CHIEN, 2011).

O uso de diferentes fontes fosfatadas não influenciou as concentrações de PRTI na camada de 0-5 cm (Tabela 4). Porém, para a mesma camada de solo, a aplicação da dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total aumentou as concentrações de PRTI, não havendo diferenças entre os períodos de avaliação. A aplicação de SFT na dose de 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total apresentou maiores concentrações de PRTI aos 48 meses (27,3; 19,7 e 10,1 mg dm<sup>-3</sup>) nas camadas 5-10, 10-15 e 15-20 cm, e aos 36 meses na camada de 20-30 cm (7,3 mg dm<sup>-3</sup>), não havendo diferença entre as doses para esta última (Figura 2).

Tabela 4 - Valores de F referentes as concentrações de P para os extratores Mehlich-1 e resina trocadora de íons (RTI) após 24, 36, 48 e 60 meses de avaliação.

Fator de Variação	Camadas do solo (cm)						
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	0-10	0-20
	<b>P M1</b>						
<b>Fonte<sup>1</sup></b>	136.36**	9.31**	3.79*	3.62*	3.12*	124.44**	101.89**
<b>Dose<sup>2</sup></b>	235.96**	25.09**	34.03**	4.84**	2.82*	321.33**	279.07**
<b>Fonte x Dose</b>	29.12**	6.30**	3.34**	0.67 <sup>NS</sup>	3.42**	19.56**	15.41**
<b>Períodos<sup>3</sup></b>	29.35**	126.94**	109.80**	262.22**	207.96**	132.33**	238.51**
<b>Fonte x Períodos</b>	2.82*	3.47**	1.93 <sup>NS</sup>	9.73**	6.48**	2.28*	1.25 <sup>NS</sup>
<b>Dose x Períodos</b>	2.83**	1.94 <sup>NS</sup>	10.16**	4.40**	7.97**	5.91**	4.23**
<b>Fonte x Dose x Períodos</b>	0.81 <sup>NS</sup>	2.93**	2.32**	2.34**	3.94**	0.94 <sup>NS</sup>	0.80 <sup>NS</sup>
	<b>P RTI</b>						
<b>Fonte<sup>1</sup></b>	0.37 <sup>NS</sup>	3.46*	2.94 <sup>NS</sup>	5.57*	0.06 <sup>NS</sup>	1.84 <sup>NS</sup>	3.36 <sup>NS</sup>
<b>Dose<sup>2</sup></b>	50.20**	14.66**	5.08**	4.89*	0.72 <sup>NS</sup>	64.79**	51.96**
<b>Fonte x Dose</b>	0.58 <sup>NS</sup>	1.67 <sup>NS</sup>	3.63**	4.10**	1.16 <sup>NS</sup>	0.43 <sup>NS</sup>	1.47 <sup>NS</sup>
<b>Períodos<sup>3</sup></b>	4.68**	13.20**	31.52**	12.28**	23.16**	4.38**	6.18**
<b>Fonte x Períodos</b>	0.76 <sup>NS</sup>	4.10**	3.28**	6.70**	1.38 <sup>NS</sup>	1.63 <sup>NS</sup>	1.64 <sup>NS</sup>
<b>Dose x Períodos</b>	2.57*	4.10**	1.27 <sup>NS</sup>	3.46**	4.04**	2.00*	1.11 <sup>NS</sup>
<b>Fonte x Dose x Períodos</b>	0.73 <sup>NS</sup>	1.75*	2.18**	1.83*	0.89 <sup>NS</sup>	0.74 <sup>NS</sup>	1.07 <sup>NS</sup>

<sup>1</sup>Fonte: três fontes fosfatadas (superfosfato triplo – SFT, fosfato natural reativo – FNR e termofosfato magnésiano – TFM); <sup>2</sup>Dose: quatro doses de P (0, 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total); <sup>3</sup>Períodos de avaliação dos atributos do solo: 24, 36, 42 e 60 meses após o início do experimento. \*P<0.05. \*\*P<0.01. NS: não significativo.

Portanto, a extração de P pela RTI não foi particularmente afetado pelas formas de P ligado a Ca (fato pertinente quando se da aplicação de fosfatos naturais) na camada de 0-5 cm,

dado o efeito tamponante da suspensão a um pH ligeiramente inferior ao neutro e a presença de íons de bicarbonato (RAIJ, 2011). Resultados semelhantes também foram encontrados por Silva & Raij (1999); Schlindwein & Gianello (2008) e Galetto et al. (2014b). Porém, nas camadas subsuperficiais do solo, a aplicação de fosfato acidulado (SFT) em altas doses resultou em maior disponibilidade de P no solo a longo prazo.

Para ambos os métodos de extração de P no solo, aumento nas concentrações desse nutriente foram observados no perfil do solo a longo prazo, mesmo na ausência da aplicação de fontes e doses fosfatadas (controle absoluto) (Figura 1 e 2). O sistema de manejo do solo pode contribuir para o enriquecimento de P no perfil. Em sistemas conservacionistas, muitos fatores contribuem para o aumento do P disponível em subsuperfície como: alto teor de argila, teor de matéria orgânica do solo, adubação, ciclagem de nutrientes, ausência de erosão e sistema de plantio direto consolidado (ZIBILSKÉ; BRADFORD; SMART, 2002; SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008; MORAES et al., 2014), fatores que foram observados ao longo do tempo em SIPA.

Ainda, a presença dos animais pode contribuir o aumento de P no perfil do solo devido: (i) a maior liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, auxiliando na redução de sítios de adsorção de fosfatos no solo (CARVALHO et al., 2010); (ii) a adição de resíduos animais (fezes e urina) que contribui com 30 a 40% das concentrações de P do solo (HAYNES & WILLIAMS, 1993) e; (iii) ao pastejo que favorece o crescimento das raízes e, assim, promove a formação de bioporosidade, levando à migração de P para as camadas mais profundas do solo (SOUZA et al., 2009; COSTA et al., 2014).

#### **4.5.2 Avaliação da disponibilidade de fósforo em SIPA mediante aplicação anual de fosfatos em superfície**

As concentrações de PM1 aumentaram linearmente nas camadas de 0-5, 0-10 e 0-20 cm devido a aplicação de SFT, FNR e TFM ao longo do tempo (Figura 3). Para essas camadas o incremento foi maior mediante ao uso de doses mais elevadas de FNR. Este fato evidenciou a alta capacidade de extração de P ligado a Ca do extrator Mehlich-1 (SOUZA et al., 2014), superestimando as concentrações de P disponível e, pode subestimar esse nutriente em solo rico em argila oxídrica. Ainda, tem sido observado que o pH da solução de Mehlich-1 (em torno de

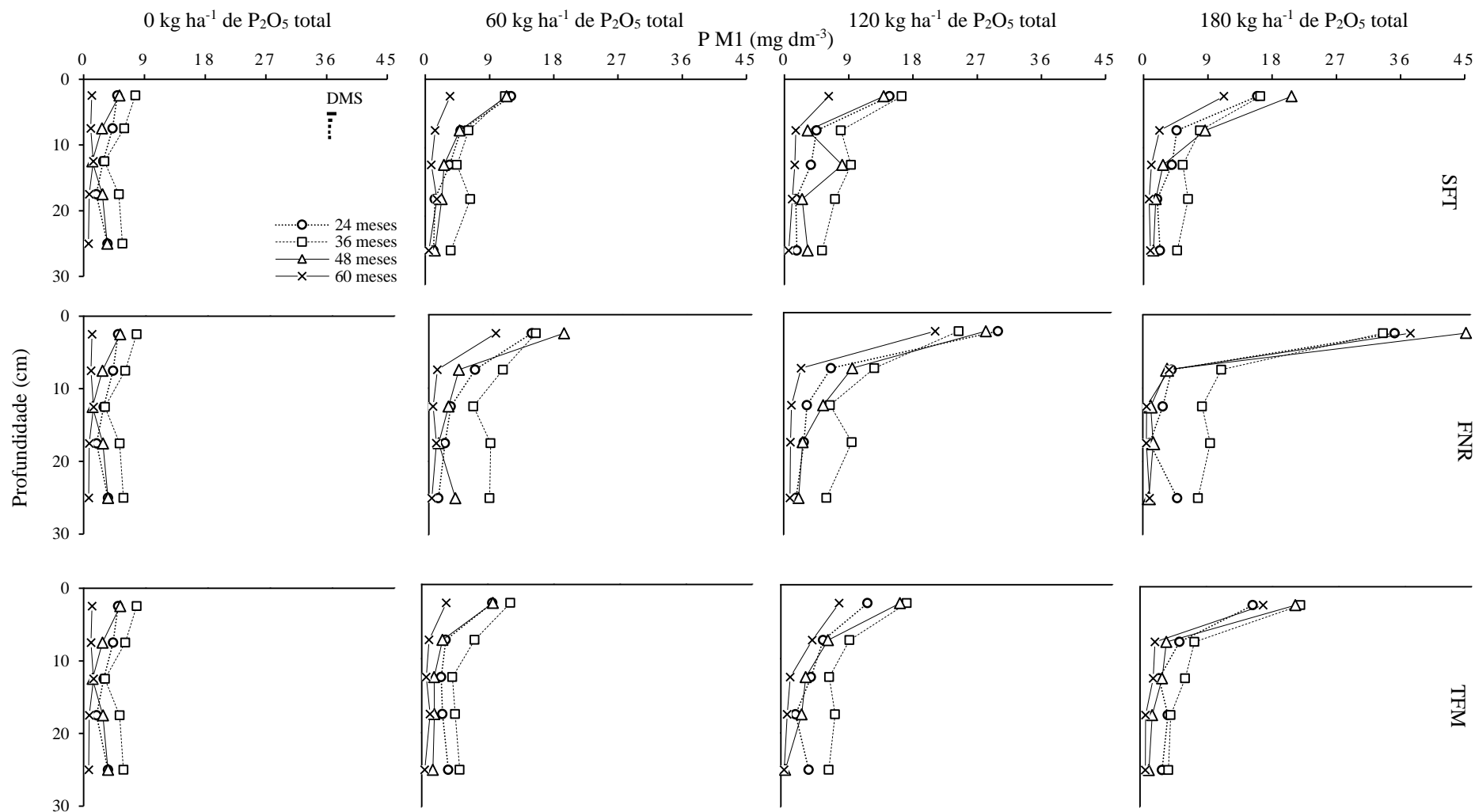


Figura 1 - Concentrações de fósforo disponível (Mehlich-1) no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo - FNR e termofosfato magnésiano - TFM) e doses (0 kg ha<sup>-1</sup>, 60 kg ha<sup>-1</sup>, 120 kg ha<sup>-1</sup> e 180 kg ha<sup>-1</sup>) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições.

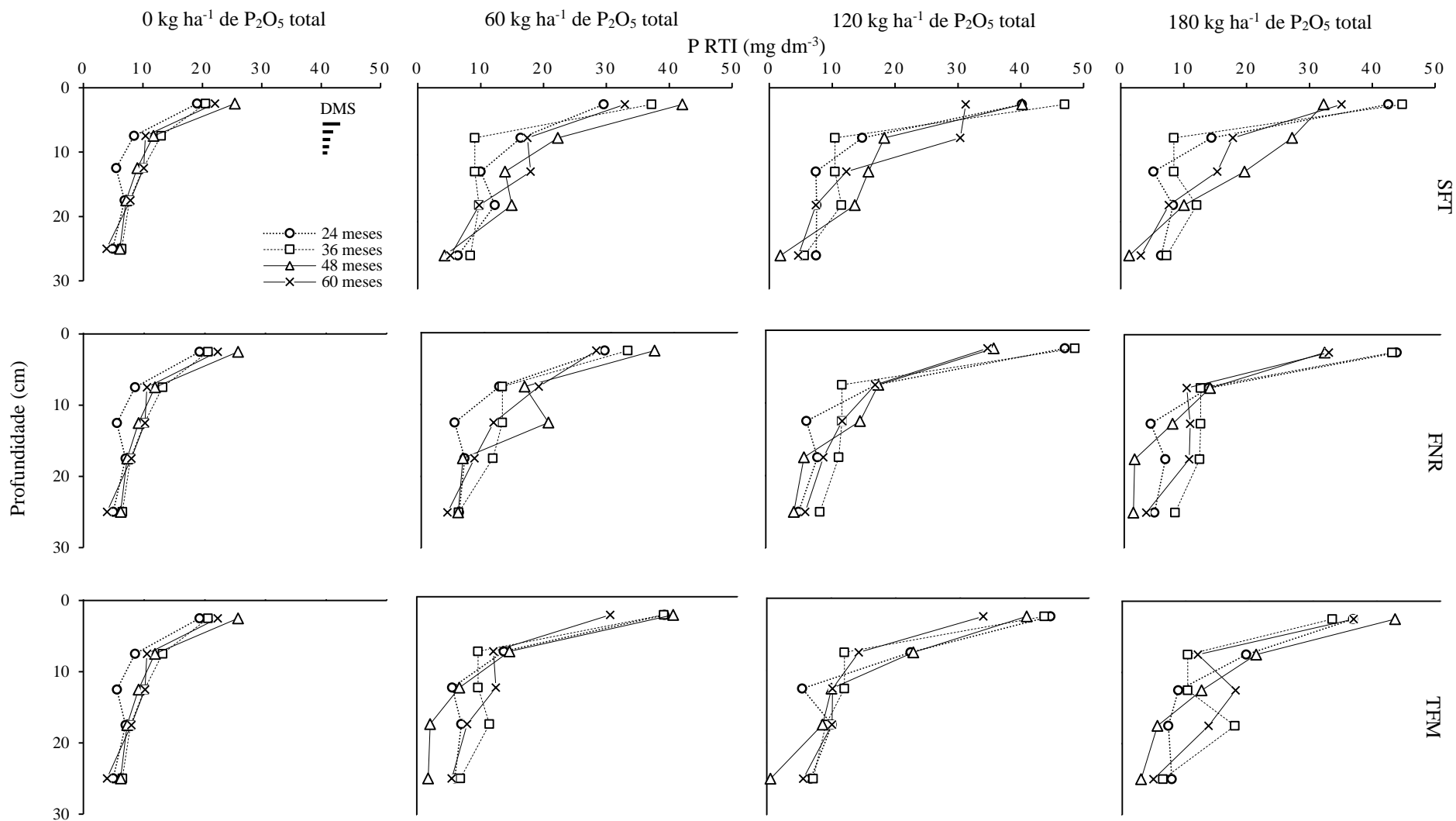


Figura 2 - Concentração de fósforo disponível [resina trocadora de íons (RTI)] no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo - FNR e termofosfato magnésiano - TFM) e doses (0 kg ha<sup>-1</sup>, 60 kg ha<sup>-1</sup>, 120 kg ha<sup>-1</sup> e 180 kg ha<sup>-1</sup>) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições.



2,0) não seria adequado para a solubilização de fosfatos ligados a Fe e Al e favorável a extração de fosfatos ligados a Ca, mesmo em formas não lábeis (RAIJ, 2011).

No entanto, as concentrações de P em solo tratado com fertilizantes solúveis em água (SFT) e ácido cítrico mostraram incrementos similares, aumentando de acordo com a dose (Figura 3). Isto mostra que, embora haja deficiências do extrator (SCHLINDWEIN & GIANELLO, 2008; GALETTO et al., 2014b), com a aplicação de SFT e TFM pode não ocorrer problemas à interpretação de P disponível para o método oficial do Paraná.

Para a extração com RTI, as concentrações de P disponível tiveram um aumento quadrático com a aplicação de doses de P nas camadas de 0-5, 0-10 e 0-20 cm durante o período de avaliação, não havendo diferença entre as fontes utilizadas (Figura 4). As máximas concentrações de PRTI aos 24, 36, 48 e 60 meses na camada de 0-5 cm (46,2; 47,7; 42,8 e 36,3 mg dm<sup>-3</sup>), 0-10 cm (27,4; 34,5; 32,1 e 24,6 mg dm<sup>-3</sup>) e 0-20 cm (19,1; 19,1; 19,1 e 21,1 mg dm<sup>-3</sup>) foram alcançadas nas doses 107, 105, 85 e 175 kg ha<sup>-1</sup> de P na camada de 0-5 cm; 150, 190, 150 e 166 kg ha<sup>-1</sup> de P na camada de 0-10 cm; e 125, 125, 175 e 116 kg ha<sup>-1</sup> de P na camada 0-20 cm, respectivamente para os períodos avaliados.

Pode-se afirmar que a RTI apresenta vantagens em relação ao extrator oficial para o estado do Paraná (Mehlich-1) pois, o processo de extração assemelha-se à ação das raízes das plantas (RAIJ, 2011). Além disso, não ocorre perda de força de extração do P em solos com alto teor de argila, não há dissolução química de constituintes do solo e evita superestimação das concentrações disponíveis no solo que receberam adubação de fosfatos naturais (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). Desta maneira, a extração de P pela RTI mostrou-se como uma técnica de avaliação de P potencialmente mais sensível para prever a disponibilidade em solos tratados com fertilizante fosfatado solúveis e insolúveis em água, em SIPA.

As concentrações de P disponível na camada de 0-10 cm, nos solos tratados com SFT, FNR e TFM foram, em média 30, 28 e 33% e; 29, 30 e 31%, maiores que as encontradas nas camadas de 0-20 cm para os extratores Mehlich-1 e RTI, respectivamente. Este gradiente vertical de P no solo resultam dos seguintes fatores: (i) as fontes fosfatadas foram aplicadas na superfície; (ii) menor mobilidade e retenção em formas não lábeis nas superfícies de óxidos de Fe e Al, presentes em expressiva quantidade em solos altamente intemperizados (VIEIRA et al., 2012) e; (iii) em sistema plantio direto, o distúrbio causado no solo ocorre somente na linha de semeadura (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008), favorecendo uma maior concentração de nutrientes na camada de 0-10 cm (SCHLINDWEIN & GIANELLO, 2008).

Não foi possível estabelecer uma calibração para os métodos de determinação de P em solo tratado com fosfatos aplicados anualmente em SIPA. Para a construção de um método

de análise do solo é necessário relacionar o teor do elemento do solo, utilizando-se de um método de avaliação (análise do solo) com características da planta (rendimento da cultura de grãos) (SCHLINDWEIN & GIANELLO, 2008; VIEIRA et al., 2012). Para o dado experimento, não houve respostas do rendimento das culturas à disponibilidade de P, para os períodos de maiores concentrações no solo (36 e 48 meses) (Figuras 5).

Nas recomendações para o estado do Paraná, mesmo em nível alto de P no solo, com base na produtividade esperada, deve-se aplicar em média, 100,5 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para o milho e; 70,5 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para a soja. Também, é indicado que em sistemas de rotação que inclui gramíneas de outono-inverno seguido de soja na primavera-verão, quando as concentrações de P estiver em nível alto ou superior, a adubação fosfatada poderá ser dispensada na soja (SBCS/NEPAR, 2017). Porém, não há recomendações para outras culturas que possam estar inseridas em sistemas de rotação que permitiriam a redução ou dispensa de adubação fosfatada.

Diante disso, cabe o questionamento sobre a necessidade de aplicação de fertilizantes fosfatados nesses casos. As concentrações de PM1 para o início do experimento (abril/2009) encontravam-se em nível baixo no solo [3 a 6 mg dm<sup>-3</sup>, segundo SBCS/NEPAR (2017)]. Ao longo de cinco anos, esses níveis atingiram patamares considerados altos (SBCS/NEPAR, 2017), levando a ausência de um gradiente de resposta das culturas avaliadas (Figuras 5). Nessas condições, o rendimento médio de grãos foi de 11.682 kg ha<sup>-1</sup> para o milho e 4.845 kg ha<sup>-1</sup> para a soja, resultados estes acima da produtividade média do Estado no período experimental (CONAB, 2014). Neste caso, as recomendações de adubação fosfatada para o Estado do Paraná, levam a um consumo exacerbado deste insumo, sem que houvesse ganhos em produtividade por parte das culturas.

Em sistemas de produção como o SIPA, o aumento das concentrações de matéria orgânica do solo, decorrente do cultivo de pastagem a longo prazo (ANGHINONI et al., 2013), pode resultar em diminuição do nível crítico de P. Esse efeito pode ser atribuído ao potencial do uso e manejo na relação solo-planta-animal e, conseqüentemente, nos critérios de adubação (SOUSA & LOBATO, 2004). Além disso, os animais representam agentes aceleradores da ciclagem de nutrientes, resultando em uma maior biodisponibilidade de P em SIPA, sendo atribuída, principalmente, a deposição de excretas. As concentrações de P disponível oriundas desses sistemas, podem ser 32% maiores comparado aos sistemas convencionais. Isto representa formas de P mais prontamente disponíveis as forrageiras e às culturas subsequentes (BALBINOT JÚNIOR et al., 2009; DEISS et al., 2016).

No entanto, pouco é explorado sobre como essas entradas de nutrientes, decorrentes dos SIPA, podem ser contabilizados para recomendações de adubação mais eficientes do ponto

de vista da sustentabilidade. Estratégias de adubação fosfatada que incluam a aplicação anual de fosfatos em superfície, podem garantir a manutenção da fertilidade do solo, podendo assegurar altos níveis de P em adição aos resíduos vegetais e animais depositados ao solo.

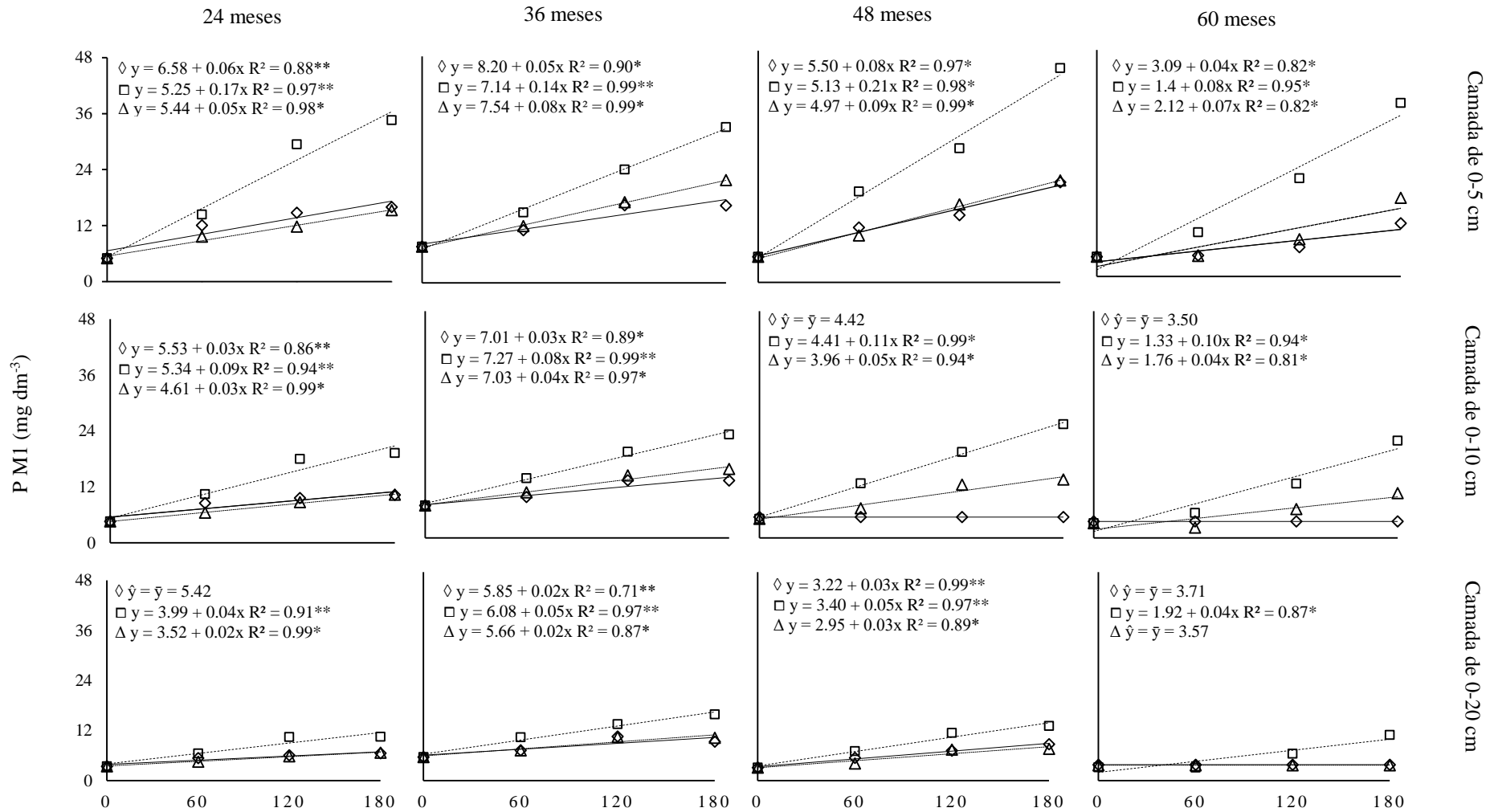


Figura 3 - Concentrações de fósforo disponível (Mehlich-1) no solo tratado com fontes [(◇) superfosfato triplo, (□) fosfato natural reativo e (Δ) termofosfato magnésiano] e doses (0 kg ha<sup>-1</sup>, 60 kg ha<sup>-1</sup>, 120 kg ha<sup>-1</sup> e 180 kg ha<sup>-1</sup>) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Pontos são média de quatro repetições. \*\*P<0.01 e \* P<0.05.

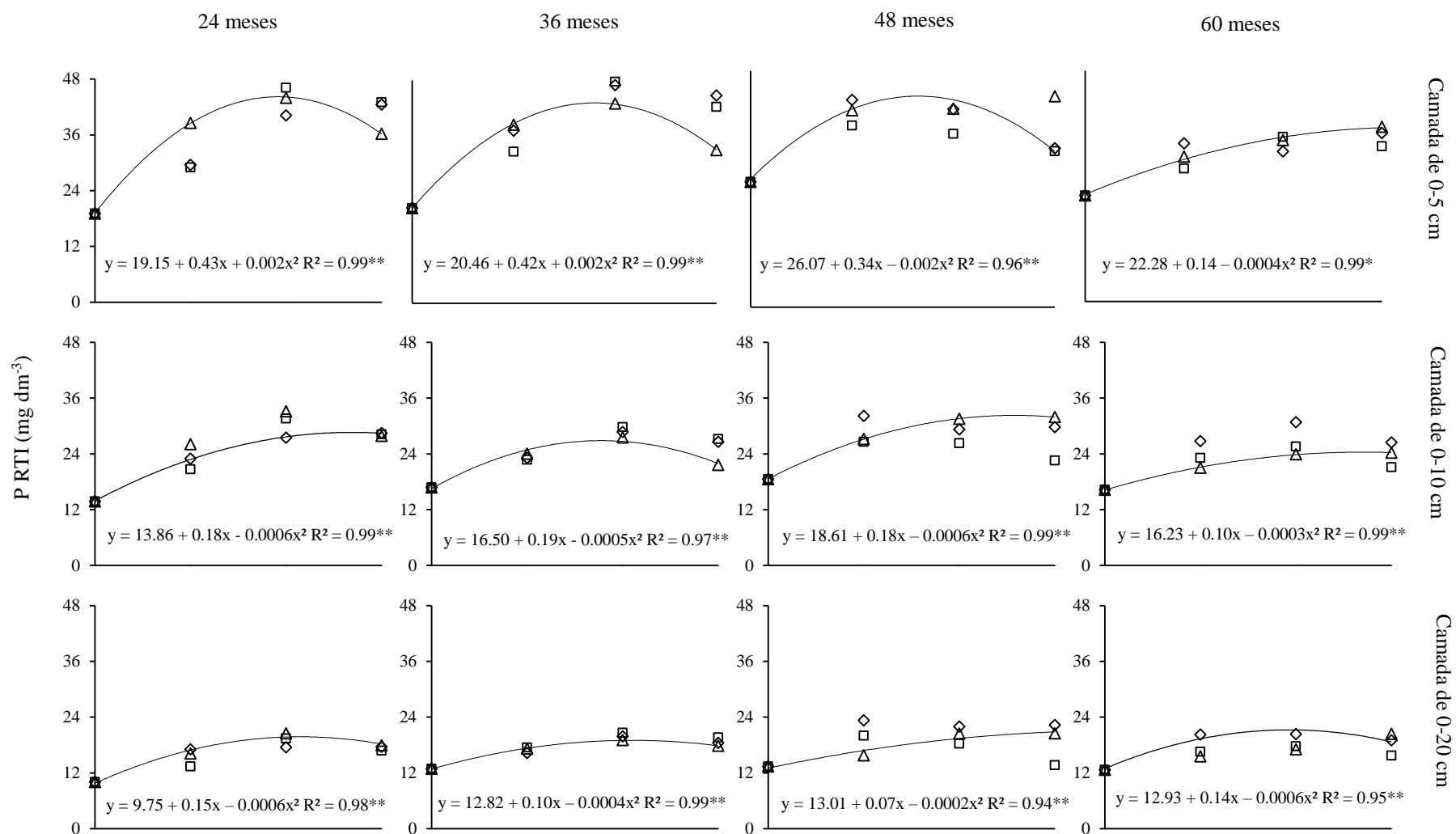


Figura 4 - Concentrações de fósforo disponível [resina trocadora de íons (RTI)] no solo tratado com fontes [( $\diamond$ ) superfosfato triplo, ( $\square$ ) fosfato natural reativo e ( $\Delta$ ) termofosfato magnesiano] e doses de P (0, 60, 120e 180  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Pontos são média de quatro repetições. \*\* $P < 0.01$  e \*  $P < 0.05$ .

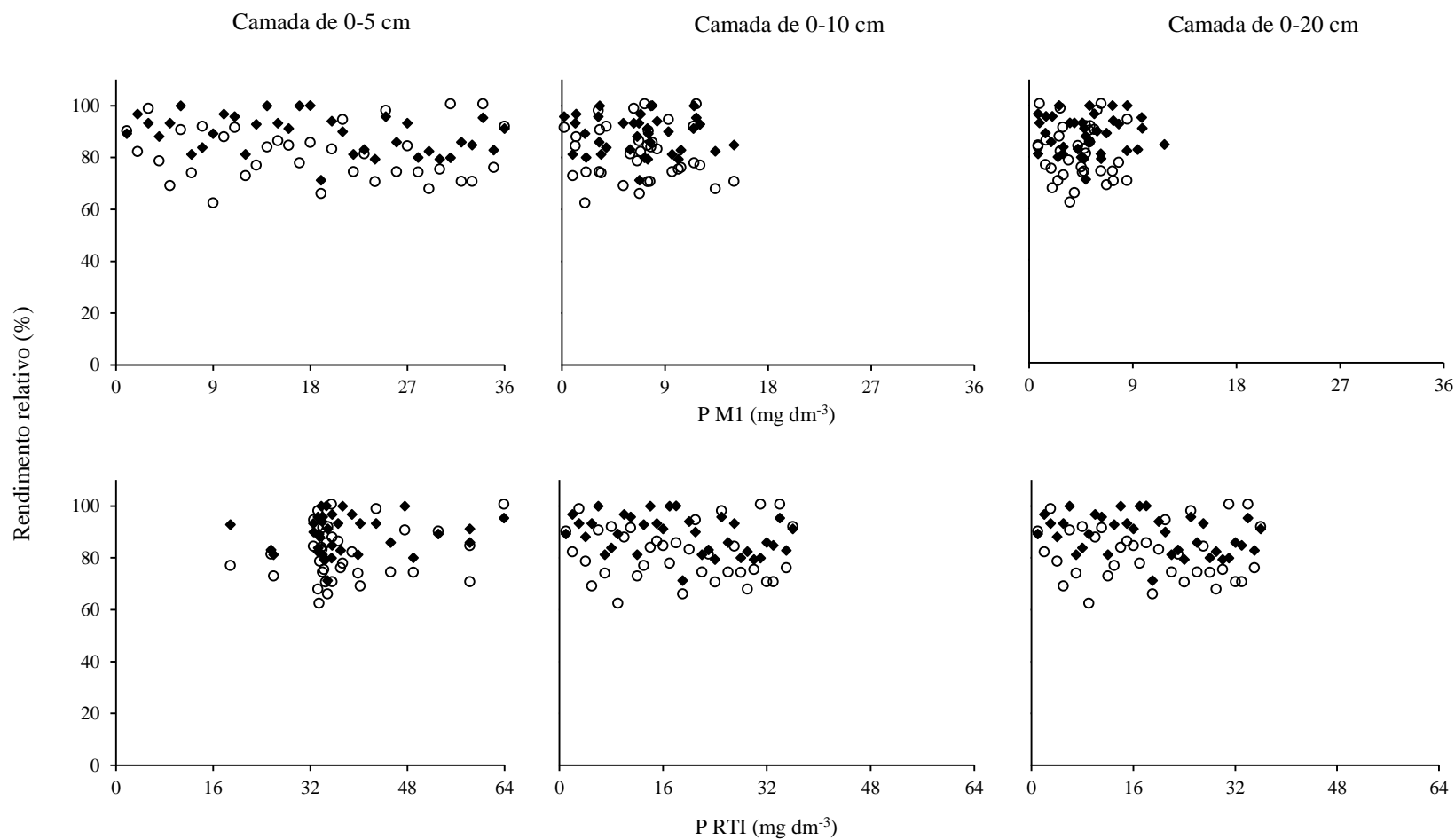


Figura 5 - Rendimento relativo (%) das culturas de grãos [ (◆) milho (*Zea mays* L.) e (○) soja (*Glycine max* L.)] em resposta a concentração de fósforo disponível [Mehlich-1 (PM1) e resina trocadora de íons (P RTI)] no solo tratado com fontes (superfósforo triplo, fósforo natural reativo e termofósforo magnesiano) e doses (0 kg ha<sup>-1</sup>, 60 kg ha<sup>-1</sup>, 120 kg ha<sup>-1</sup> e 180 kg ha<sup>-1</sup>) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária.

#### 4.6 CONCLUSÕES

1. Maiores concentrações de fósforo foram observadas com a aplicação de fosfato natural reativo – Arad a longo prazo, pelo extrator Mehlich-1, porém apresentando valores superestimados de P no solo.

2. O uso de diferentes fontes fosfatadas não influenciou as concentrações de fósforo pela extração com resina trocadora de íons, mostrando-se como uma técnica adequada para avaliação de P no solo em sistema integrado de produção agropecuária, decorrente da aplicação de fosfatos solúveis e insolúveis em superfície.

3. Altas concentrações de P no perfil do solo foram observadas a longo prazo em SIPA, devido ao efeito potencial do uso e manejo na relação solo-planta-animal.

4. A aplicação anual de fosfatos em superfície pode garantir a manutenção da fertilidade do solo e garantir níveis adequados de P em SIPA a longo prazo, em situação de solo adequadamente manejado em sistema conservacionista.

## 5. IMPACTOS A LONGO PRAZO DO SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO DECORRENTE DA APLICAÇÃO ANUAL DE FOSFATOS EM SUPERFÍCIE

### 5.1. RESUMO

O sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) consiste em uma estratégia de intensificação sustentável e, proporciona melhoria nos atributos químicos do solo. Dessa maneira, esses benefícios podem favorecer a aplicação de fosfatos solúveis e insolúveis em água promovendo maior efeito residual a longo prazo. O objetivo deste trabalho foi analisar os atributos químicos do solo, ao longo do tempo, decorrente a aplicação anual na superfície de fosfatos de diferentes solubilidades, por ocasião da semeadura de forrageiras anuais de inverno, em SIPA. O experimento foi instalado no município de Castro-PR, em abril/2009, em um Cambissolo Háptico argiloso. Foi empregado delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial incompleto ( $3 \times 3 + 1$ ), com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de três fontes de P [superfosfato triplo (SFT), fosfato natural reativo - Arad (FNR) e termofosfato magnésiano (TFM)] e três doses de P (60; 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup>), além do controle (sem adição de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Amostras de terra das camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm foram coletadas aos 24, 36, 48 e 60 meses após o início do experimento, os seguintes atributos químicos foram avaliados: pH, concentrações de Ca, Mg e K trocáveis no solo e saturação por bases (V%). A aplicação anual de TFM proporcionou, ao longo do tempo, aumento de pH, concentrações de Mg<sup>2+</sup> trocável e V%, em todas as camadas avaliadas. A renovação do sistema radicular, maior produção de ácidos orgânicos e o aporte de resíduos, decorrente do pastejo animal, favoreceram a melhoria dos atributos químicos do solo, ao longo do tempo.

**Palavra-chave:** agricultura sustentável. pastejo animal. fosfatos solúveis e insolúveis em água. adubação de sistema



## IMPACT ON LONG-TERM OF THE SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEM DUE TO ANNUAL APPLICATION OF SURFACE PHOSPHATES

### 5.2. ABSTRACT

The integrated crop-livestock system (ICLS) consists of a strategy of sustainable intensification and provides improvement in soil chemical attributes. Thus, these benefits may favor the application of soluble and insoluble phosphates in water, promoting a greater residual effect in long-term. The aim of this work was to analyze the chemical attributes of the soil, over time, resulting from the annual application to the surface of phosphates of different solubilities, during the sowing of annual winter forages, in an ICLS. The experiment was installed in the municipality of Castro, Paraná, Brazil, in April / 2009, in a Typic Distrudept. A randomized complete block design (3 x 3 +1) with four replications was used. The treatments consisted of three sources of P [triple superphosphate (TSP), rock phosphate - Arad (RP) and magnesium thermophosphate (MTP)] and three doses of total P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (60, 120 and 180 kg ha<sup>-1</sup>) beyond control (without addition of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Soil samples from the 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 and 20-30 cm layers were collected at 24, 36, 48 and 60 months after the start of the experiment, the following chemical attributes were evaluated: pH, concentrations of exchangeable Ca, Mg and K in the soil and base saturation (BS%). The annual application of TFM provided, over time, pH increase, exchangeable Mg<sup>2+</sup> concentration and V%, in all the evaluated layers. Renewal of the root system, increased production of organic acids and the contribution of residues, due to animal grazing, favored the improvement of soil chemical attributes over time.

**Keyword:** sustainable agriculture. grazing animal. phosphates soluble and insoluble in water. anticipated fertilization

### 5.3. INTRODUÇÃO

O sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) é uma alternativa para a intensificação sustentável, pois este reúne várias benesses no tocante à sustentabilidade da produção de alimentos (LEMAIRE et al., 2014; MORAES et al., 2014). Neste sistema, a rotação de cultivo entre pastagens anuais, destinadas à alimentação animal, e culturas destinadas à produção de grãos, é uma estratégia de elevada importância no país, pois permite maior produção de fibras, energia e alimentos por unidade de área.

Em sua maioria, os solos das regiões tropicais e subtropicais são naturalmente ácidos, apresentando baixa saturação por bases ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ ) e elevada saturação por alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) (HAVLIN et al., 2014), sendo estes fatores os mais limitantes à produtividade. Porém, mudanças significativas nos atributos químicos do solo, quando estes são manejados com a rotação gramíneas - leguminosas em SIPA, têm sido observadas (MARTINS et al., 2016). A alta ciclagem biogeoquímica deste sistema contribui para reposição de nutrientes ao solo, através da decomposição de resíduos vegetais e animais. Além disso, o pastejo animal pode resultar em maior biomassa produzida, e dessa forma, promover a liberação de bases trocáveis, podendo aumentar, ao longo do tempo, o pH do solo (MARTINS et al., 2014a).

Após o controle da acidez do solo, outro fator limitante à produtividade das culturas tem sido as baixas concentrações de fósforo disponível (P) (NOVAIS & SMITH, 1999). A disponibilidade deste nutriente em SIPA tem sido pouco estudado, bem como as respostas que diferem de acordo com a forma e fonte de aplicação de fosfatos. A antecipação da adubação fosfatada tem mostrado maiores rendimentos quando da semeadura da cultura de outono-inverno (BOHAC; CAMARA; SEGATELLI, 2007; GALETTO et al., 2014a, b). Essa alternativa pode ser viável, pois há maior liberação de ácidos orgânicos em SIPA (CARVALHO et al., 2010), que podem complexar metais na solução do solo, liberando quantidades de fosfatos ligados a Al, Fe e Ca (BÜNEMANN & CONDRON, 2007).

O uso de fontes com elevada solubilidade, tal como o superfosfato triplo (SFT) pode ser facilmente transformada em formas não disponíveis à planta, além de apresentar reação de ácida no solo (CHIEN et al., 2011). Em contrapartida, a eficiência de fosfatos insolúveis em água, tais como fosfato natural reativo (FNR) e termofosfato magnésiano (TFM), tende a aumentar ao longo do tempo. Além disso, a reação no solo destas fontes fosfatadas, pode promover a redução de  $\text{H}^+$  na solução do solo, seja por dissociação da superfície dos colóides (BÜLL et al., 1997) ou, pelo consumo de prótons para a dissolução da partícula de fosfatos de cálcio (NOVAIS & SMITH, 1999), podendo levar ao aumento de pH do solo a longo prazo.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar os atributos químicos do solo, ao longo de 60 meses, decorrente a aplicação anual na superfície de fosfatos de diferentes solubilidades, por ocasião da semeadura de forrageiras anuais de inverno, em SIPA.

## 5.4. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.4.1 Localização, histórico da área, delineamento experimental, condução do experimento e amostragem de solo

A localização, histórico da área, delineamento e condução do experimento encontram-se descritos no item 4.4.1 e 4.4.2. Neste capítulo serão descritos os métodos específicos para o entendimento do assunto em questão.

### 5.4.2 Determinações laboratoriais e análises estatísticas

As amostras de TFSE foram analisadas visando determinar os atributos: (i) acidez ativa (pH) por potenciometria em solução de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ )  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ; (ii) acidez potencial (H + Al) por potenciometria em solução tampão SMP; (iii) Ca e Mg trocáveis obtidos em extratos de terra com solução de KCl  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ , sendo as concentrações determinadas por complexometria do EDTA e; (iv) K trocável obtido em extratos de terra com solução de Mehlich-1 e leitura por espectrofotometria de emissão em chama. Todas as determinações dos atributos químicos foram realizadas conforme os procedimentos sugeridos por Pavan et al. (1992). Para determinar a saturação por bases do solo foi considerado os teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e CTC pH 7,0 ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em cada período avaliado e para as diferentes camadas do solo (0-5, 5-10- 10-15, 15-20 e 20-30 cm), segundo a Equação 2:

$$V\% = \frac{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+) \times 100}{\text{CTC a pH 7,0}} \quad (2)$$

onde:

$V\%$  = saturação por bases do solo e;

$\text{CTC a pH 7,0} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + (\text{H} + \text{Al})$  em  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ .

Ainda, os resultados foram submetidos à análise estatística univariada de acordo com o modelo de experimento em blocos casualizados em esquema fatorial incompleto. Nos casos de F significativo ( $p < 0,05$ ), foi aplicado o teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). A Equação 3 mostra o modelo estatístico utilizado para a análise de variância (ANOVA). Todas as análises estatísticas foram realizadas mediante uso do programa SAS Versão 9.2 (SAS, 2010).

$$Y_{ijkl} = \mu + Bi + Fj + Dk + Pl + (FD)_{jk} + (FP)_{jl} + (DP)_{kl} + (FDP)_{jkl} + E_{ijkl} \quad (3)$$

onde:

$\mu$  = média geral do experimento;

$B$  = blocos ( $i = 1, 2, 3, 4$ );

$F$  = fontes fosfatadas ( $j = 1, 2, 3$ );

$D$  = doses de  $P_2O_5$  total ( $k = 1, 2, 3, 4$ );

$P$  = períodos de avaliação ( $l = 1, 2, 3, 4$ ) e;

$E$  = erro experimental.

## 5.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve interações entre os tratamentos e os períodos de avaliação para os valores de pH, concentrações de  $Mg^{2+}$  e  $K^+$ ; e V% nas diferentes camadas de solo analisadas. As concentrações de  $Ca^{2+}$  trocável no solo foram influenciadas somente pelas doses de  $P_2O_5$  total e períodos de avaliação (Tabela 5).

A aplicação anual da fonte TFM apresentou valores mais altos de pH do solo (pH 5,6 em média) na camada de 0-5 cm, sendo também influenciado pelas doses de P (Figura 6). O TFM contém silicatos de Mg que, quando aplicados em solos ácidos, reagem consumindo prótons e, elevam a concentração de hidroxila ( $OH^-$ ) na solução do solo, resultantes da reação de hidrólise. Dessa maneira, ocorrendo o aumento do pH do solo, além de reduzir a adsorção específica de íons fosfato, deixando o P mais disponível para as plantas (BÜLL et al., 1997; KORNDÖRFER et al., 1999).

Nas camadas subsuperficiais foi observado aumento substancial do pH no perfil do solo aos 60 meses de avaliação (Figura 6). Esse efeito ocorre como resultado da ação conjunta do aumento dos estoques de matéria orgânica do solo (complexação de cátions ácidos e descarboxilação de ânion orgânicos) (HAVLIN et al., 2014), do pastejo (maior volume de bioporos e migração de bases trocáveis) (MORAES et al., 2013), do resíduo de culturas (biomassa vegetal sobre o solo) e da deposição de fezes e urina (ligantes orgânicos) (CARVALHO et al., 2010).

As concentrações de  $Ca^{2+}$  trocável no solo foram maiores aos 48 meses para as camadas de 0-5, 10-15 e 15-20 cm, nas concentrações de 6,9; 4,4 e 2,5  $cmol_c dm^{-3}$ , respectivamente e aos 60 meses para as camadas de 5-10 e 20-30 cm, nas concentrações de 5,2 e 1,7  $cmol_c dm^{-3}$ , respectivamente (Figura 7), e foram influenciadas pelas doses de P. O aporte ocasionado pelas doses dos fertilizantes fosfatados (até 23,4; 36,0 e 72,0  $kg ha^{-1}$  de Ca oriundo

do SFT, FNR e TFM, respectivamente) podem ter induzido à alterações nas concentrações deste elemento no solo.

Tabela 5 - Valores de F referentes aos atributos químicos do solo pH (CaCl<sub>2</sub>), Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> e V% aos 24, 36, 48 e 60 meses de avaliação.

Fator de Variação	Camadas do solo (cm)				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30
	<b>pH (CaCl<sub>2</sub>)</b>				
Fonte <sup>1</sup>	8.83**	0.22 <sup>NS</sup>	0.02 <sup>NS</sup>	0.11 <sup>NS</sup>	0.20 <sup>NS</sup>
Dose <sup>2</sup>	29.96**	5.60**	4.77*	1.23 <sup>NS</sup>	1.60 <sup>NS</sup>
Fonte x Dose	2.36*	0.98 <sup>NS</sup>	1.53 <sup>NS</sup>	0.57 <sup>NS</sup>	0.80 <sup>NS</sup>
Períodos <sup>3</sup>	50.63**	123.59**	340.04**	256.09**	473.21**
Fonte x Períodos	1.87 <sup>NS</sup>	0.10 <sup>NS</sup>	0.39 <sup>NS</sup>	0.28 <sup>NS</sup>	0.47 <sup>NS</sup>
Dose x Períodos	0.84 <sup>NS</sup>	0.79 <sup>NS</sup>	0.23 <sup>NS</sup>	0.67 <sup>NS</sup>	0.51 <sup>NS</sup>
Fonte x Dose x Períodos	0.49 <sup>NS</sup>	0.37 <sup>NS</sup>	0.16 <sup>NS</sup>	0.21 <sup>NS</sup>	0.67 <sup>NS</sup>
	<b>Ca<sup>2+</sup></b>				
Fonte <sup>1</sup>	1.94 <sup>NS</sup>	0.60 <sup>NS</sup>	1.50 <sup>NS</sup>	1.56 <sup>NS</sup>	1.68 <sup>NS</sup>
Dose <sup>2</sup>	6.93**	16.85**	5.68**	8.05**	7.58**
Fonte x Dose	1.44 <sup>NS</sup>	0.48 <sup>NS</sup>	0.84 <sup>NS</sup>	1.78 <sup>NS</sup>	1.31 <sup>NS</sup>
Períodos <sup>3</sup>	11.64**	53.02**	52.39**	8.98**	8.44**
Fonte x Períodos	2.11 <sup>NS</sup>	0.52 <sup>NS</sup>	0.17 <sup>NS</sup>	1.16 <sup>NS</sup>	0.96 <sup>NS</sup>
Dose x Períodos	0.64 <sup>NS</sup>	1.89 <sup>NS</sup>	2.90 <sup>NS</sup>	1.90 <sup>NS</sup>	0.32 <sup>NS</sup>
Fonte x Dose x Períodos	0.50 <sup>NS</sup>	0.31 <sup>NS</sup>	0.77 <sup>NS</sup>	1.43 <sup>NS</sup>	0.62 <sup>NS</sup>
	<b>Mg<sup>2+</sup></b>				
Fonte <sup>1</sup>	8.32**	4.53*	0.37 <sup>NS</sup>	1.48 <sup>NS</sup>	0.32 <sup>NS</sup>
Dose <sup>2</sup>	7.59**	6.42**	4.56**	5.02**	0.24 <sup>NS</sup>
Fonte x Dose	2.76*	0.74 <sup>NS</sup>	0.62 <sup>NS</sup>	0.58 <sup>NS</sup>	0.44 <sup>NS</sup>
Períodos <sup>3</sup>	18.13**	90.14**	215.15**	248.28**	224.50**
Fonte x Períodos	0.63 <sup>NS</sup>	0.40 <sup>NS</sup>	3.45**	0.36 <sup>NS</sup>	0.34 <sup>NS</sup>
Dose x Períodos	3.22**	1.57 <sup>NS</sup>	0.52 <sup>NS</sup>	2.51*	0.38 <sup>NS</sup>
Fonte x Dose x Períodos	0.85 <sup>NS</sup>	0.53 <sup>NS</sup>	0.97 <sup>NS</sup>	0.48 <sup>NS</sup>	0.40 <sup>NS</sup>
	<b>K<sup>+</sup></b>				
Fonte <sup>1</sup>	0.35 <sup>NS</sup>	1.25 <sup>NS</sup>	2.12 <sup>NS</sup>	1.22 <sup>NS</sup>	0.49 <sup>NS</sup>
Dose <sup>2</sup>	0.10 <sup>NS</sup>	1.81 <sup>NS</sup>	5.96 <sup>NS</sup>	9.00 <sup>NS</sup>	10.66 <sup>NS</sup>
Fonte x Dose	0.31 <sup>NS</sup>	0.48 <sup>NS</sup>	1.60 <sup>NS</sup>	1.02 <sup>NS</sup>	1.08 <sup>NS</sup>
Períodos <sup>3</sup>	25.15**	3.58*	2.23 <sup>NS</sup>	12.36**	4.09**
Fonte x Períodos	0.18 <sup>NS</sup>	0.97 <sup>NS</sup>	0.72 <sup>NS</sup>	0.93 <sup>NS</sup>	0.31 <sup>NS</sup>
Dose x Períodos	0.53 <sup>NS</sup>	1.70 <sup>NS</sup>	2.16 <sup>NS</sup>	3.34 <sup>NS</sup>	4.53 <sup>NS</sup>
Fonte x Dose x Períodos	0.21 <sup>NS</sup>	0.67 <sup>NS</sup>	0.72 <sup>NS</sup>	0.97 <sup>NS</sup>	0.69 <sup>NS</sup>
	<b>V%</b>				
Fonte <sup>1</sup>	10.00**	0.32 <sup>NS</sup>	1.21 <sup>NS</sup>	2.80 <sup>NS</sup>	1.18 <sup>NS</sup>
Dose <sup>2</sup>	35.96**	7.63**	13.31**	18.54**	6.28**
Fonte x Dose	2.75*	0.10 <sup>NS</sup>	1.66 <sup>NS</sup>	2.22 <sup>NS</sup>	1.25 <sup>NS</sup>
Períodos <sup>3</sup>	7.88**	135.95**	315.35**	184.45**	144.79**
Fonte x Períodos	2.02 <sup>NS</sup>	0.85 <sup>NS</sup>	1.82 <sup>NS</sup>	0.27 <sup>NS</sup>	0.89 <sup>NS</sup>
Dose x Períodos	2.38*	2.70*	3.77**	1.28 <sup>NS</sup>	1.07 <sup>NS</sup>
Fonte x Dose x Períodos	0.67 <sup>NS</sup>	0.39 <sup>NS</sup>	1.13 <sup>NS</sup>	1.02 <sup>NS</sup>	0.62 <sup>NS</sup>

<sup>1</sup>Fonte: três fontes fosfatadas (superfosfato triplo – SFT, fosfato natural reativo – FNR e termofosfato magnésiano – TFM); <sup>2</sup>Dose: quatro doses de P (0, 60, 120 e 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total); <sup>3</sup>Períodos de avaliação dos atributos do solo: 24, 36, 42 e 60 meses após o início do experimento. \*P<0.05. \*\*P<0.01. NS: não significativo.

Além disso, podem-se observar variações nas concentrações de Ca<sup>2+</sup> trocável do solo, entre os períodos avaliados (Figura 7). O fluxo de nutrientes que ocorre na rotação de culturas em SIPA, cuja absorção/reposição de nutrientes no solo varia com a cultura utilizada, pode levar a alterações nas concentrações de Ca<sup>2+</sup> ao longo do tempo (BUTTERLY et al., 2013;

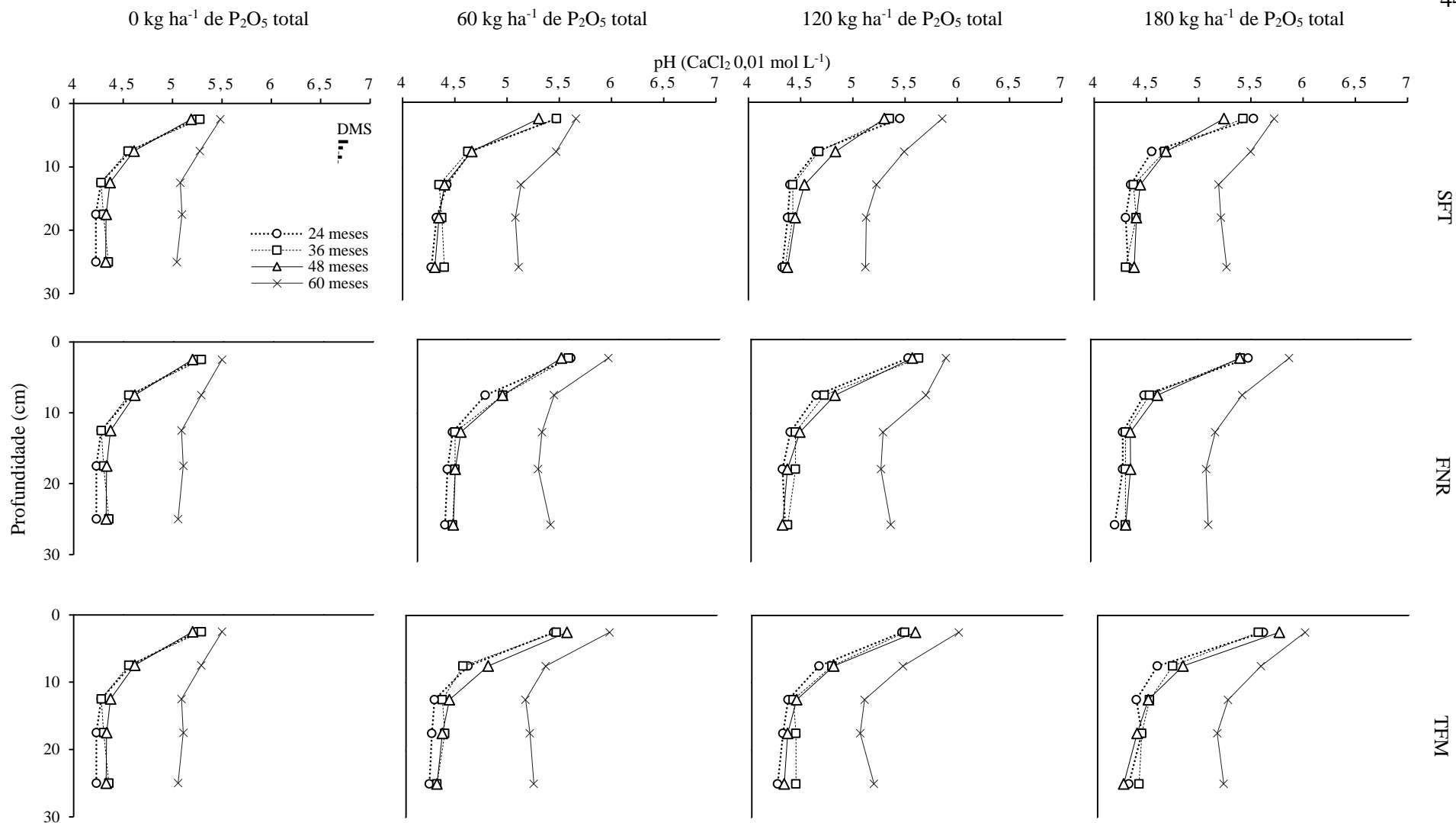


Figura 6 - Valores de pH (CaCl<sub>2</sub>) no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo - FNR e termofosfato magnésiano - TFM) e doses (0 kg ha<sup>-1</sup>, 60 kg ha<sup>-1</sup>, 120 kg ha<sup>-1</sup> e 180 kg ha<sup>-1</sup>) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições.

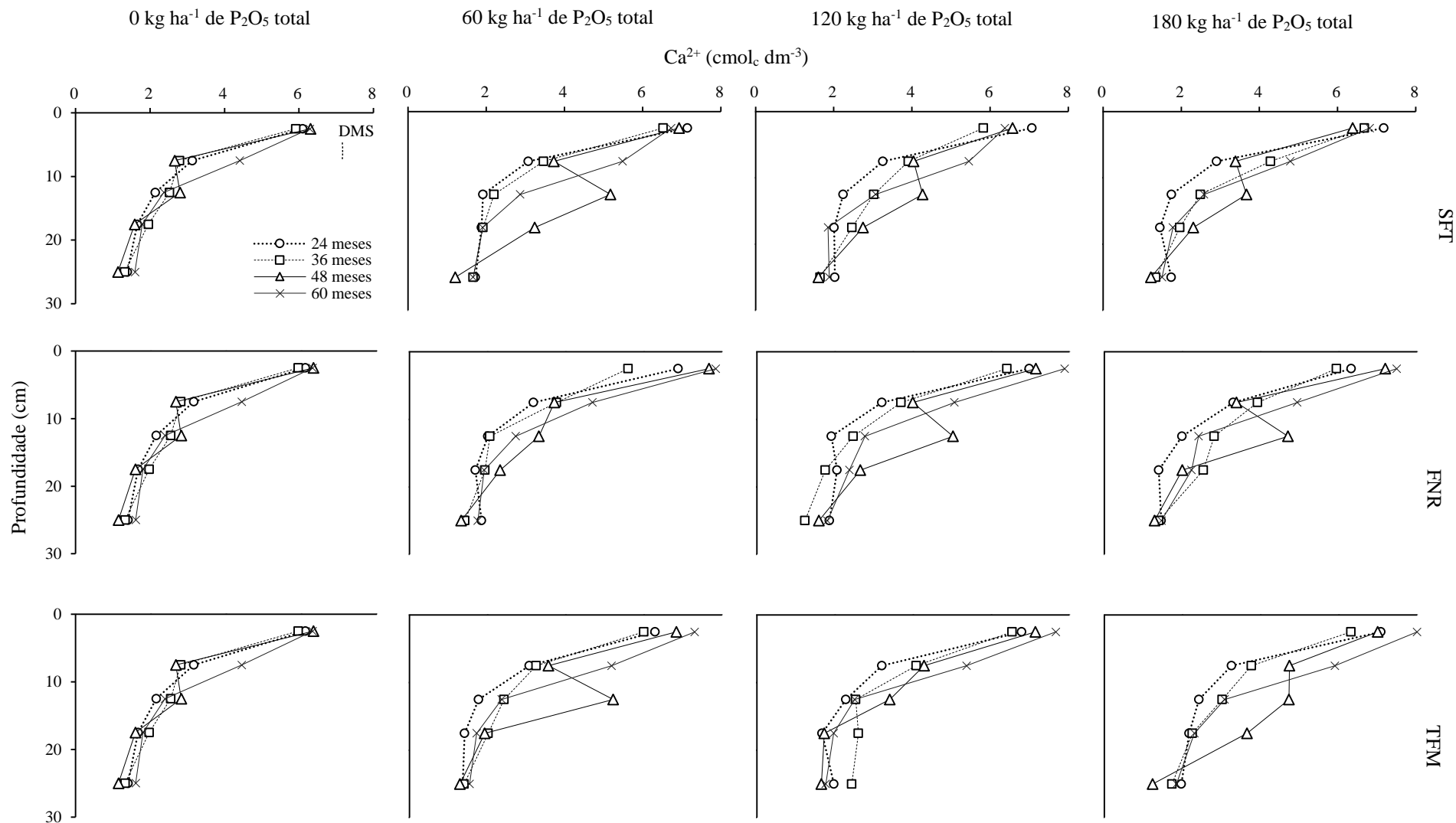


Figura 7 - Concentrações de cálcio trocável no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo - FNR e termofosfato magnésiano - TFM) e doses (0 kg ha<sup>-1</sup>, 60 kg ha<sup>-1</sup>, 120 kg ha<sup>-1</sup> e 180 kg ha<sup>-1</sup>) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições.

MARTINS et al., 2016). As leguminosas absorvem grande quantidade de Ca podendo extrair de 9,5 kg de Ca t<sup>-1</sup> de grãos, a exemplo da cultura da soja (SBCS/NEPAR, 2017), levando uma redução nas concentrações. Em contrapartida, espécies forrageiras como a aveia-preta, tem alta capacidade de ciclagem de nutrientes como o Ca, retornando quantidades significativas para o solo (BORKERT et al., 2003). Ainda, em SIPA, os animais alteram o ciclo deste nutrientes no solo, pois a principal via de excreção de Ca dos animais é pelo esterco, sendo seu conteúdo em torno de 1,2 a 2,5% (HAYNES & WILLIAMS, 1993).

O aporte de Mg devido a aplicação de TFM (exemplo, 12,6 kg ha<sup>-1</sup> de Mg<sup>2+</sup> com a adição de 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total) resultou em concentrações mais elevadas de Mg<sup>2+</sup> trocável do solo na camada de 0-5 cm (6,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) na dose de 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total, sendo mais expressivo aos 60 meses de avaliação. Para a camada de 10-15 cm (7,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), houve maiores concentrações de Mg<sup>2+</sup> para o mesmo período avaliado, porém não apresentando diferenças entre as fontes utilizadas (Figura 8).

A aplicação de TFM tem apresentado resultados promissores no fornecimento de Mg às culturas (FAGERIA & SANTOS, 2008). Isso mostra que, além da eficiência em fornecer P gradativamente às plantas (PAVINATO & ROSOLEM, 2008), o uso de TFM também pode ser útil no suprimento de Mg às culturas, além de amenizar os efeitos da acidez do solo. Além do mais, há maior retorno de Mg nos sistemas pastejados, ocorrendo predominantemente via esterco (88%) e em menor proporção (22%) via urina, que está em formas prontamente disponíveis para as culturas (HAYNES & WILLIAMS, 1993).

Houve aumento nas concentrações de K<sup>+</sup> trocável no solo aos 48 meses de avaliação em todas as camadas avaliadas, não havendo diferenças entre as fontes e doses de P (Figura 9). A ausência de efeitos dos tratamentos nas camadas superficiais pode ser devido à alta ciclagem biogeoquímica ocasionada pelas espécies forrageiras que foram cultivadas no período outono-inverno em SIPA. A aveia preta, forrageira comumente utilizada na área experimental, tem sido importante recicladora de K<sup>+</sup> (BORKERT et al., 2003).

Salienta-se que, durante o período experimental, altas concentrações de Ca<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup> no solo (entre 2,1 e 6,0 e entre 0,22 e 0,45 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente) e concentrações muito altas (> 2,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) de Mg<sup>2+</sup>, foram observadas na camada de 0-20 cm segundo SBCS/NEPAR (2017), o qual resultaram em baixas relações de Ca:Mg (1,1 a 1,5) (HAVLIN et al., 2014). Em decorrência dessas relações, houve um deslocamento de K<sup>+</sup> para as camadas mais profundas do solo. No entanto, valores mais elevados de K<sup>+</sup> no perfil do solo, em áreas de pastagem são esperados devido à maior quantidade de biomassa acumulada (FERREIRA, 2009).



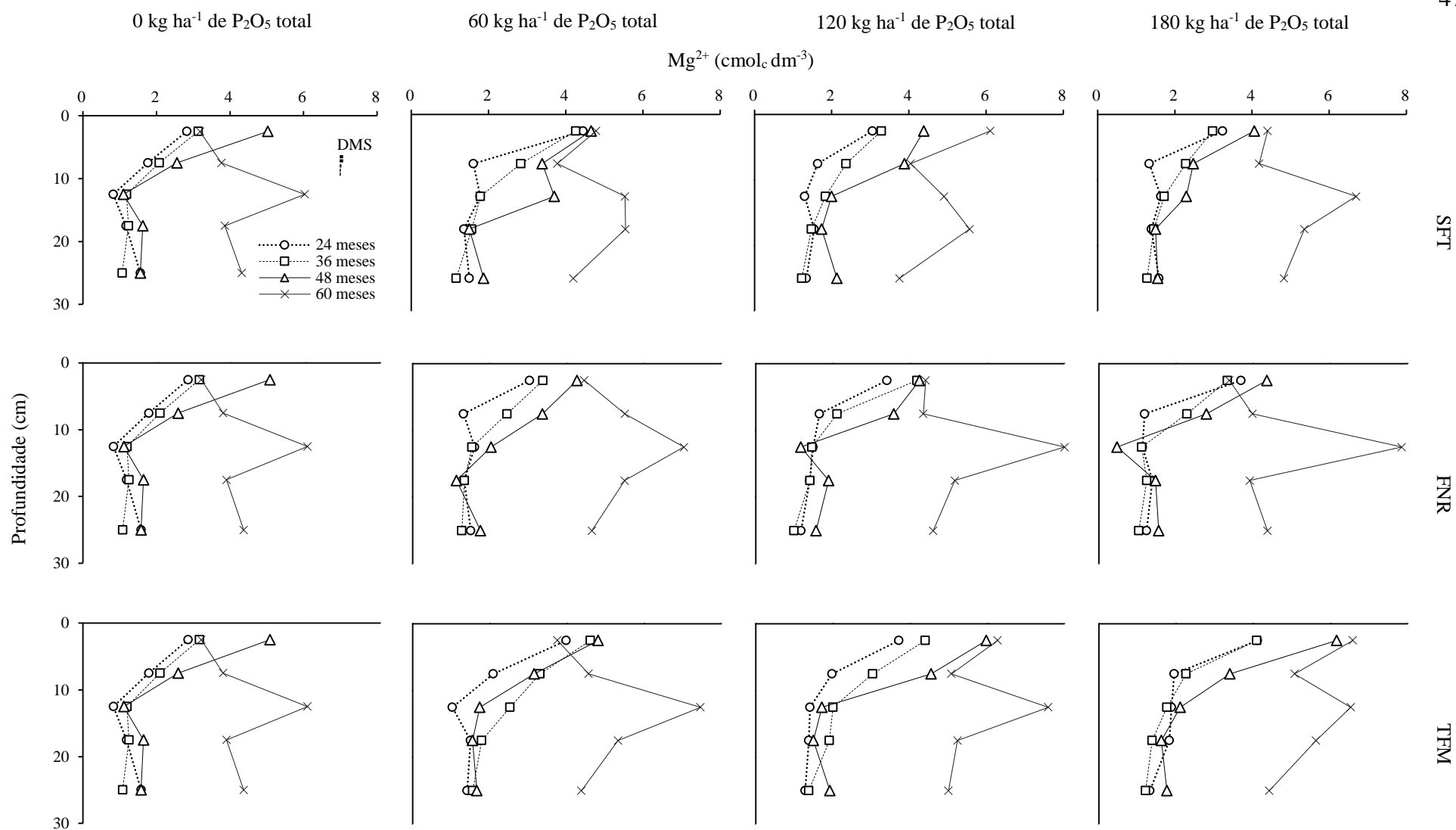


Figura 8 - Concentração de magnésio trocável no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo - FNR e termofosfato magnésiano - TFM) e doses (0 kg ha<sup>-1</sup>, 60 kg ha<sup>-1</sup>, 120 kg ha<sup>-1</sup> e 180 kg ha<sup>-1</sup>) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições.

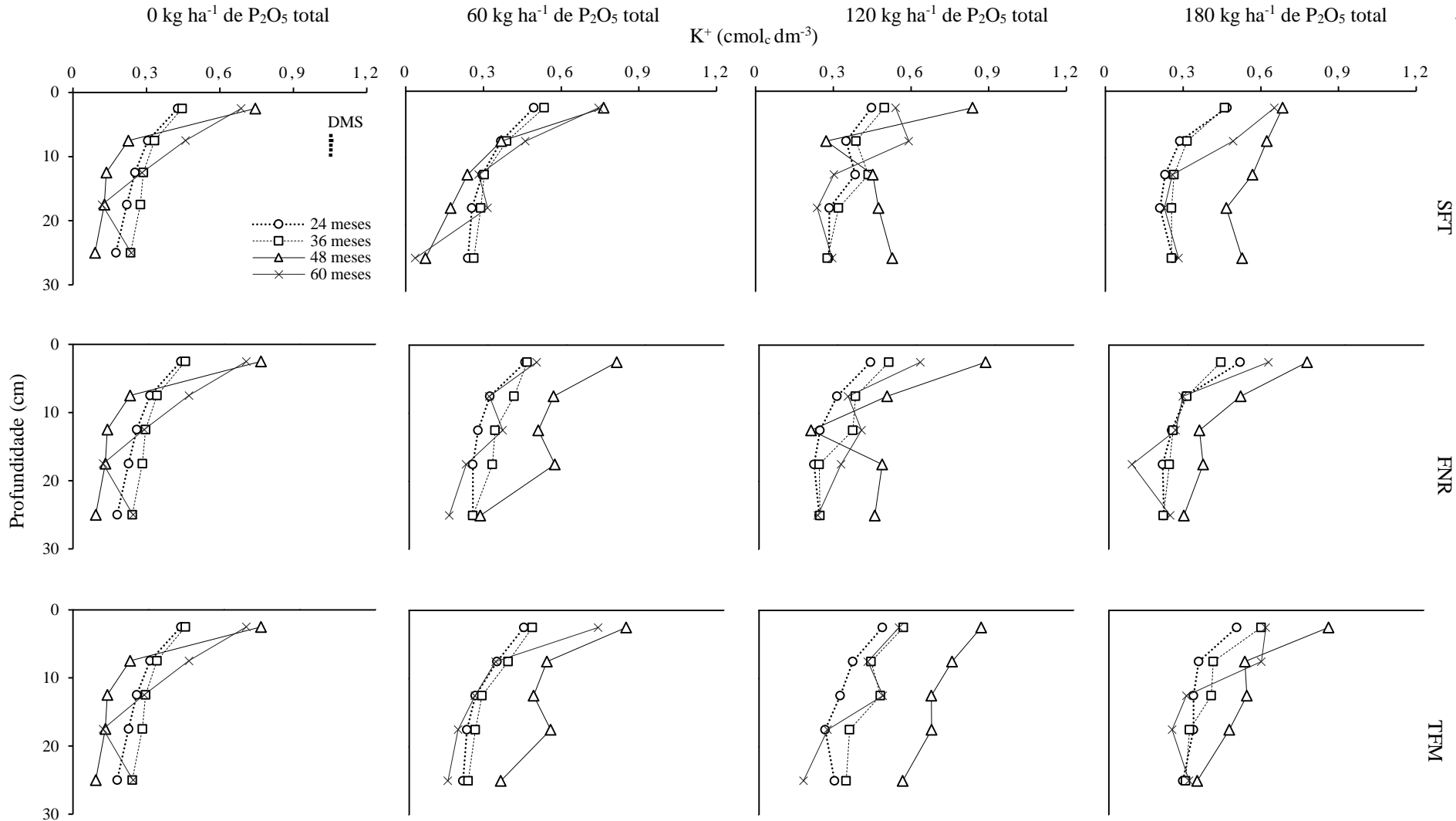


Figura 9 - Concentrações de potássio trocável no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo – FNR e termofosfato magnesiano – TFM) e doses (0 kg ha<sup>-1</sup>, 60 kg ha<sup>-1</sup>, 120 kg ha<sup>-1</sup> e 180 kg ha<sup>-1</sup>) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições.

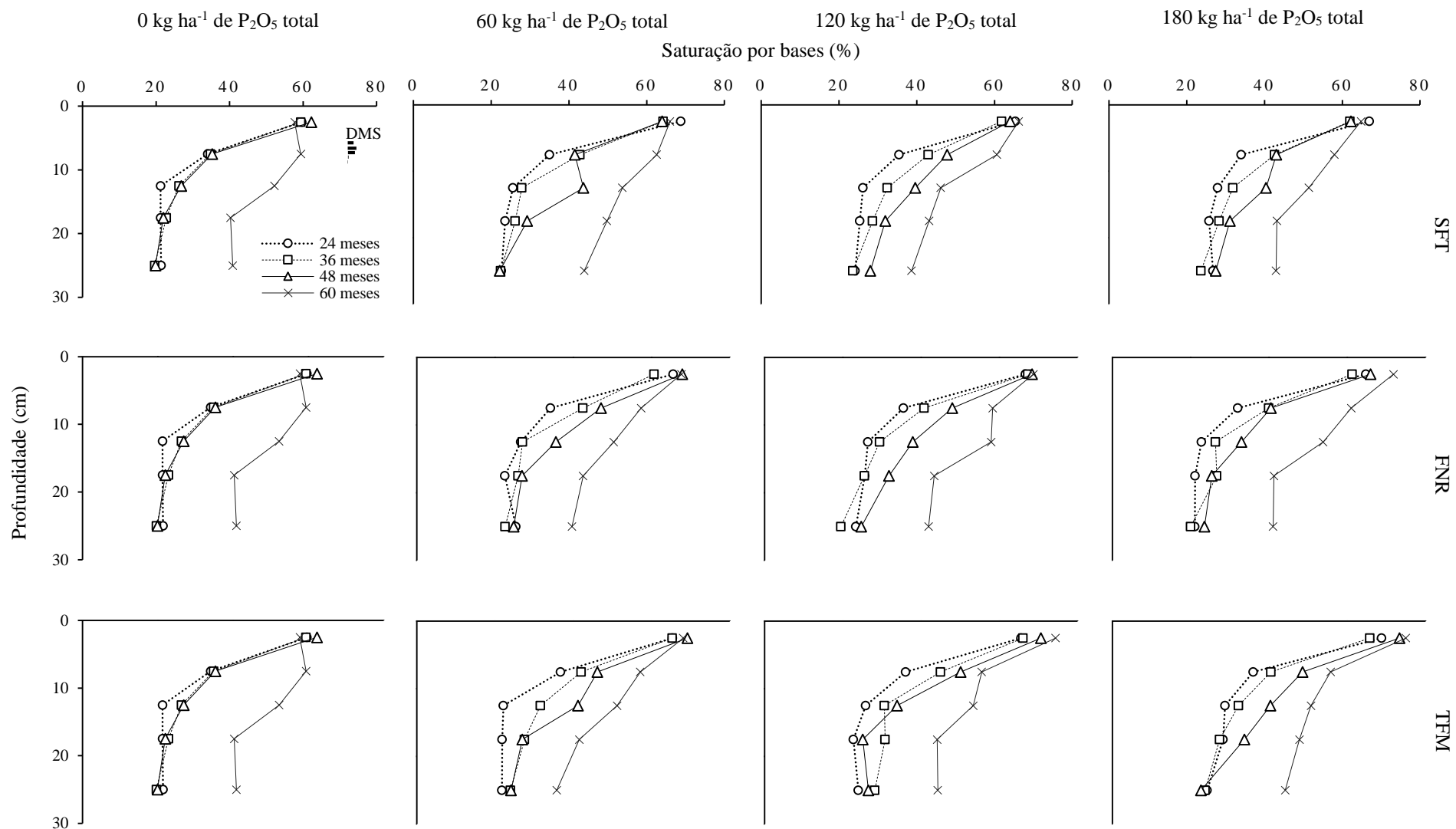


Figura 10 - Saturação por base no solo tratado com fontes (superfosfato triplo - SFT, fosfato natural reativo - FNR e termofosfato magnésiano - TFM) e doses (0 kg ha<sup>-1</sup>, 60 kg ha<sup>-1</sup>, 120 kg ha<sup>-1</sup> e 180 kg ha<sup>-1</sup>) anuais de fosfatos aplicados na superfície, em área total, em sistema integrado de produção agropecuária. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS) para cada camada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm) de solo. Pontos são média de quatro repetições.

As elevadas concentrações de bases trocáveis no solo (Ca, Mg e K) decorrente da aplicação anual na superfície de fosfatos em SIPA, resultaram em maiores valores de V% na camada de 0-5 (75%) cm, com o uso de TFM na dose de 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total, e nas camadas de 5-10 (58,6%) e 10-15 (52,1%) cm, aos 60 meses de avaliação, independente da dose e fonte utilizada (Figura 10). Pode se afirmar que o uso de TFM auxiliou na melhoria dos atributos químicos do solo a longo prazo em SIPA, devido a sua composição e reação no solo que levou ao aumento do pH do solo, das concentrações de Mg<sup>2+</sup> e, também valores mais elevados de V%.

No entanto, o manejo do solo em SIPA, contribuiu em maior parte com as mudanças na fertilidade do solo devido a fatores que resultaram em: (i) maior acúmulo de matéria orgânica promovido pela adição de resíduos animais e vegetais (CARVALHO et al., 2010); (ii) adição de bases para a solução do solo, a partir da oxidação de elétrons, oriundas da mineralização da matéria orgânica, (MALUF et al., 2015); (iii) complexação de cátions ácidos, devido a maior liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (CARVALHO et al., 2010) e; (iv) formação de bioporosidade no solo, promovida pelo pastejo, que favorece o crescimento das raízes, levando à migração de cátions básicos e outros nutrientes para as camadas mais profundas do solo (SOUZA et al., 2009; COSTA et al., 2014).

## 5.6. CONCLUSÕES

1. A antecipação de adubação fosfatada em superfície, utilizando termofosfato magnésiano, além do fornecimento de P às culturas, mostrou-se como uma estratégia eficiente no fornecimento de Mg às plantas e como atenuador dos efeitos da acidez no solo, em sistemas integrados de produção agropecuária.

2. A aplicação anual de termofosfato magnésiano em superfície auxiliou, ao longo do tempo, no aumento de pH do solo, nas concentrações de  $Mg^{2+}$  trocável e V% no perfil do solo. No entanto, os fatores ligados ao manejo do solo em sistemas integrados de produção agropecuária, prevaleceram sobre as melhorias nos atributos químicos do solo a longo prazo.

3. A renovação do sistema radicular decorrente do pastejo animal, maior produção de ácidos orgânicos e o aporte de resíduos (palhada, fezes e urina), favoreceram a melhoria dos atributos químicos do solo, ao longo do tempo, especialmente na redução de acidez do solo em profundidade.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após 60 meses de estudo, a aplicação anual de termofosfato magnesiano na superfície do solo, antes da semeadura da forrageira anual de inverno, pode ser considerada como uma estratégia eficiente no fornecimento de  $Mg^{2+}$  às culturas, na elevação da saturação por bases e como atenuante da acidez do solo. No entanto, o manejo do solo em sistema integrado de produção agropecuária, também contribui com a melhoria dos atributos químicos do solo, devido a sinergia dos fatores benéficos desse sistema (aporte de resíduos na superfície, pastejo animal, depósitos de excretas, adição de matéria orgânica no solo e renovação de raízes).

Além disso, os inúmeros benefícios advindos do sistema integrado de produção agropecuária aliados a adição de fertilizantes fosfatados, culminam em altas concentrações de P no solo, ao longo do tempo. No entanto, os extratores de P mostram resultados distintos quanto a fosfatos de diferentes solubilidades. O extrator Mehlich-1 é eficiente na predição das concentrações disponíveis de P em solo tratado com fertilizantes solúveis em água e em ácido cítrico; no entanto, não é indicado para solos tratados com fosfatos naturais reativos – fosfatos tricálcicos. Por outro lado, a resina de troca iônica é mais sensível no quesito inerente à previsão da disponibilidade de P, independentemente da solubilidade dos fosfatos aplicados no solo.

Os resultados observados em longo prazo, demonstram que a estratégia de antecipação da adubação fosfatada, em condições de solos adequadamente manejados sob sistemas conservacionistas, garante níveis adequados de P e a manutenção da fertilidade do solo. Entretanto, estudos mais aprofundados sobre a dinâmica do P em sistema integrado de produção agropecuária são necessários para contabilizar as adições desse nutriente devido a deposição de resíduos orgânicos no solo. Dessa maneira, será possível estabelecer recomendações de adubação de sistemas de produção mais eficientes e uso racional de fontes fosfatadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F.; COSTA, S.E.V.G.A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropicais brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 8, p. 325-380, 2013.
- BALBINOT JUNIOR, A. A, et al. Integração lavoura - pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, v.39, n.6, 2009.
- BOHAC, E. A. F.; CÂMARA, D. S. G. M.; SEGATELLI, C. R. Estado nutricional e produção do capim-pé-de-galinha e da soja cultivada em sucessão em sistema antecipado de adubação. **Bragantia**, v. 66, n. 2, p. 259-266, 2007.
- BORKET, C.M. et al. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n. 1, p.143-153, 2003.
- BORTOLON, L., GIANELLO, C.; KOVAR, J. L. Phosphorus availability to corn and soybean Evaluated by Three Soil-Test Methods for Southern Brazilian Soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, p. 39-49, 2011.
- BÜLL, L.T.; LACERDA, S.; NAKAGAWA, J. Termofosfato: alterações em propriedades químicas em um Latossolo vermelho-escuro e eficiência agronômica. **Bragantia**, v.56, n.1, p.169-79, 1997.
- BÜNEMANN, E.K.; CONDRON, L.M. Phosphorus and Sulphur Cycling in Terrestrial Ecosystems. In: MARSCHNER, P.; RENGEL, Z. (Ed). **Nutrient cycling in terrestrial ecosystems**. Springer Berlin Heidelberg, 2007. 65-85p.
- BUTTERLY, C. R.; BALDOCK, J. A.; TANG, C. The contribution of crop residues to changes in soil pH under field conditions. **Plant and soil**, v. 366, n. 1-2, p. 185-198, 2013.
- CARVALHO, P. C. F., et al. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.88, n.2, p.259-273, 2010.
- CAVIGLIONE, J. H. et al. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000
- CHIEN, S. H. et al. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, n. 2, p. 229-255, 2011.
- CIOTTA, M.N. et al. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.4, p. 1055–1064. 2002

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos: v.1 – Safra 2013/2014: décimo segundo levantamento, setembro de 2014**. 2014. Disponível em:< [http://www.conab.gov.br/uploads/arquivos/14\\_09\\_10\\_14\\_35\\_09\\_boletim\\_graos\\_setembro\\_2014.pdf](http://www.conab.gov.br/uploads/arquivos/14_09_10_14_35_09_boletim_graos_setembro_2014.pdf)> Acesso em: 4 de fev. 2018.

CORRÊA, R.M. et al. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, n.3, p. 218-224, 2008.

COSTA, S.E.V.G.A. et al. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1237-1247, 2009.

COSTA, S.E.V.G.A et al. Impact of an integrated no-till crop–livestock system on phosphorus distribution, availability and stock. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 190, p. 43-51, 2014.

DEISS, L. et al. Soil phosphorus compounds in integrated crop-livestock systems of subtropical Brazil. **Geoderma**, v. 274, n 1-2, p.88-96, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). **Embrapa Milho e Sorgo**. 2.ed. 2006.

FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Embrapa Arroz e Feijão – Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 1998.

FAGERIA, N.K.; SANTOS, A.B. Lowland rice response to thermophosphate fertilization. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 39, n. 5-6, p. 873-889, 2008.

FERREIRA, E.M. et al. Características agronômicas do *Panicum maximum* cv. Mombaça submetido a níveis crescentes de fósforo. **Ciência Rural**, v.38, n. 2, p.484-491, 2009.

GALETTO, S. L. et al. Grain crops and forage yield resulting from the use of phosphates en integrated production system. **Revista Ciência Agronômica**, v.45, n.5, p. 931-945, 2014a.

GALETTO, S. L. et al. Availability of phosphorus for maize in crop-livestock integration system. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n.5, p. 956-967, 2014b.

HAYNES, R. J.; WILLIAMS, P. H. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. **Advances in Agronomy**, v. 49, p. 119-199, 1993.

HAVLIN, J.L. et al. **Soil fertility and fertilizers**. Pearson Education India, 2014. 504 p.



KORNDÖRFER, G.H. et al. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício no solo e na produção de grãos de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 625-641, 1999.

LEMAIRE, G. et al. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 4-8, 2014.

MALUF, H.J. et al. Disponibilidade e recuperação de nutrientes de resíduos culturais em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1690-1702, 2015.

MARTINS, A.P. et al. Soil acidification and basic cation use efficiency in an integrated no-till crop–livestock system under different grazing intensities. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 195, p. 18-28, 2014a.

MARTINS, A.P. et al. Amelioration of soil acidity and soybean yield after surface lime reapplication to a long-term no-till integrated crop–livestock system under varying grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, v. 144, p. 141-149, 2014b.

MARTINS, A.P. et al. Long-, medium- and short-term dynamics of soil acidity in an integrated crop–livestock system under different grazing intensities. **Nutrien cycling in agroecosystems**. v. 104, n.1, p. 67-77, 2016.

MORAES, A. et al. Sistemas de integração lavoura-pecuária. **Forragicultura: Ciência, Tecnologia e Gestão dos Recursos Forrageiros**, v. 1, p. 203-218, 2013.

MORAES, A. et al. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4-9, 2014.

MORAES, A. et al. Avanços técnico-científicos em SIPA no subtrópico brasileiro. **In: Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária; Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil**, Pato Branco, 2017, Palestras: intensificação com sustentabilidade. Cascavel: UTFPR, 2017.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Fontes e extratores de fósforo em alfafa e centrosema. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 1519-1527, 2001.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399p.4

OLIVEIRA JUNIOR, A.; PROCHNOW, L.I.; KLEPKER, D. Eficiência agronômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 5, p. 623-631, 2008.

PAZ-FERREIRO, J.; VÁZQUEZ, E. V.; ABREU, C. A. Phosphorus determination after Mehlich-3 extraction and anion exchange resin in an agricultural soil of Northwestern Spain. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 43, p. 102-111, 2012.

PAVAN, M. A. et al. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná, 1992. 38p. (Circular, 76).

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: Decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas**, v. 32, n. 3, p.911-920, 2008.

RAIJ, B.V.; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N.M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by anion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 17, p. 547–566, 1986.

RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. International Plant Nutrition Institute, 2011.

SANTOS, D.R.; 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**, v. 38, p. 576-586, 2008.

SANYAL, S.K.; DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. In: *Advances in soil Science*. Springer, New York, NY, 1991. p. 1-120.

SAS System. **SAS Institute Inc. SAS OnlineDoc® 9.1.2**. Cary, NC: SAS Institute, 2010.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. NÚCLEO ESTADUAL PARANÁ. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: SBSC/NEPAR, 2017. 482p.

SCHLINDWEIN, J.A.; ANGHINONI, I. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.30, n. 4, p. 611-617, 2000.

SCHLINDWEIN, J.A.; GIANELLO, C. Necessidades de novos estudos de calibração e recomendação de fertilizantes para as culturas cultivadas sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v. 79, p. 12-15, 2004.

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2037-2049, 2008.

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

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília, Embrapa Cerrados, 2004. 416p.

SOUZA, E.D. et al. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1829–1836, 2009.

SOUZA, R.M. et al. Eficiência agronômica de fosfatos de rocha em solo com elevado teor de cálcio trocável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, p. 1816-1825, 2014.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM - SAS. **SAS Institute Inc. SAS OnlineDoc® 9.1.2**. Cary, NC: SAS Institute, 2010.

VIEIRA, R.C.B. et al. Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em Latossolos sob plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 188-198, 2013.

ZIBILSKÉ, L. M.; BRADFORD, J. M.; SMART, J. R. Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil. **Soil and Tillage Research**, v. 66, n. 2, p. 153-163, 2002.