

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

SHIVELLY LOS GALETTO

**MANEJO DO FÓSFORO NA FASE INICIAL DE ADOÇÃO DO SISTEMA DE
INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM PLANTIO DIRETO**

**PONTA GROSSA
2013**

SHIVELLY LOS GALETTO

**MANEJO DO FÓSFORO NA FASE INICIAL DE ADOÇÃO DO SISTEMA DE
INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM PLANTIO DIRETO**

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
2013

Catálogo na Fonte
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

- G154 Galetto, Shively Los
Manejo do fósforo na fase inicial de adoção do sistema de integração
lavoura-pecuária em plantio direto / Shively Los Galetto. Ponta Grossa, 2013.
83f.
- Dissertação (Mestrado em Agronomia – Área de Concentração :
Agricultura), Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador: Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca.
1. *Avena strigosa* Schreb. 2. *Lolium multiflorum* L. 3. *Zea mays* L.
4. *Glycine Max* (L.). 5. Fosfatos insolúveis em água. 6. Extratores de fósforo.
I. Fonseca, Adriel Ferreira da. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Mestrado em Agronomia. III. TI.

CDD:631.5



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

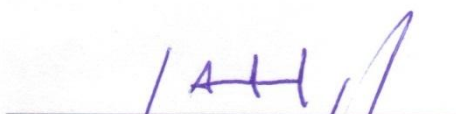
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

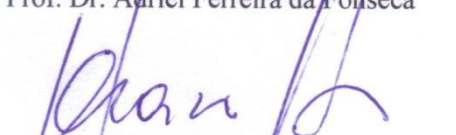
Título da Dissertação: **“Manejo do fósforo na fase inicial de adoção do sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto”.**

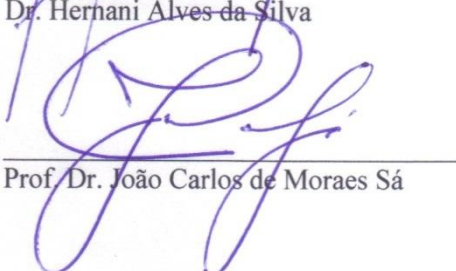
Nome: Shivelly Los Galetto

Orientador: Adriel Ferreira da Fonseca

Aprovado pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca

Dr. Hernani Alves da Silva

Prof. Dr. João Carlos de Moraes Sá

Data da Realização: 20 de fevereiro de 2013.

Ela sempre me apoiou com muita paciência e carinho,
muitas vezes sofrendo com a minha ausência.

Ele com todo seu exemplo e apoio, sempre me ensinou
uma maneira de seguir em frente.

À Meriam Los e Normando Galeto, minha mãe e meu pai,

DEDICO este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela concessão da vida, bênçãos, inspirações, oportunidades, saúde e principalmente, pelas pessoas colocadas no meu caminho.

Aos meus pais, Normando Galeto e Meriam Los, pelo apoio em todos os momentos, compreensão e disposição para tornarem possível todas as conquistas ao longo da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca, por toda a ajuda, incentivo, credibilidade, ensinamentos, e principalmente por ser um excelente profissional, apostando sempre no crescimento de seus alunos.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), pela oportunidade de realização do curso, e em especial, aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, por contribuírem com meu aprimoramento profissional e intelectual.

À Fundação Araucária pela concessão da bolsa de estudos e recursos financeiros, e às instituições: Fundação ABC, Yoorin Fertilizantes e International Plant Nutrition Institute (IPNI), pelo apoio financeiro para execução do trabalho experimental em campo.

Aos funcionários da UEPG, em especial à Verônica Carneiro, técnica do Laboratório de Nutrição de Plantas e, Dirce Vaz, técnica do Laboratório de Fertilidade do Solo, pela amizade, palavras de apoio e auxílio na realização das análises laboratoriais.

Aos colegas de trabalho que fizeram e fazem parte dos Laboratórios de Nutrição de Plantas e de Fertilidade do solo, e que de alguma forma colaboraram para a concretização deste trabalho: Eduardo Guntzel, Silvano Harkatin, André Auler, Luana Duda, Thays Schneider, Simone Miara, Jéssica dos Santos, Flávia Biassio, Joaquim de Lima, Hendrik Ivan Reifur, Rodrigo D'Ávila, Augusto Pontarolo Neto, Elton Rech, Gabriel Soares, Felipe Vriesman, Sara Carrera, Moisés Marcondes, Renato Zardo Filho, Angelo Bini, Adriano Haliski, Danilo Scharr e, em especial, ao Fabrício Siqueira Hennipman por toda ajuda, dedicação, paciência e companheirismo. Sua presença foi essencial em todos os momentos.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

GALETTTO, Shivelly Los. **Manejo do fósforo na fase inicial de adoção do sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto**. 2013. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual de Ponta Grossa.

RESUMO

A integração lavoura-pecuária (ILP) tem sido uma prática que, quando bem manejada e associada ao sistema plantio direto (PD), aumenta a qualidade do solo. Todavia, a maioria dos solos brasileiros apresenta baixa fertilidade natural de fósforo (P). Desta forma, o desenvolvimento de estratégias que aumentem a eficiência de uso de fertilizantes fosfatados possibilita um agronegócio mais sustentável do ponto de vista agrônomo e econômico. Os objetivos desse estudo foram avaliar o acúmulo de P e o rendimento das culturas de milho, soja, aveia preta e azevém anual adubados com fontes e doses de P_2O_5 na ILP em PD. Ainda, avaliar a biodisponibilidade de P para a cultura do milho, extraído pelos métodos de Melich-1 (M1), Resina trocadora de íons (RTI) e Morgan modificado (MM), após 36 meses de experimentação. O experimento foi instalado em abril/2009, no município de Castro-PR em um Cambissolo Háplico textura muito argilosa. Foi empregado delineamento em blocos ao acaso em esquema fatorial incompleto ($3 \times 3 + 1$) com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na aplicação superficial (em área total) de doses (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P_2O_5) por ocasião da semeadura da forrageira de inverno (aveia preta ou azevém anual), nas formas de superfosfato triplo (SFT), fosfato natural reativo (FNR) e termofosfato magnesiano (TFM). Foram avaliados os rendimentos de massa seca da aveia preta (2009 e 2011) e azevém anual (2010), de grãos de milho (2009/10 e 2011/12) e soja (2010/11), e o acúmulo de P nessas culturas. Aos 36 meses de estudo, foram coletadas amostras de solo das camadas de 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm, para determinação das concentrações de P disponível pelos diferentes métodos extratores (M1, RTI e MM) e, para avaliação da disponibilidade de P para a cultura do milho (2011/12). O uso de SFT, por ocasião da semeadura da aveia preta proporcionou maior rendimento de massa seca total (MST) e acúmulo de P na MST (P-MST) nesta cultura. No entanto, para a cultura do milho, os tratamentos não influenciaram o rendimento de grãos (RG) e acúmulo de P na parte aérea (P-Ac), no primeiro ano de uso. Os tratamentos não influenciaram o rendimento de MST do azevém anual e o RG de soja no segundo ano de avaliação. Porém, houve maior acúmulo de P-MST do azevém anual mediante aplicação de TFM e, para a soja, o P-Ac foi maior nos tratamentos com aplicação antecipada de SFT e TFM. A aplicação de TFM por ocasião da semeadura da aveia preta proporcionou maior rendimento de MST e P-MST nesta cultura, e também, maior RG e P-Ac no milho, no terceiro ano de estudo. A RTI extraiu maiores quantidades de P disponível, seguida do extrator de M1 e do MM. Nos tratamentos que receberam aplicação de SFT, os extratores de M1 e RTI obtiveram eficiência semelhante quando correlacionados com os atributos de RMS, RG, P-MS e P-Ex do milho. Para as fontes insolúveis em água (FNR e TFM), o P extraído pela RTI melhor se correlacionou com o P-MS e o P-Ex. A solução de MM foi ineficiente para prever a biodisponibilidade de P para o milho, cultivado em solo com alto teor de argila e óxidos de ferro e alumínio, que recebeu a aplicação de doses e fontes de P, em um sistema de ILP em PD.

PALAVRAS-CHAVE: *Avena strigosa* Schreb., *Lolium multiflorum* L., *Zea mays* L., *Glycine Max* (L.) Merr., fosfatos insolúveis em água, extratores de fósforo.

GALETTO, Shivelly Los. **Management of phosphorus in the initial adoption of integrated crop-livestock in no-tillage**. 2013. Master Science in Agronomy Dissertation – State University of Ponta Grossa.

SUMMARY

Crop-livestock integration (CLI) is a practice that, when properly managed and associated with no-tillage (NT), has been improving a soil quality. However, most of soils in Brazil have a low level of phosphorus (P). Thus, the development of strategies to increase phosphorus use efficiency has been crucial for sustainable agribusiness in an agronomic and economic viewpoint. The objectives of this study were to evaluate the accumulation of P and yields of corn, soybean, black oat and ryegrass fertilized with sources and levels of P_2O_5 in CLI under NT and to evaluate the bioavailability of P for maize, extracted by the methods Melich-1 (M1), ion exchange resin (IER) and modified Morgan (MM), after 36 months of experimentation. The experiment was established in April 2009, in the municipality of Castro-PR in a Dystric Cambisol and the experimental design was an incomplete factorial ($3 \times 3 + 1$), with four replications. The treatments consisted in surface (total area) application of levels (0, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹ yr⁻¹ P_2O_5) during sowing of winter forage (black oat or annual ryegrass) in the form of triple superphosphate (TSP), reactive rock phosphate (RRP) and magnesium termophosphate (MTP). The dry matter yields for black oat (2009 and 2011) and ryegrass (2010), grain yield for maize (2009/10 and 2011/12) and soybean (2010/11), and P accumulation were evaluated in these crops. In 36 months of study, soil samples were collected from the layers 0-5, 5-10, 10-15 and 15-20 cm, to determine the concentrations of available P by different methods extractants (M1, IER and MM) and to assess the availability of P for maize (2011/12). The use of TSP, during sowing of black oat occasioned the highest yield of dry matter (DM) and P accumulation in DM (P-DM) in this crop. However, for the maize crop, the treatments did not affect grain yield (GY) and P accumulation in plant (P-Ac) at the first year of use. The treatments did not affect the yield of DM annual ryegrass and GY of soybean, in the second year of assessment. However, there was a greater accumulation of P-DM in the annual ryegrass, when applying MTP. For soybeans, the P-Ac was higher in the treatments with early application of TSP and MTP. The application of MTP during sowing of black oat occasioned the highest yield of DM and P-DM in this crop. The GY and P-Ac were higher in maize, occasioned by the use TFM, in the third year of study. Concentrations of available P in soil after 36 months of study, had variations according to each extractor. The ion exchange resin extracted greater amounts of P, followed by the extractor M1 and MM. In the treatments that received application of TSP, the M1 and IER extractants has obtained similar efficiency when correlated with the maize's attributes (DMY, GY, P-DM and P-Ex). IER was the most efficient extractor which correlated with the P-DM and P-Ex when were applied sources insoluble in water (RRP and MTP). The MM extractor was ineffective to predicting the bioavailability of P for the maize grown in a soil with high content of clay and Fe and Al oxides, which received the application of rates and sources of P in a CLI system under NT.

KEYWORDS: *Avena strigosa* Schreb., *Lolium multiflorum* L., *Zea mays* L., *Glycine Max* (L.) Merr., water insoluble phosphates, phosphorus extractants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Representação esquemática das formas de fósforo na maioria dos solos tropicais no Brasil.....	20
Figura 2.	Ciclagem do fósforo na integração lavoura-pecuária.....	21
Figura 3.	Massa seca produzida em pastejo (MSP), massa seca residual (MSR), massa seca total (MST), fósforo acumulado na MSP (P-MSP), fósforo acumulado na MSR (P-MSR) e fósforo acumulado na MST (P-MST) da aveia preta (2009), após aplicação superficial de fontes de fósforo na integração lavoura-pecuária em plantio direto. SFT: superfosfato triplo; FNR: fosfato natural reativo; TFM: termofosfato magnesiano. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).....	40
Figura 4.	Massa seca produzida em pastejo (MSP), massa seca residual (MSR), massa seca total (MST), fósforo acumulado na MSP (P-MSP), fósforo acumulado na MSR (P-MSR) e fósforo acumulado na MST (P-MST) da aveia preta (2010), após aplicação superficial de fontes de fósforo na integração lavoura-pecuária em plantio direto. SFT: superfosfato triplo; FNR: fosfato natural reativo; TFM: termofosfato magnesiano. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).....	41
Figura 5.	Massa seca produzida em pastejo (MSP), massa seca residual (MSR), massa seca total (MST), fósforo acumulado na MSP (P-MSP), fósforo acumulado na MSR (P-MSR) e fósforo acumulado na MST (P-MST) da aveia preta (2011), após aplicação superficial de fontes de fósforo na integração lavoura-pecuária em plantio direto. SFT: superfosfato triplo; FNR: fosfato natural reativo; TFM: termofosfato magnesiano. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).....	43
Figura 6.	Rendimento de grãos (RG), fósforo acumulado na parte aérea (P-Ac) e fósforo exportado (P-Ex) nos grãos de milho (2009/10) e soja (2010/11), após aplicação antecipada e superficial de fontes de fósforo na integração lavoura-pecuária em plantio direto. SFT: superfosfato triplo; FNR: fosfato natural reativo; TFM: termofosfato magnesiano. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).....	48
Figura 7.	Rendimento de grãos (RG) de milho (2011/12), após aplicação antecipada e superficial de doses e fontes de fósforo na integração lavoura-pecuária em plantio direto. ○ Superfosfato triplo (SFT), □ fosfato natural reativo (FNR), e Δ termofosfato magnesiano (TFM). Pontos são médias de quatro repetições (**: $P<0,01$ e *: $P<0,05$).....	49
Figura 8.	Fósforo acumulado na parte aérea (P-Ac) e fósforo exportado (P-Ex) nos grãos de milho (2011/12), após aplicação antecipada e superficial de fontes de fósforo na integração lavoura-pecuária em plantio direto. SFT: superfosfato triplo; FNR: fosfato natural reativo; TFM: termofosfato magnesiano. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).....	51

- Figura 9.** Fósforo disponível extraído pela solução de Mehlich-1 (P-M1), aos 36 meses após a aplicação anual na superfície (em área total) de doses (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹) e fontes [superfosfato triplo (○), fosfato natural reativo (□) e termofosfato magnesiano (Δ)] de P₂O₅ na integração lavoura-pecuária em plantio direto. Pontos são médias de quatro repetições. **P<0,01 e *P<0,05..... 62
- Figura 10.** Efeito de fontes em camadas do solo sobre a disponibilidade do fósforo extraído pelo método de Mehlich-1 (P-M1), Resina trocadora de íons (P-RTI) e Morgan modificado (P-MM), aos 36 meses após a aplicação anual na superfície (em área total) de superfosfato triplo (SFT), fosfato natural reativo (FNR) e termofosfato magnesiano (TFM). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (P=0,05), para cada camada..... 63
- Figura 11.** Fósforo disponível extraído pelo método da Resina trocadora de íons (P-RTI), aos 36 meses após a aplicação anual na superfície (em área total) de doses (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹) e fontes [superfosfato triplo (○), fosfato natural reativo (□) e termofosfato magnesiano (Δ)] de P₂O₅ na integração lavoura-pecuária em plantio direto. Pontos são médias de quatro repetições. **P<0,01..... 66
- Figura 12.** Fósforo disponível extraído pelo método de Morgan modificado, aos 36 meses após a aplicação anual na superfície (em área total) de doses (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹) e fontes [superfosfato triplo (○), fosfato natural reativo (□) e termofosfato magnesiano (Δ)] de P₂O₅ na integração lavoura-pecuária em plantio direto. Pontos são médias de quatro repetições. **P<0,01..... 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Temperatura e precipitação média no período experimental (abril/2009 a abril/2012).....	32
Tabela 2.	Sequência de eventos das culturas no período do experimento: época de semeadura, espaçamento entre linhas e densidade de semeadura, cultivar ou híbrido, descrição geral das atividades e manejo de cobertura (forragens) ou colheita (grãos).....	34
Tabela 3.	Equações de regressão e nível de significância dos atributos avaliados para aveia preta (2009 e 2011) e azevém anual (2010) submetidos a doses de fósforo (0, 60, 120, 180 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ total), aplicadas na superfície do solo, em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto.....	38
Tabela 4.	Equações de regressão e nível de significância dos atributos avaliados para o milho (2009/10 e 2011/12) e soja (2010/11) submetidos a doses (antecipadas) de fósforo (0, 60, 120, 180 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ total), aplicadas na superfície do solo, em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto.....	47
Tabela 5.	Eficiência relativa do rendimento de grãos de milho (2011/12), considerando as doses e fontes de fósforo aplicadas por ocasião da semeadura da aveia preta (2011) em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto.....	50
Tabela 6.	Valores de F para o fósforo disponível por diferentes extratores, em camadas distintas de solo, após 36 meses de experimentação, mediante aplicação anual de fontes e doses de fósforo na superfície do solo em área total (por ocasião da semeadura da forrageira de inverno), em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto.....	61
Tabela 7.	Concentrações mínimas, máximas e médias (mg dm ⁻³) de fósforo disponível por diferentes extratores, em camadas distintas de solo, após 36 meses de experimentação, mediante aplicação anual de fontes ¹ e doses ² de fósforo na superfície do solo em área total (por ocasião da semeadura da forrageira de inverno), em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto.....	65
Tabela 8.	Coeficientes de correlação entre as concentrações de fósforo disponível por diferentes extratores e camadas distintas de solo, e os atributos do milho, após 36 meses de experimentação, mediante aplicação anual de fontes ¹ e doses ² de fósforo na superfície do solo em área total (por ocasião da semeadura da forrageira de inverno), em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto.....	70

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Integração lavoura-pecuária em plantio direto – aspectos e benefícios.....	15
2.2. Principais culturas utilizadas nos sistemas de integração lavoura-pecuária em plantio direto no sul do Brasil.....	16
2.3. Interação solo-planta-animal e fatores limitantes para a produção.....	17
2.4. Fósforo no solo.....	19
2.5. Fluxo do fósforo no sistema solo-planta-animal.....	20
2.6. Fertilizantes fosfatados e estratégias de adubação.....	22
2.7. Avaliação da biodisponibilidade de fósforo para as plantas.....	24
3. RENDIMENTO E ACÚMULO DE FÓSFORO PELAS CULTURAS DE GRÃOS E FORRAGENS DEVIDO AO USO DE FOSFATOS EM UM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO.....	27
3.1. RESUMO.....	27
3.2. SUMMARY.....	28
3.3. INTRODUÇÃO.....	29
3.4. MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.4.1. Localização, histórico e caracterização da área experimental.....	32
3.4.2. Delineamento, tratamentos e condução do experimento.....	33
3.4.3. Amostragens, determinações laboratoriais e análises estatísticas.....	35
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
3.5.1. Massa seca e acúmulo de fósforo nas forrageiras anuais de inverno.....	38
3.5.2. Rendimento de grãos, acúmulo e exportação de fósforo nas culturas de milho e soja.....	46
3.6. CONCLUSÕES.....	52
4. APROVEITAMENTO DE FÓSFORO PELA CULTURA DO MILHO NA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM PLANTIO DIRETO.....	53
4.1. RESUMO.....	53

4.2. SUMMARY.....	54
4.3. INTRODUÇÃO.....	55
4.4. MATERIAL E MÉTODOS.....	56
4.4.1. Localização e histórico da área e delineamento experimental.....	56
4.4.2. Condução do experimento e amostragens em campo.....	56
4.4.3. Análises laboratoriais.....	59
4.4.4. Análises estatísticas.....	59
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
4.5.1. Concentrações de fósforo no solo por diferentes extratores.....	61
4.5.2. Correlações entre o fósforo extraído e os atributos do milho.....	69
4.6. CONCLUSÕES.....	74
 5. CONCLUSÕES GERAIS.....	 75
 6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	 76

MANEJO DO FÓSFORO NA FASE INICIAL DE ADOÇÃO DO SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM PLANTIO DIRETO

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as pesquisas vêm sendo direcionadas no sentido de aprimorar a eficiência de utilização de nutrientes pelas plantas, evitar a degradação dos recursos ambientais, aumentar o rendimento das culturas e maximizar a lucratividade nos sistemas de produção agrícola (HERRERO et al., 2010). Neste contexto, a integração lavoura-pecuária (ILP), aliada ao plantio direto (PD), tem sido uma alternativa que, quando adequadamente executada, proporciona maior sustentabilidade ao sistema de produção, devido ao uso contínuo das áreas agrícolas e à melhoria da qualidade do solo (BALBINOT JUNIOR et al., 2009; CARVALHO et al., 2010).

No Brasil, a atividade agropecuária encontra-se, na maioria das vezes, sob solos com elevada intemperização, lixiviação de bases e concentrações de óxidos¹ de ferro (Fe) e alumínio (Al) na fração argila (RAIJ, 2011). Desta forma, o fósforo (P) tem sido o nutriente mais limitante para a produtividade agrícola no país (NOVAIS e SMYTH, 1999), devido à baixa reserva natural de P no solo e à favorável adsorção (de alta energia) dos íons fosfatos nas superfícies dos óxidos de Fe e Al (HAVLIN et al., 2005). Assim, o fornecimento de P via adubação se consiste em uma prática essencial aos sistemas de produção, representado alto custo para o produtor (BEDIN et al., 2003).

As fontes de P, normalmente empregadas em culturas agrícolas no país, incluem fosfatos solúveis e insolúveis em água (RAIJ, 2011). Porém, essa diferença de solubilidade

¹ Quimicamente óxidos são distintos de hidróxidos e oxihidróxidos de Fe e Al. No entanto, ao longo deste trabalho, como de praxe na ciência do solo, será adotado o termo óxidos de Fe e Al para representar os óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos de Fe e Al (CURI et al., 1993).

tem provocado reações distintas do fertilizante fosfatado com o solo, principalmente pela diferença de reatividade e efeito residual ao longo do tempo (NOVAIS e SMYTH, 1999).

Sistemas integrados de produção têm sido caracterizados por uma dinâmica diferenciada em relação aos cultivos isolados, principalmente por apresentarem maior eficiência na utilização dos insumos (MORAES et al., 2012), devido à maior reserva de nutrientes no solo (SOUZA et al., 2010). Essa maior reserva dos nutrientes no solo tem feito com que o sistema de ILP em PD, com níveis adequados de nutrientes, tenha um manejo diferenciado da adubação. Assim, o uso de adubos na fase das pastagens anuais tem se mostrado viável, pois além de aumentar a utilização dos nutrientes, maximiza o uso de máquinas, implementos e insumos na cultura de verão (BOHAC et al., 2007; MORAES et al., 2012). Portanto, o desenvolvimento de estratégias eficientes de fertilização fosfatada deve ser planejado numa perspectiva de longo prazo, para obtenção de incrementos na produção agrícola, sobretudo em sistemas de ILP em PD.

Outro fator importante se consiste na análise química do solo como ferramenta básica para a recomendação segura de P para as culturas. A avaliação do P disponível às plantas tem sido feita mediante o uso de soluções extratoras com características, princípios e eficiências de extração diversas (RAIJ, 2011). Todavia, a análise química do P disponível não é algo simples, pois a fonte de P utilizada pode influenciar os resultados fornecidos pelos laboratórios. Os métodos mais adequados tem sido aqueles que apresentam maiores correlações com a biodisponibilidade de P para as plantas (SILVA e RAIJ, 1999). Por isso, torna-se necessário o estudo sobre diferentes métodos de extração que apresentem adequada correlação com as respostas das culturas e à fonte fosfatada, inclusive na ILP em PD.

É possível que as fontes de menor solubilidade em água aplicadas de forma superficial e antecipada, possam, ao longo do tempo, tornarem-se alternativas viáveis sob o ponto de vista agrônômico e econômico em comparação às fontes de elevada solubilidade

em água para sistemas de ILP em PD. Desta forma, os objetos deste trabalho foram: (i) avaliar o efeito de doses (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e fontes (superfosfato triplo – SFT, fosfato natural reativo – FNR e termofosfato magnesiano – TFM) de P₂O₅ aplicados em área total, por ocasião da semeadura da forrageira de inverno, sobre o acúmulo de P e rendimento das culturas de aveia preta, azevém, milho e soja; (ii) avaliar para a cultura do milho, a biodisponibilidade de P extraído pelos extratores de Mehlich-1 (M1), Resina de troca iônica (RTI) e Morgan modificado (MM), após 36 meses de aplicação superficial de fosfatos em sistema de ILP em PD.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Integração lavoura-pecuária em plantio direto – aspectos e benefícios

Em uma década a população mundial cresceu em torno de 1,0 bilhão de pessoas, atingindo cerca de 7,0 bilhões de habitantes em 2011 (ONU, 2011). Juntamente com esse crescimento populacional, que deverá chegar a 9,0 bilhões até 2050, a demanda pela produção de alimentos impõe às lideranças globais o desafio de aumentar a produção agrícola (FAO, 2011). Diante disso, os agrossistemas atuais têm por objetivo proporcionar um aumento na produção agropecuária de elevada qualidade e sustentabilidade ambiental (BALBINO et al., 2011).

O sistema de plantio direto (PD) é uma forma de manejo conservacionista que envolve todas as técnicas recomendadas para aumentar a produtividade, conservando ou melhorando continuamente o meio ambiente (SIX et al., 2002). Esta técnica de manejo fundamenta-se na ausência de revolvimento do solo, na sua cobertura permanente e na rotação de culturas. Assim, entre os principais benefícios observados nos solos sob PD, destacam-se: (i) aumento das concentrações de matéria orgânica (MO) do solo (SANTOS et al., 2008); (ii) maior quantidade de palhada mantida na superfície, diminuindo as perdas de solo e nutrientes por erosão (SÁ et al., 2010); (iii) menor adsorção de P pelo menor revolvimento, permitindo um melhor aproveitamento dos fertilizantes aplicados (SCHLINDWEIN e GIANELLO, 2008); e (iv) aumento no rendimento de grãos (COSTA et al., 2003).

No sul do Brasil a utilização de plantas de cobertura do solo ou de culturas de alto risco econômico, como cereais de inverno, tem levado o agricultor a buscar alternativas econômicas durante este período do ano (CARVALHO et al., 2010). A formação de pastagens na entressafra torna viável a criação de bovinos e surge como alternativa para o aumento da rentabilidade e de giro de capital nas propriedades (BALBINOT JUNIOR et al., 2009).

A integração lavoura-pecuária (ILP) caracteriza-se como um sistema integrado que alterna, na mesma área, o cultivo de pastagens anuais ou perenes para a alimentação animal e de culturas destinadas à produção de grãos (MACEDO, 2009). Os benefícios que a ILP tem proporcionado para os sistemas de produção são inúmeros, a exemplo: (i) aumento na diversidade de microrganismos; (ii) incremento da atividade biológica; (iii) maior diversidade da fauna e flora; (iv) aumento das taxas de sequestro de carbono (SOUZA et al., 2008); (v) maior controle de erosão e quebra do ciclo de pragas e doenças (MORAES et al., 2002); (vi) incremento no rendimento de grãos devido à ciclagem de nutrientes ser mais eficiente (CARVALHO et al., 2010); (vii) maior ganho animal por área, devido à adubação do pasto (MORAES et al., 2012); (viii) diversificação das fontes de renda para o produtor; e (ix) maior lucratividade e rentabilidade da propriedade (SILVA et al., 2012).

2.2. Principais culturas utilizadas nos sistemas de integração lavoura-pecuária em plantio direto no sul do Brasil

Entre as espécies mais cultivadas no sul do Brasil, no período de outono-inverno, tem se destacado o azevém (*Lolium multiflorum* L.) e a aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.), sendo utilizadas consorciadas ou de forma rotacionada (MORAES et al., 2002). O azevém consolidou-se como grande opção, pela sua facilidade de ressemeadura natural, alto potencial produtivo, resistência a doenças e ao pastejo, além da versatilidade em associações com outras forrageiras ou leguminosas, (ASSMANN et al., 2008).

Na região sul, a aveia tem apresentado uma área de cultivo superior a do azevém, sendo a espécie mais utilizada em áreas com ILP. Isso é devido ao ciclo de produção mais curto das aveias, que não interfere na época de cultivo de lavouras de verão, principalmente a cultura do milho (ANGHINONI et al., 2007). A aveia preta tem sido a mais utilizada, devido ao seu rápido crescimento, altos rendimentos de massa verde e seca, resistência a doenças e ao pisoteio (NORO et al., 2003). Essas características forrageiras são fundamentais na ILP, pois

favorecem tanto o pastejo animal quanto a manutenção adequada de massa seca residual para o PD (ANGHINONI et al., 2007).

O milho (*Zea Mays* L.) e a soja (*Glicine max* (L.) Merr.) têm sido as principais culturas agrícolas comerciais no período de primavera-verão, utilizadas em sistema de produção na região sul do Brasil (BALBINOT JUNIOR et al., 2011). Sendo assim, o correto manejo das pastagens de inverno é decisivo não somente para a obtenção de bons rendimentos zootécnicos neste período, mas também para definir o potencial produtivo das culturas de grãos, especialmente nos sistemas de ILP em PD (NICOLOSO et al., 2006).

2.3. Interação solo-planta-animal e fatores limitantes para a produção

Os nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas estão presentes nos diferentes componentes dos sistemas de produção tais como, solo, plantas e animais (RUSSELE e FRANZLEUBBERS, 2007).

O solo atua como componente central do sistema, sendo base das modificações e transformações, favorecendo ou limitando o crescimento das plantas no sistema produtivo. Uma das maiores causas do declínio da produtividade de uma pastagem é o manejo inadequado do recurso solo, normalmente devido à exploração acima da sua capacidade (BALBINOT JUNIOR et al., 2009). Propriedades do solo, condições climáticas, formas de manejo e, principalmente, a presença de animais afetam a absorção e utilização de nutrientes pelas plantas (HAVLIN et al., 2005).

A planta atua absorvendo os nutrientes do solo, utilizando-os em seu metabolismo e desenvolvimento. Parte dos nutrientes que estavam disponíveis no solo permanecerá retida nas plantas, sendo daí transferidos para os animais pelo pastejo ou retornados ao solo via resíduos (ANGHINONI et al., 2011). Cada espécie forrageira apresenta características edafoclimáticas e morfológicas mais adequadas para o tipo de pastejo que é almejado (CARVALHO et al., 2010).

O animal em pastejo atua como catalisador das alterações sofridas pelos nutrientes no sistema (CARVALHO et al., 2011), pois no momento da ingestão da forragem há a extração de nutrientes, onde parte será retirada da área em forma de produtos animais (carne e leite). Após a digestão, o animal retorna entre 70 a 90% desses nutrientes pelas excretas, dependendo da qualidade da forragem, idade e categoria do animal (RUSSELE, 1997). É importante destacar, que animais produtores de leite extraem mais nutrientes do sistema, que animais destinados à produção de carne (BALBINOT JUNIOR et al., 2009).

Desta forma, a fertilidade do solo em sistemas integrados de produção tem sido amplamente estudada, mas de forma geral, não se conhece bem como a ciclagem dos nutrientes ocorre nesses ambientes gerados pela presença de plantas e animais (MORAES et al., 2012). Porém, para se obter altos rendimentos agrícolas na ILP em PD, torna-se necessário a melhoria dos atributos de fertilidade. Depois de corrigida a acidez com calcário, o principal fator limitante para a produção são os baixos teores de fósforo (P) disponível nos solos brasileiros (NOVAIS e SMYTH, 1999). Fato este agravado pelo baixo uso de fertilizantes em pastagens no país. Martha Junior e Corsi (2001) relataram que a aplicação de fertilizantes em pastagens no Brasil chega a valores de 7,4 kg ha⁻¹ de NPK por ano, o que resulta em quantidades insignificantes de P repostos nas pastagens.

Vale ressaltar a importância que o P representa para o crescimento do sistema radicular, ampliando a área de exploração das raízes no solo e, conseqüentemente, a eficiência de absorção de nutrientes e água pelas plantas (MALAVOLTA, 2006). Portanto, o sucesso da ILP em PD depende de vários fatores que interagem entre si, e por estes motivos, é importante o conhecimento das interações de P com o solo, para a fundamentação de estratégias que proporcionem maior disponibilidade deste nutriente para as plantas.

2.4. Fósforo no solo

Devido à baixa disponibilidade do P em solos tropicais, este é o nutriente que mais limita a produção de culturas no Brasil (NOVAES e SMYTH, 1999), sendo o mais utilizado em quantidades elevadas na adubação (RAIJ, 2011). Apesar do suprimento natural de P ser insatisfatório ao adequado crescimento das plantas, seu teor total no solo (camada 0-20 cm) pode variar de 100 a 4400 kg ha⁻¹, devido ao material de origem, ao processo de gênese e às condições climáticas (RAIJ, 2011).

Todavia, qualquer que seja a natureza do solo, a concentração de P na solução é extremamente baixa, normalmente entre 0,1 e 1,0%, dado à elevada tendência de remoção deste nutriente da solução, tanto por precipitação com compostos de alumínio (Al), ferro (Fe) e cálcio (Ca), quanto por adsorção específica (NOVAIS e SMYTH, 1999).

Na solução o P encontra-se na forma predominante de íons ortofosfatos (HPO_4^{2-} e H_2PO_4^-). Em decorrência das reações de equilíbrio no solo, a forma H_2PO_4^- ocorre em solos ácidos, ou seja, na faixa de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ de 5,0 a 6,0 e a forma HPO_4^{2-} passa a predominar em situações de pH mais elevado (acima de 6,0) (RAIJ, 2011).

Na fase sólida do solo o P pode encontrar-se: (i) complexado com íons de Fe e Al em solos ácidos ou complexado com íons de Ca em solos alcalinos, podendo estar em rápido equilíbrio com a solução (P lábil), (ii) complexado na matéria orgânica (MO) por diferentes labilidades (P orgânico), e (iii) com o passar do tempo, o fosfato adsorvido a óxidos de Fe e Al e minerais de argila, em condições de elevada acidez, pode ser recoberto e tornar-se parte de um óxido cristalino (P não lábil) (NOVAIS e SMYTH, 1999; HAVLIN et al., 2005; RAIJ, 2011.).

O P orgânico do solo ocorre em teores proporcionais ao da matéria orgânica (MO), podendo-se citar a relação de 50:1 como ordem de grandeza. Vários compostos de P foram identificados na MO, predominando os fosfatos de inositol, fosfolipídeos e ácido nucléicos

(RAIJ, 2011). Porém, a variação entre solos é muito grande, podendo o P orgânico representar apenas 4% do P total em solos com teor de MO muito baixo, enquanto que, em solos orgânicos, pode constituir aproximadamente 90% do P total (ANGHINONI e BISSANI, 2004).

Portanto, o P adicionado ao solo como fertilizante pode assumir as seguintes formas: P solução, P lábil e P não lábil, estando estas, em equilíbrio com a biomassa microbiana e a MO do solo (P orgânico) (Figura 1).

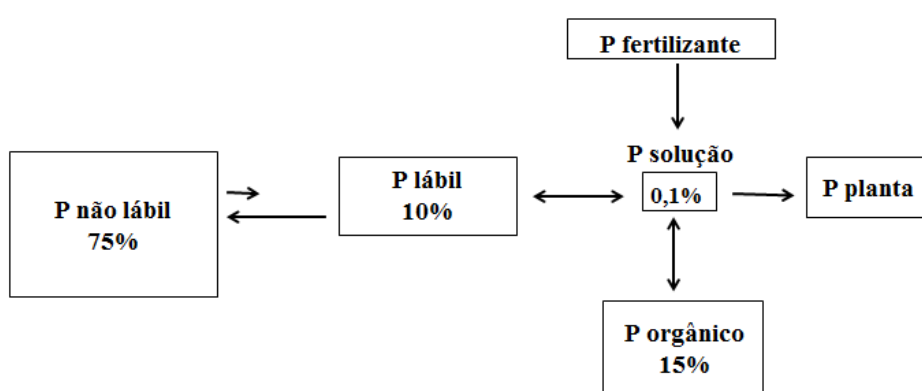


Figura 1. Representação esquemática das formas de fósforo na maioria dos solos tropicais no Brasil (adaptado de Novaes e Smyth, 1999).

2.5. Fluxo do fósforo no sistema solo-planta-animal

Nos sistemas de ILP a labilidade e/ou disponibilidade de P para as plantas é diretamente afetada pela presença dos animais e pela atividade de pastejo (MORAES et al., 2012). O fluxo de P se inicia na fase sólida (de diferentes labilidades), com consequente liberação para a solução no solo (MALAVOLTA, 2006).

No sul do Brasil o P normalmente é aplicado por ocasião da semeadura da cultura de verão (grãos). Após sua dissolução, uma pequena parte permanece na solução, outra parte é incorporada na biomassa microbiana e a maior parte é incorporada na fração inorgânica do solo (CARVALHO et al., 2010). Após ser absorvido pelas raízes da planta da solução do solo, o P é incorporado na fitomassa e nos grãos. Estes são removidos e o resíduo retorna ao sistema, com o nutriente permanecendo na solução e/ou sendo incorporado à

fase sólida, de diferentes labilidades. Na implantação de pastagem, no inverno, o P da solução é absorvido e incorporado na biomassa vegetal, que será consumida pelo animal, com pequena incorporação na carne e o restante do fósforo retorna ao solo, como resíduo da pastagem e da excreta animal (fezes e urina). A decomposição dos resíduos libera o nutriente para a solução do solo, a biomassa microbiana e para as formas orgânicas e inorgânicas, de diferentes labilidades (Figura 2) (CARVALHO et al., 2010; ANGHINONI et al., 2011).

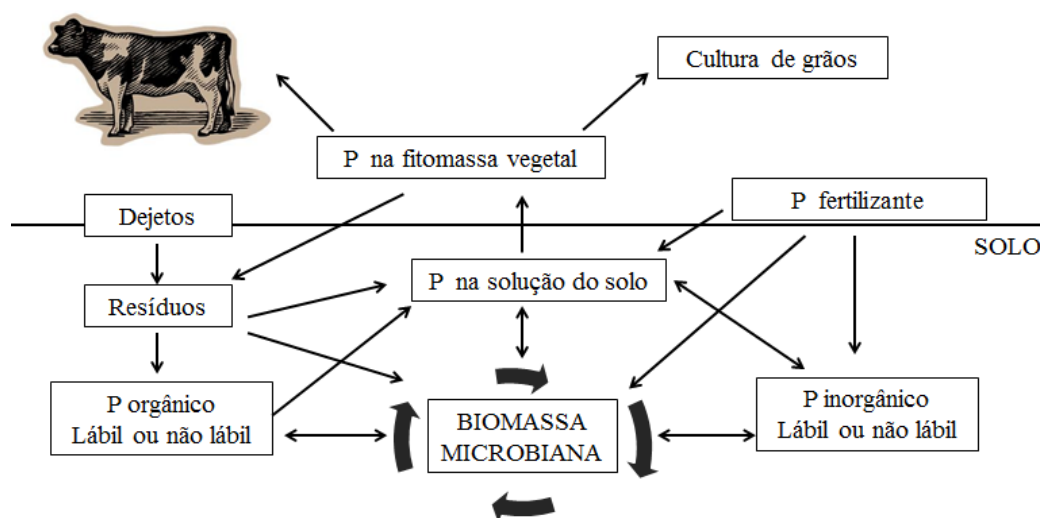


Figura 2. Ciclagem do fósforo na integração lavoura-pecuária (adaptado de Anghinoni et al., 2011).

A liberação de P orgânico para a solução do solo é controlada pela taxa de mineralização da MO e depende da atividade microbiana (ANGHINONI e BISSANI, 2004). O P inorgânico é liberado da fase sólida, predominantemente, através de reações de dessorção que ocorrem na superfície das partículas de solo e dissolução de minerais primários e secundários (RAIJ, 2011). A liberação da fase sólida para a solução pode, ainda, aumentar ou diminuir, dependendo do pH, temperatura do solo, força iônica da solução e também devido à síntese e exsudação de enzimas fosfatases (HAYLIN et al., 2005).

Altas intensidades de pastejo tem favorecido a absorção de P pelas raízes nas camadas até 20 cm e redistribuído no perfil do solo. Todavia, nas áreas sem pastejo, o P é redistribuído com menor quantidade e a absorção ficaria limitada pela menor concentração de raízes nas camadas superficiais até 10 cm (SOUZA et al., 2008; COSTA et al., 2009). Macedo (2009)

observou em uma área de pastagens recuperadas de *Brachiaria decumbens*, que os sistemas de ILP proporcionaram um aumento do P na solução, demonstrando ser uma forma econômica para o uso de fertilizantes, principalmente para as culturas de verão.

A integração de espécies de plantas que possam utilizar mais eficientemente o P do solo e de fertilizantes fosfatados, combinado com estratégias de adubação que proporcionem acumulação de P em formas mais lábeis são condições básicas para a sustentabilidade dos sistemas de produção. A ILP pode criar diferentes condições que influenciam a eficiência de fertilização e poucos são os estudos relacionados à melhor estratégia de adubação fosfatada que mantenham ou aumentem a produtividade das culturas nesses sistemas.

2.6. Fertilizantes fosfatados e estratégias de adubação

No Brasil existem diversas fontes de fosfatos a serem aplicadas no solo. As principais fontes de P podem ser divididas em: (i) fosfatos naturais (rocha fosfática moída; reatividade/eficiência agronômica variável dependendo de fatores ligados à mineralogia da rocha); (ii) termofosfatos (processo térmico; consumo de elevada quantidade de energia) e (iii) fosfatos totalmente acidulados (superfosfatos) (MALAVOLTA, 2006).

Dentre as várias fontes minerais e orgânicas de P disponíveis para o uso na agricultura, os superfosfatos, que possuem alta solubilidade em água, são fontes de P mais utilizadas no mundo para a correção dos baixos teores de fósforo no solo (RAIJ, 2011). Um benefício desses fertilizantes fosfatados é a facilidade de aplicação localizada por se tratar de produtos granulados. Entretanto, em solos ácidos e muito intemperizados, na forma de superfosfato triplo (SFT), uma parte do fósforo aplicado pode tornar-se imediatamente indisponível pelos processos de adsorção nas superfícies de óxidos de Fe e Al e minerais de argila e/ou precipitação como minerais secundários de P ligado a Fe e a Al (HAVLIN et al., 2005).

A principal fonte de P na natureza é a rocha fosfatada (apatita), conhecida como fosfato natural. Os fosfatos naturais podem ser de origem vulcânica (ígneas), os quais são de baixíssima solubilidade tanto em água como em ácido cítrico e, portanto, com eficiência agronômica próxima de zero. Já os fosfatos naturais reativos (FNR), de origem sedimentar, têm maior substituição isomórfica em sua estrutura o que a torna mais frágil e, portanto, mais reativa (RAIJ, 2011). No entanto, a eficiência agronômica dos FNR é variável, dependendo das condições de solo, visto que esse fertilizante tem característica de baixa solubilidade em ácido cítrico a 20 g L⁻¹ e insolubilidade em água (MOTOMIYA et al., 2004; ONO et al., 2009).

O uso de fontes alternativas de P tem adquirido grande importância, basicamente em decorrência do custo elevado dos fertilizantes fosfatados solúveis em água e do aumento da oferta de fosfatos insolúveis de melhor eficiência agronômica (RESENDE et al., 2006). A utilização do termofosfato magnésiano (TFM) como fonte de P, tem mostrado alta eficiência agronômica devido à sua alta solubilidade em ácido cítrico a 20 g L⁻¹ (MOREIRA e MALAVOLTA, 2001). Esta alta eficiência também ocorre, devido à disponibilização gradual do P pela presença do silicato em sua fórmula, o que possibilita a diminuição da fixação deste nutriente no solo (MALAVOLTA, 2006), principalmente em solos ricos em argilominerais primários e óxidos de Fe e Al (RAIJ, 2011).

No sistema convencional de preparo do solo, as fertilizações são baseadas nas concentrações de P disponível no solo e nas necessidades das culturas a serem imediatamente implantadas. Porém, no PD, a aplicação de fertilizantes (e corretivos) leva em consideração não apenas uma cultura isoladamente, mas também, a sucessão de culturas no sistema (ANGHINONI, 2007). Isso possibilita a antecipação da fertilização fosfatada, aplicando P junto à semeadura da cultura de outono-inverno (BOHAC et al., 2007; BERTOLINI et al., 2008), sendo uma alternativa atrativa para o sistema de ILP em PD (MORAES et al., 2012).

Esta técnica tem sido bastante utilizada no Brasil, porém são poucos os estudos que relatam sua eficiência em relação a outras técnicas de adubação (SEGATELLI, 2004). A forma de aplicação dos fertilizantes fosfatados é distinta entre os fosfatos considerados solúveis e aqueles insolúveis em água (HAVLIN et al., 2005). Sabe-se que, logo após a aplicação de uma fonte solúvel, o P pode ser rapidamente adsorvido pelo solo ou transformado em compostos de menor solubilidade através de reações de precipitação e adsorção específica (SILVA et al., 2009).

Em algumas situações o método de aplicação dos fertilizantes fosfatados, na superfície ou incorporado ao solo, não tem alterado a absorção de P e o rendimento das culturas (SANTOS et al., 2008). A alta eficiência do P aplicado sobre a superfície tem sido relacionada devido ao maior incremento na concentração de P na solução do solo nessa região, em consequência do aumento na porcentagem de saturação dos sítios de adsorção, resultante da redução do contato do fertilizante com o solo (RANNO et al., 2007).

Desta forma, as fontes de P a serem aplicadas superficialmente, na antecipação da adubação em sistema de ILP em PD implicariam em resultados distintos do ponto de vista agrônomo e econômico, para a cultura principal. Os fertilizantes de menor solubilidade em água, ao disponibilizarem mais lentamente o P, poderiam minimizar os processos de fixação e proporcionar maior eficiência de utilização do nutriente pelas culturas ao longo do tempo (NOVAIS e SMYTH, 1999; RAIJ, 2011).

2.7. Avaliação da disponibilidade de fósforo para as plantas

A eficiência dos extratores para avaliar a disponibilidade de P tem sido questionada e, em muitas situações de solo e manejo, pode não representar as condições reais de fertilidade deste nutriente (SILVA e 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: (i) dissolução ácida; (ii) troca iônica; (iii) complexação de cátions; e (iv) hidrólise de cátions (SANTOS et al., 2008). Desta forma, os métodos de extração de P mais empregados no Brasil incluem o uso de Mehlich-1, sendo, inclusive, o método oficial no Estado do Paraná (PAVAN et al., 1992); e o de resina trocadora de íons (RTI), procedimento desenvolvido por RAIJ et al. (1986) e empregado nos laboratórios que adotam o sistema de controle de qualidade oficial do Estado de São Paulo.

O extrator de Mehlich-1 é composto de uma mistura de ácidos fortes em baixas concentrações (H_2SO_4 0,0125 mol L⁻¹ e HCl 0,05 mol L⁻¹), com pH entre 2,0 e 3,0. A extração do P ocorre pela dissolução ácida dos compostos fosfatados de fraca energia, sendo maior para fosfatos de cálcio, seguida daqueles ligados ao alumínio e, por último, daqueles ligados ao ferro (PAVAN et al., 1992). Dentre as principais vantagens da utilização do método Mehlich-1, está na sua facilidade de execução e baixo custo de análise (RAIJ, 2011). No entanto, deve ser observado que o esse extrator apresenta dois problemas na estimativa dos teores de P no solo. O primeiro se refere a uma exaustão da capacidade de extração com o aumento dos teores de argila e do grau de intemperização do solo (NOVAIS e SMYTH, 1999). Assim, para os mesmos teores de fósforo obtidos em solos argilosos e arenosos, resultam diferentes classes de disponibilidade. O segundo problema é a superestimativa da disponibilidade em solos previamente adubados com fosfatos naturais (RAIJ et al., 2011).

O princípio da extração do P pela RTI é a sua remoção contínua da solução pela troca com o bicarbonato ou cloreto da resina, 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). Segundo Silva e Raij (1999), o uso da RTI como extrator de P é adequado para a estimativa do fator quantidade e é melhor que outros extratores, pois o processo de extração assemelha-se à ação das raízes das plantas. Além disso, não ocorre perda da força de extração do P em solos com alto teor de argila, e o uso da RTI não provoca

dissolução química de constituintes do solo e evita a superestimação do P disponível em solos que receberam adubação com fosfatos naturais (RAIJ, 2011).

Diante do exposto, pode se tornar interessante a realização de estudos com a solução de Morgan modificada, conforme Magdoff et al. (1999). Esse último método, utilizado nos Estados Unidos, quando comparado aos demais, teoricamente possui maior capacidade de extração do P ligado à fração orgânica do solo (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2003) e, devido ao fato do pH da solução ser próximo ao da rizosfera, provavelmente não superestimaria o P oriundo de fosfatos insolúveis em água.

3. RENDIMENTO E ACÚMULO DE FÓSFORO PELAS CULTURAS DE GRÃOS E FORRAGENS DEVIDO AO USO DE FOSFATOS EM UM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO

3.1. RESUMO

A integração lavoura-pecuária (ILP) associada ao plantio direto (PD) consiste-se em uma estratégia de intensificação do sistema de produção e, pode proporcionar aumento na ciclagem de nutrientes e na melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo. Isso pode favorecer o uso de fertilizantes fosfatados não acidulados, que normalmente proporcionam maior efeito residual ao longo do tempo. O objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos de fontes e doses de fósforo (P), aplicados superficialmente (em área total) por ocasião da semeadura da cultura de inverno (forrageiras), sobre o acúmulo de P e rendimento das culturas de milho, soja, aveia preta e azevém anual em sistema de ILP em PD, ao longo de três anos. O experimento foi instalado em abril/2009, no município de Castro-PR, em um Cambissolo Háplico textura muito argilosa sob delineamento experimental em blocos ao acaso em esquema fatorial incompleto ($3 \times 3 + 1$), com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na aplicação superficial de doses (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅) por ocasião da semeadura da forrageira de inverno, nas formas de superfosfato triplo (SFT), fosfato natural reativo (FNR) e termofosfato magnesiano (TFM). Foram avaliados os rendimentos de massa seca de aveia preta (2009 e 2011) e azevém anual (2010), de grãos de milho (2009/10 e 2011/12) e soja (2010/11), e o acúmulo de P nessas culturas. O uso de SFT, por ocasião da semeadura da aveia preta proporcionou maior rendimento de MST e acúmulo de P para esta cultura. No entanto, para a cultura do milho cultivada em sucessão, os tratamentos não influenciaram o rendimento de grãos e acúmulo de P do milho, no primeiro ano de estudo. Os tratamentos não influenciaram o rendimento de MST do azevém anual e o rendimento de grãos de soja no segundo ano de avaliação. Porém, houve maior acúmulo de P na massa seca total do azevém anual mediante aplicação de TFM. Para a cultura da soja cultivada em sucessão, o acúmulo de P foi maior nos tratamentos com aplicação antecipada de SFT e TFM. No terceiro ano de estudo, a aplicação de TFM por ocasião da semeadura da aveia preta proporcionou maior rendimento de MST e acúmulo de P para esta cultura, e também, maior rendimento de grãos e acúmulo de P para o milho. A aplicação de fontes insolúveis em água, em especial o TFM, obtiveram maiores efeitos residuais, proporcionando maiores rendimentos forrageiros e de grãos de milho, após 36 meses de estudo.

PALAVRAS-CHAVE: *Zea Mays* L., *Glycine max* (L.) Merr., aveia preta, azevém anual, integração lavoura-pecuária.

3.2. SUMMARY

The crop-livestock integration (CLI) is a strategy of intensification of the production system and, when combined with no-tillage (NT), can provide an increase in nutrient cycling and improve the chemical, physical and biology soil. This may favor the use of non-acidulated phosphate fertilizer, which typically provides higher residual effect over time. The aim of this work was to verify the effects of sources and doses of phosphorus (P), surface-applied (total area) during sowing of the winter crop (forage) on phosphorus accumulation and yield of maize, soybean, oat and ryegrass in CLI system under NT, over three years. The experiment was installed in April 2009, in the municipality of Castro-PR in a Dystric Cambisol and the experimental design was an incomplete factorial (3x3+1), with four replications. The treatments were consisted in surface doses (0, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹ yr⁻¹ P₂O₅) phosphorus during sowing of winter forages, in the form of triple superphosphate (TSP), rock phosphate (RRP) and magnesium termophosphate (MTP). The dry matter yields (DMY) for black oat (2009 and 2011) and ryegrass (2010), grain yield (GY) for maize (2009/10 and 2011/12) and soybean (2010/11), and P accumulation were evaluated in these crops. The use of TSP, during sowing of oat occasioned the highest DMY and P accumulation in DM (P-DM) in this crop. However, for the maize crop, the treatments did not affect GY and P accumulation in plant (P-Ac) at the first year of study. The treatments did not affect the DMY annual ryegrass and GY of soybean, in the second year of assessment. However, there was a greater accumulation of P-DM in the annual ryegrass, when applying MTP. For soybeans, the P-Ac was higher in the treatments with early application of TSP and MTP. The application of MTP during sowing of black oat occasioned the highest DMY and P-DM in this crop. The GY and P-Ac were higher in maize, due to MTP, in the third year of study. Therefore, the application of sources water-insoluble, especially TFM, had higher residual effect, providing higher yields of forage and maize grains, after 36 months of study.

KEYWORDS: *Zea Mays* L., *Glycine max* (L.) Merr., black oat, ryegrass, crop-livestock integration.

3.3. INTRODUÇÃO

No sul do Brasil, estima-se que aproximadamente 12,5 milhões de hectares tem adotado o PD para cultivo de grãos no verão. Porém, cerca de 30% dessas áreas tem sido aproveitada para o cultivo durante o inverno e as demais, ficando ociosas neste período (CARVALHO et al., 2010). Desta forma, torna-se importante a adoção de sistemas integrados de produção, a exemplo a integração lavoura-pecuária (ILP), que possibilita o cultivo de plantas produtoras de grãos no verão e o de forrageiras para pastejo animal durante o inverno (BALBINOT JUNIOR et al., 2009).

As principais culturas integrantes dos sistemas de ILP dominantes no sul do Brasil incluem milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* (L.) Merr.) com objetivo de produção de grãos no verão, e aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) e azevém anual (*Lolium multiflorum* L.), com propósito para alimentação animal e produção de fitomassa para manutenção do PD (MORAES et al., 2002). Portanto, para se obter altos rendimentos dessas culturas sob solos tropicais/subtropicais, torna-se essencial a melhoria dos atributos de fertilidade.

Depois de corrigida a acidez, o principal fator limitante ao rendimento das culturas tem sido os baixos teores de fósforo (P) disponível no solo (NOVAIS e SMYTH, 1999). O fornecimento desse nutriente nos sistemas integrados de produção tem sido pouco estudado em condições tropicais/subtropicais e as respostas das culturas tem sido distintas de acordo com a fonte e forma de aplicação de P. Além disso, o efeito da adubação fosfatada no sistema de produção depende da reatividade do fertilizante no solo, ao longo do tempo (FONTOURA et al., 2010).

Tem sido observado incremento no rendimento de grãos mediante a antecipação da fertilização fosfatada, quando esta é aplicada por ocasião da semeadura de plantas de cobertura do solo (BOHAC et al., 2007). Portanto, pode ser interessante a antecipação da fertilização fosfatada na ILP – sistema integrado no qual a ciclagem de nutrientes

(CARVALHO et al., 2010) e a liberação de ácidos orgânicos (RUSSELE e FRANZLEUBBERS, 2007) têm sido incrementadas devido à decomposição dos resíduos vegetal e excreta dos animais. Esses ácidos orgânicos têm proporcionado maior disponibilidade de P para a solução, devido à competição pelos sítios de adsorção nas superfícies coloidais (PAVINATO e ROSOLEM, 2008).

Apesar de ser uma prática atrativa, persistem dúvidas quanto a eficiência da fertilização fosfatada antecipada na ILP. O P oriundo de fertilizante de alta solubilidade (em água e citrato neutro de amônio), por exemplo, superfosfato triplo (SFT), pode ser rapidamente transformado em formas indisponíveis às plantas, podendo ter sua eficiência diminuída ao longo do tempo (SILVA et al., 2009). Por outro lado, fertilizantes fosfatados insolúveis em água (por exemplo, fosfato natural reativo – FNR e termofosfato magnésiano – TFM) tendem, com o tempo a ter suas eficiências aumentadas. O FNR consiste-se em uma fonte de P parcialmente solúvel em ácido cítrico, proporcionando aumento gradativo da disponibilidade deste nutriente em médio-longo prazo (RESENDE et al., 2006), como observado para as culturas de soja (MOTOMIYA et al., 2004) e milho em sistema de PD (ONO et al., 2009). O TFM possui características distintas tanto do FNR quanto dos fertilizantes fosfatados acidulados (SFT), pelo fato de apresentar alta solubilidade em ácido cítrico (20 g L^{-1}), alta eficiência de fornecimento gradativo de P às forragens (MOREIRA et al., 2002) e às culturas de milho (RESENDE et al., 2006) e trigo (RICHART et al., 2009), além de reação alcalina no meio (MOREIRA et al., 2002).

Outro fator pertinente no manejo do P em sistema de produção se consiste na aplicação superficial de fertilizantes contendo este nutriente (OLIVEIRA JUNIOR, et al., 2008). A aplicação de P na superfície do solo em PD visa diminuir o contato dos íons fosfatos (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}) com óxidos de ferro e alumínio – superfícies altamente sorvedoras de fosfatos que favorecem as reações de alta energia (RANNO et al., 2007). A aplicação de P em

área total, na superfície do solo (sobre a palhada) também pode minimizar, com o tempo, a variabilidade horizontal deste nutriente no solo. A alta variabilidade do P no PD consiste-se em uma das questões mais importantes e complexas relacionadas à avaliação da fertilidade deste nutriente (SANTOS et al., 2008).

Portanto, no sistema de ILP em PD, a eficiência de fosfatos insolúveis em água, aplicados na superfície do solo (por ocasião da semeadura de forrageiras anuais de inverno), pode ser aumentada ao longo do tempo, beneficiando as culturas de grãos cultivadas em sucessão. Nesse contexto, objetivou-se verificar os efeitos de fontes e doses de P aplicados na superfície (em área total), por ocasião da semeadura da cultura de inverno (forrageiras anuais) sobre o acúmulo de P e rendimento das culturas de milho, soja, aveia preta e azevém anual em sistema de ILP em PD.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1. 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 temperaturas do ar e precipitações médias durante os 36 meses de estudo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Temperatura e precipitação média (abr/2009 a abr/2012) no período experimental.

Ano	Mês												Média
	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	
Temperatura média do ar, °C													
2009/10	18,5	15,3	14,6	12,3	14,4	13,3	17,1	17,5	19,9	19,5	19,4	19,7	16,8
2010/11	19,3	16,1	14,1	12,2	13,8	14,4	17,5	16,9	19,8	20,7	20,6	18,5	17,0
2011/12	17,4	13,7	11,6	13,4	13,6	14,1	16,9	17,2	18,9	18,9	20,7	18,9	16,3
2012	17,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,1
Média ⁽¹⁾	18,1	15,0	13,4	12,6	13,9	13,9	17,2	17,2	19,5	19,7	20,2	19,0	16,7
Precipitação, mm													
2009/10	21	78	89	314	69	222	181	115	124	200	110	122	137,2
2010/11	151	113	55	75	21	53	112	109	212	214	250	75	120,0
2011/12	63	30	113	185	278	34	189	116	140	192	150	94	132,0
2012	177	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	177,0
Histórico ⁽²⁾	92	112	113	91	79	134	156	126	152	198	162	150	130,4

⁽¹⁾ Média para a temperatura do ar, referente aos 36 meses de estudo na área experimental.

⁽²⁾ Média histórica para a precipitação, ocorrida na área experimental nos últimos 40 anos (F.ABC, 2012).

A área encontrava-se, há oito anos sob sistema de PD com as culturas em sucessão de soja e milho, no verão e aveia preta, azevém anual e trigo, no inverno. O solo é um Cambissolo Háplico argiloso (EMBRAPA, 2006), cujos atributos químicos e granulométricos, na camada 0-20 cm foram: pH (CaCl₂): 4,8; Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ trocáveis: 0,4; 31,2; 23,5 e 3,5 mmol_c dm⁻³, respectivamente; acidez total (H+Al): 92,1 mmol_c dm⁻³;

saturação por bases: 38%; P (Mehlich-1): 4,2 mg dm⁻³; carbono orgânico total (COT): 29,6 g dm⁻³; nitrogênio total (NT): 2,0 g dm⁻³; argila, silte e areia: 605, 225, 170 g kg⁻¹, respectivamente. Realizada a análise mineralógica o 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.

3.4.2. Delineamento, tratamentos e condução do experimento

O delineamento experimental empregado foi de blocos completos ao acaso em esquema fatorial incompleto (3x3+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⁻¹ de P₂O₅ total, respectivamente na forma de superfosfato triplo [SFT (granulado): 460, 380 e 130 g kg⁻¹ de P₂O₅ total, P₂O₅ solúvel em água e CaO, respectivamente]; *T5, T6 e T7* – aplicação de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total, respectivamente na forma de fosfato natural reativo [FNR (pó): 330, 100 e 370 g kg⁻¹ de P₂O₅ total, P₂O₅ solúvel em ácido cítrico a 20 g L⁻¹ e CaO, respectivamente]; *T8, T9 e T10* – aplicação de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total, respectivamente na forma de termofosfato magnesiano [TFM (pó): 180, 165, 180, 70 e 100 g kg⁻¹ de P₂O₅ total, P₂O₅ solúvel em ácido cítrico a 20 g L⁻¹, CaO, MgO e SiO₂, respectivamente].

As quantidades utilizadas de cada fonte foram calculadas com base no teor de P₂O₅ total dos fertilizantes e aplicadas anualmente na superfície (em área total), por ocasião da semeadura da forrageira de inverno. Cada parcela possuía área total de 425 m² área (17 x 25 m). Desprezando-se 2,0 m de bordadura, cada parcela apresentou área útil de 273 m². No período de outono-inverno, a área foi dividida em quatro piquetes de iguais dimensões (5525 m²) para adoção do método de pastejo rotacionado. Em todos os anos foram utilizados 15 novilhos das raças Canchim, Brangus e Senepol, com peso vivo médio de 300 kg. Os animais

permaneceram em cada piquete de 4-5 dias quando a cultura foi a aveia preta e de 6-7 dias quando foi o azevém anual. Desta forma, foram estudadas as doses de P_2O_5 aplicadas nas forrageiras: aveia preta (2009 e 2011) e azevém anual (2010) em rotação com as culturas de milho (2009/10 e 2011/12) e soja (2010/11). A sequência de eventos e condução das culturas no período experimental pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2. Sequência de eventos das culturas no período do experimento: época de semeadura, espaçamento entre linhas e densidade de semeadura, cultivar ou híbrido, descrição geral das atividades e manejo de cobertura (forragens) ou colheita (grãos).

Cultura	Época de semeadura	Espaçamento entre linhas e densidade de semeadura	Cultivar ou Híbrido	Descrição geral das atividades	Manejo de cobertura (forragens) e colheita (grãos)
Aveia preta (2009)	28/04/09	0,17 m e 250 sementes m^{-2}	IAPAR-61	Início do pastejo com 30 cm de altura totalizando 2 ciclos de pastejo	Dessecação ⁽¹⁾ 21 dias após a retirada dos animais da área
Milho (2009/10)	27/09/09	0,80 m e 5 sementes m^{-1}	30F53	-	14/04/10
Azevém anual (2010)	17/09/10	0,17 cm e 450 sementes m^{-2}	FABC-1 Barjumbo	Início do pastejo com 25 cm de altura totalizando 3 ciclos de pastejo	Dessecação 28 dias após a retirada dos animais da área
Soja (2010/11)	05/11/10	0,40 m e 16 sementes m^{-1}	BMX-Apolo	-	30/03/11
Aveia preta (2011)	04/04/11	0,17 cm e 250 sementes m^{-2}	IAPAR-61	Início do pastejo com 30 cm de altura totalizando 3 ciclos de pastejo	Dessecação 21 dias após a retirada dos animais da área
Milho (2011/12)	02/09/11	0,80 m e 5 sementes m^{-1}	30F53	-	16/04/12

⁽¹⁾Foi utilizado herbicida *glyphosate* (1500 g ha^{-1} do i.a).

Com exceção do P, todos os demais nutrientes foram aplicados nas doses recomendadas, conforme requerimento das culturas. Por ocasião da semeadura da aveia preta (2009) foram aplicados 65 kg ha^{-1} de nitrogênio (N) e 59 kg ha^{-1} de potássio (K). Ao final do primeiro pastejo, foram aplicados (em cobertura) 116 kg ha^{-1} de N. Para o milho (2009/10) foram aplicados 68 kg ha^{-1} de N e 73 kg ha^{-1} de K na base e 68 kg ha^{-1} de N em cobertura no

estádio V4. A fertilização por ocasião da semeadura do azevém anual (2010) foi realizada a base de 34 kg ha⁻¹ de N e 74 kg ha⁻¹ de K. Após o segundo pastejo, foram aplicados (em cobertura) 34 kg ha⁻¹ de N. Para a soja (2010/11), por ocasião da semeadura foram inoculadas estirpes de *Bradyrhizobium japonicum* (aproximadamente 10⁵ bactérias g⁻¹ de solo) e aplicados 97 kg ha⁻¹ de K. Por ocasião da semeadura da aveia preta (2011) foram aplicados 45 kg ha⁻¹ de N e 50 kg ha⁻¹ de K. Ao final no segundo pastejo foram aplicados (em cobertura) 50 kg ha⁻¹ de N. O milho (2011/12) recebeu a aplicação de 75 kg ha⁻¹ de N e 75 kg ha⁻¹ de K na base, e 75 kg ha⁻¹ de N em cobertura no estágio V4.

Todo o N aplicado foi na forma de ureia [CO(NH₂)₂ – 450 g kg⁻¹ de N] e o K, na forma de cloreto de potássio (KCl – 580 g kg⁻¹ de K₂O). A aplicação de todos os fertilizantes foi realizada na superfície do solo, em área total. Havendo necessidade, foram empregadas demais práticas agronômicas (como por exemplo, tratamento de sementes, controle de plantas daninhas, pragas e doenças) de modo a permitir o adequado crescimento e desenvolvimento das culturas.

3.4.3. Amostragens, determinações laboratoriais e análises estatísticas

Foram utilizadas gaiolas de exclusão (duas por parcela), fabricadas com ferro ½ polegada de diâmetro, fechadas com tela de arame de malha 5,0 cm e medindo 0,25 m², para avaliação das fitomassas nas ocasiões de pré e pós pastejos, conforme método adaptado de Cano et al. (2004). Essas gaiolas foram dispostas aleatoriamente nas parcelas com intuito de quantificar a massa seca produzida em pastejo (MSP). Para a avaliação da massa seca residual (MSR) foram amostrados aleatoriamente 0,5 m² por parcela. Todos os cortes das plantas foram realizados manualmente a 5,0 cm do solo, mediante uso de foice.

As amostras de aveia preta e azevém anual foram pesadas no campo para obtenção da massa verde e subamostras (100 g) foram retiradas e destinadas ao laboratório. Essas subamostras foram lavadas com água deionizada e secadas em estufa com circulação forçada

de ar a 60 °C, até atingir massa constante (MALAVOLTA et al., 1997). Na sequência, as subamostras foram pesadas visando quantificar a massa seca (MS), que foram separadas em: (i) MS produzida em pastejo (MSP) – representado pelo somatório dos acúmulos de MS durante 2, 3 e 3 ciclos de pastejo ocorridos na aveia preta (2009), azevém anual (2010) e aveia preta (2011), respectivamente; (ii) MS residual (MSR) – referente ao acúmulo de MS do período compreendido entre o último pastejo e o manejo com herbicida, ocorrido antes da semeadura da cultura de verão de cada ano estudado; (iii) MS total (MST) – correspondente ao somatório da MSP e MSR.

Depois de pesadas, as subamostras foram moídas em moinho tipo “Wiley” equipado com malha de 1,0 mm, e armazenadas em recipientes plásticos tampados até a quantificação das concentrações de P, conforme métodos propostos por Malavolta et al. (1997). As concentrações de P nos tecidos vegetais foram determinadas por digestão nítrico-perclórica e a leitura por espectrofotometria de absorção molecular (EAM). Os acúmulos de P na parte aérea das forrageiras foram calculados mediante multiplicação da concentração deste nutriente na subamostra pela MS correspondente. Assim, foram quantificados os acúmulos de P na MSP, MSR e MST, representados por P-MSP, P-MSR e P-MST, respectivamente (PAULETTI, 2004).

Quando as plantas de milho (2009/10 e 2011/12) e soja (2010/11) atingiram os estádios fenológicos R3 e R6, respectivamente, foram coletadas 1,0 m de plantas por parcela para quantificar os acúmulos de MS e P na parte aérea. As plantas de milho foram separadas em subamostras de folhas, colmos e espigas e as plantas de soja em folhas, hastes e vagens. Essas subamostras foram preparadas, conservadas e analisadas, empregando-se os mesmos procedimentos descritos para as forrageiras anuais. Os acúmulos de P (P-Ac) na parte aérea das plantas de milho e soja foram calculados mediante multiplicação da concentração deste nutriente na subamostra pela MS correspondente (PAULETTI, 2004).

Após a maturação fisiológica, o milho e a soja foram colhidos e trilhados no campo para a determinação do rendimento de grãos. Para o milho (2009/10 e 2011/12) foram colhidas de cada parcela cinco linhas centrais por 4,0 m de comprimento, perfazendo uma área de 16,0 m². No caso da cultura da soja (2011/12), foram colhidas seis linhas centrais por 5,0 m de comprimento, perfazendo uma área de 12,0 m². O rendimento de grãos (RG) foi expresso em 130 g kg⁻¹ de umidade. Subamostras de grãos (100g) foram retiradas visando quantificar o teor de P (empregando-se os procedimentos anteriormente mencionados para tecidos vegetais). A partir do rendimento de grãos e do teor de P (nessas subamostras), foi calculado a exportação deste nutriente pela colheita (P-Ex) (PAULETTI, 2004).

Todos os resultados foram submetidos à análise estatística univariada em blocos casualizados em esquema fatorial incompleto. Nos casos de F significativo ($P < 0,05$), foi aplicado o teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para comparar o efeito de fontes e doses de P entre tratamentos. O efeito das variáveis preditoras foi ajustado às variáveis respostas pelos modelos de regressão de polinômios ortogonais linear ou quadrático. Na ausência de interação, foram consideradas como repetições: (i) para as doses – os blocos (quatro) e a média das fontes (SFT, FNR e TFM); (ii) para as fontes – os blocos (quatro) e a média das doses (0, 60, 120, 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total).

Para o RG de milho (2011/12), as combinações de doses e fontes de P foram comparadas (Tukey $\alpha = 0,05$) em relação à sua eficiência relativa, tomando-se como referencial (eficiência relativa = 100 %) a produção de grãos do tratamento controle que não recebeu adubação fosfatada (testemunha – T1). Todas as análises estatísticas foram realizadas mediante uso do pacote computacional SAS versão 9.2 (SAS System, 2010).

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1. Massa seca e acúmulo de fósforo nas forrageiras anuais de inverno

Não houve interação entre doses e fontes de P para os atributos MSP, MSR, MST, P-MSP, P-MSR e P-MST para as culturas forrageiras de aveia preta (2009 e 2011) e azevém anual (2010). Para a aveia preta (2009) houve aumento quadrático do rendimento de MSP, MSR, MST devido à aplicação de doses de P (Tabela 3). Os máximos rendimentos de MSP (1210 kg ha⁻¹), MSR (2343 kg ha⁻¹) e MST (3538 kg ha⁻¹) ocorreriam mediante a aplicação de 98, 71 e 85 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente.

Tabela 3. Equações de regressão e nível de significância dos atributos avaliados para aveia preta (2009 e 2011) e azevém anual (2010) submetidos a doses de fósforo (0, 60, 120, 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total), aplicadas na superfície do solo, em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto.

Atributos	Equação	R ²	Valor de P ⁽¹⁾
<i>Aveia preta (2009)</i>			
MSP⁽²⁾	$\hat{y} = 801,60 + 8,38x - 0,043x^2$	0,78	0,01
MSR⁽³⁾	$\hat{y} = 2155,30 + 5,30x - 0,0375x^2$	0,64	0,05
MST⁽⁴⁾	$\hat{y} = 2956,80 + 13,68x - 0,0805x^2$	0,66	0,05
P-MSP⁽⁵⁾	$\hat{y} = 3,34 + 0,0265x - 0,0002x^2$	0,94	0,05
P-MSR⁽⁶⁾	$\hat{y} = 7,96 + 0,0256x - 0,0002x^2$	0,58	0,05
P-MST⁽⁷⁾	$\hat{y} = 11,30 + 0,0521x - 0,0003x^2$	0,75	0,05
<i>Azevém anual (2010)</i>			
MSP	$\hat{y} = \bar{y} = 5979$	-	-
MSR	$\hat{y} = \bar{y} = 3956$	-	-
MST	$\hat{y} = \bar{y} = 9935$	-	-
P-MSP	$\hat{y} = \bar{y} = 9$	-	-
P-MSR	$\hat{y} = \bar{y} = 10$	-	-
P-MST	$\hat{y} = \bar{y} = 19$	-	-
<i>Aveia preta (2011)</i>			
MSP	$\hat{y} = \bar{y} = 3412$	-	-
MSR	$\hat{y} = 2731,90 + 8,91x - 0,0501x^2$	0,63	0,05
MST	$\hat{y} = 5898,30 + 14,29x - 0,0657x^2$	0,65	0,05
P-MSP	$\hat{y} = 10,29 + 0,048x - 0,0002x^2$	0,98	0,01
P-MSR	$\hat{y} = 9,08 + 0,049x - 0,0002x^2$	0,96	0,01
P-MST	$\hat{y} = 29,40 + 0,14x - 0,0005x^2$	0,98	0,05

⁽¹⁾Nível de significância da equação. ⁽²⁾MSP: massa seca produzida em pastejo. ⁽³⁾MSR: massa seca residual. ⁽⁴⁾MST: massa seca total. ⁽⁵⁾P-MSP: fósforo acumulado na MSP. ⁽⁶⁾P-MSR: fósforo acumulado na MSR. ⁽⁷⁾P-MST: fósforo acumulado na MST.

Com relação aos acúmulos de P, foram observados aumentos quadráticos das quantidades de P-MSP, P-MSR e P-MST (Tabela 3), de modo similar ao observado para os rendimentos de MS (MSP, MSR e MST) da aveia preta (2009). Os máximos acúmulos de P-MSP (4 kg ha^{-1}), P-MSR (9 kg ha^{-1}) e P-MST (14 kg ha^{-1}) seriam obtidos mediante o uso de 66, 64 e 87 kg ha^{-1} de P_2O_5 .

Os efeitos quadráticos para os rendimentos de MS e acúmulos de P (P-MSP, P-MSR e P-MST) na aveia preta (2009) podem ser explicados pelos seguintes fatores: (i) o solo da área foi classificado como muito argiloso com predominância de minerais do tipo 1:1 e hidróxidos de alumínio, favorecendo a fixação do P em excesso (NOVAIS e SMYTH, 1999), (ii) o solo atuou como dreno e o P aplicado que não foi absorvido, provavelmente, sofreu adsorção pelas superfícies coloidais de ferro e alumínio (PROCHNOW et al., 2003), (iii) o solo continha médio ($4,2 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada 0-20 cm) teor de P (Mehlich-1) por ocasião da instalação do experimento e alto (51 g dm^{-3}) teor de matéria orgânica (MO), segundo Pauletti (2004), favorecendo a maior disponibilidade desse nutriente através da mineralização de P (BERTOL et al., 2004), (iv) o animal (através das excretas) pode ter atuado como fonte de P ao sistema, devolvendo cerca de 85% do nutriente ingerido na forma de P total (P orgânico + P inorgânico) (HAVLIN et al., 2005), (v) as doses de P que proporcionaram os máximos rendimentos de MS e acúmulos de P estiveram em equilíbrio com a solução no solo, favorecendo o crescimento ótimo da planta.

Houve aumento dos rendimentos de MS e acúmulos de P da aveia preta (2009) mediante o uso de SFT (Figura 3). Os resultados evidentes do SFT se devem: (i) à alta solubilidade desse fertilizante, (ii) à aplicação superficial, que diminui o contato do fertilizante com o solo, ocasionando menor dissolução das fontes insolúveis em água (FNR e TFM), em curto espaço de tempo (FONTOURA et al., 2010), e (iii) ao valor de pH (5,3) na camada de 0-5 cm, que favoreceu a dissolução do grânulo de SFT, e tem possibilitado maior

liberação de P para a solução em faixa de pH (CaCl_2 0,01 mol L⁻¹) de 5,0-6,2 (RAIJ, 2011). Portanto, foram observados maiores rendimentos e acúmulos de P na forrageira mediante a aplicação do SFT, no primeiro ano de estudo, fato que concorda com os observados por Oliveira et al. (2007b).

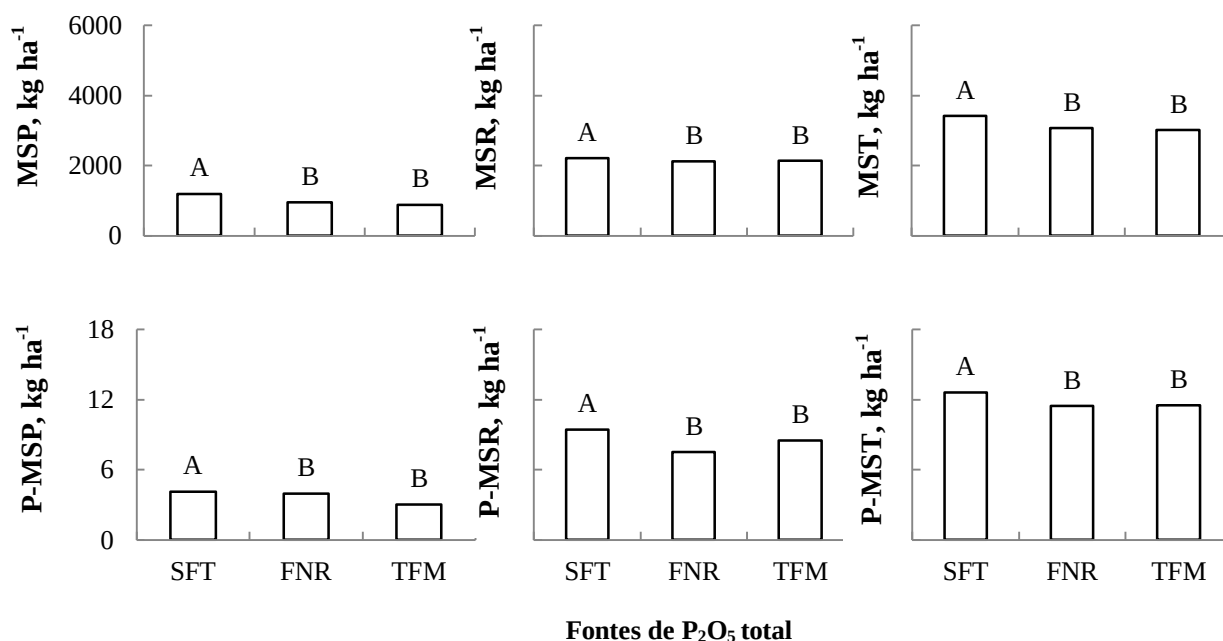


Figura 3. Massa seca produzida em pastejo (MSP), massa seca residual (MSR), massa seca total (MST), fósforo acumulado na MSP (P-MSP), fósforo acumulado na MSR (P-MSR) e fósforo acumulado na MST (P-MST) da aveia preta (2009), após aplicação superficial de fontes de fósforo na integração lavoura-pecuária em plantio direto. SFT: superfosfato triplo; FNR: fosfato natural reativo; TFM: termofosfato magnésiano. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

A cultivar de aveia preta IAPAR-61 (utilizada no presente estudo) pode atingir, durante o ciclo de 134 dias, rendimentos de 4728 e 8358 kg ha⁻¹ de MST, nas condições de cinco cortes e cultivo para cobertura do solo, respectivamente (IAPAR, 2010). No entanto, o ponto máximo de produção de MST da aveia preta (2009) seria de 3538 kg ha⁻¹ (Tabela 3), valor abaixo da média esperada para a cultivar em questão. Salienta-se que houve um déficit hídrico nos primeiros 30 dias do ciclo da aveia preta (2009) (Tabela 1), prejudicando a emergência das plantas e o crescimento inicial da forrageira, afetando o rendimento da cultura. Nos invernos secos tem sido observado que a capacidade produtiva da aveia preta IAPAR-61 diminui.

Os tratamentos empregados não influenciaram os rendimentos de MS (MSP, MSR e MST) do azevém anual (2010) (Tabela 3 e Figura 4). No entanto, o azevém anual apresentou elevados rendimentos de MS. Para manutenção de adequado resíduo sobre o solo e aporte de MS para o PD, são necessários no mínimo 2000 kg ha⁻¹ de MSR. Isso corresponde a cerca de 15-20 cm de altura para o caso de pastagens de aveia e azevém (ASSMANN et al., 2008). Portanto, mesmo em condições de três ciclos de pastejo a média de rendimento de MSR (Tabela 3) foi acima dos valores recomendados para manutenção do PD.

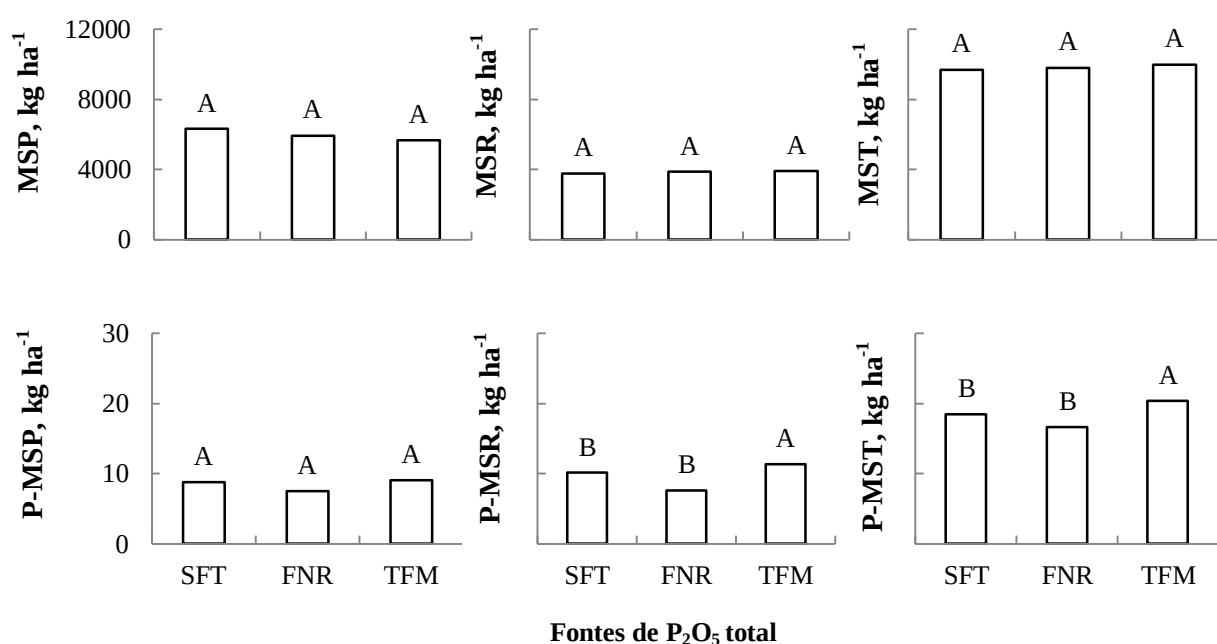


Figura 4. Massa seca produzida em pastejo (MSP), massa seca residual (MSR), massa seca total (MST), fósforo acumulado na MSP (P-MSP), fósforo acumulado na MSR (P-MSR) e fósforo acumulado na MST (P-MST) da azevém anual (2010), após aplicação superficial de fontes de fósforo na integração lavoura-pecuária em plantio direto. SFT: superfosfato triplo; FNR: fosfato natural reativo; TFM: termofosfato magnesiano. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Nas condições de quatro cortes o azevém anual pode atingir até 8472 kg ha⁻¹ e 9287 kg ha⁻¹ de MST para os cultivares FABC-1 e Barjumbo, respectivamente (FUNDAÇÃO ABC, 2008). Assim, a média produzida de MST, neste estudo, foi superior ao normalmente observado para essas cultivares (Tabela 3 e Figura 4). Tem sido verificado que o azevém anual, adequadamente manejado, tem suportado alta lotação animal sob pastejo por área, proporcionando, ao longo do ciclo, elevado rendimento de forragem (FONSECA e

MARTUSCELLO, 2010). Destaca-se que no ano de 2010 houve adequadas condições de precipitação (Tabela 1), inclusive no início da implantação da forrageira, favorecendo o crescimento e desenvolvimento da planta.

O acúmulo de P-MSP no azevém anual (2010) não foi afetado pelas doses (Tabela 3) e fontes (Figura 4) de fosfatos. Os acúmulos de P-MSR e P-MST no azevém anual (2010) também não foram influenciados pelas doses de P (Tabela 3), mas apresentaram incremento mediante a aplicação de TFM (Figura 4). Isso pode ser explicado pelos seguintes fatores: (i) o TFM consiste-se em um produto de liberação de P mais lenta que o SFT, diminuindo a probabilidade de adsorção de P nos colóides do solo (BEDIN et al., 2003); (ii) o TFM é insolúvel em água, mas possui elevada solubilidade em ácido cítrico (20 g L^{-1}) quando comparado ao FNR, podendo o P ser disponibilizado para a solução em maior proporção (RESENDE et al., 2006), principalmente em sistemas com a presença de animais, (iii) o TFM possui magnésio (Mg) em sua constituição que atua como carregador de P na planta, favorecendo a nutrição fosfatada da planta; (iv) devido à presença do silício (Si) no TFM, que tem diminuído a adsorção específica de íons fosfatos, deixando o P mais disponível às plantas (MALAVOLTA et al., 2006); e (v) ao efeito residual do fertilizante aplicado em anos anteriores.

Para a aveia preta (2011), com exceção da MSP, houve aumento quadrático dos rendimentos de MSR, MST e acúmulos de P (P-MSP, P-MSR e P-MST) devido à aplicação de doses de P (Tabela 3). Os máximos rendimentos de MSR (3128 kg ha^{-1}) e MST (6675 kg ha^{-1}) ocorreriam mediante a aplicação de 89 e 108 kg ha^{-1} de P_2O_5 , respectivamente, e os máximos acúmulos de P-MSP (12 kg ha^{-1}), P-MSR (13 kg ha^{-1}) e P-MST (39 kg ha^{-1}) nas doses de 121 , 123 e 138 kg ha^{-1} de P_2O_5 , respectivamente. Os efeitos quadráticos podem ser atribuídos de forma similar aos observados anteriormente para a aveia preta (2009) e

principalmente ao fato de que as doses de P que proporcionaram os máximos rendimentos de MS e acúmulos de P estiveram em equilíbrio com a solução no solo.

O uso de TFM proporcionou maior incremento dos rendimentos de MSR e MST e acúmulos de P-MSR e P-MST na aveia preta (2011), exceto para a MSP e para o acúmulo de P-MSP (Figura 5). Forragens submetidas ao pastejo têm respondido com permanente rebrota devido à desfolhação. Com a desfolha, as raízes têm apresentando dinâmica de crescimento mais acelerada, liberando maior quantidade de exsudatos (ácidos orgânicos) (CARVALHO et al., 2010).

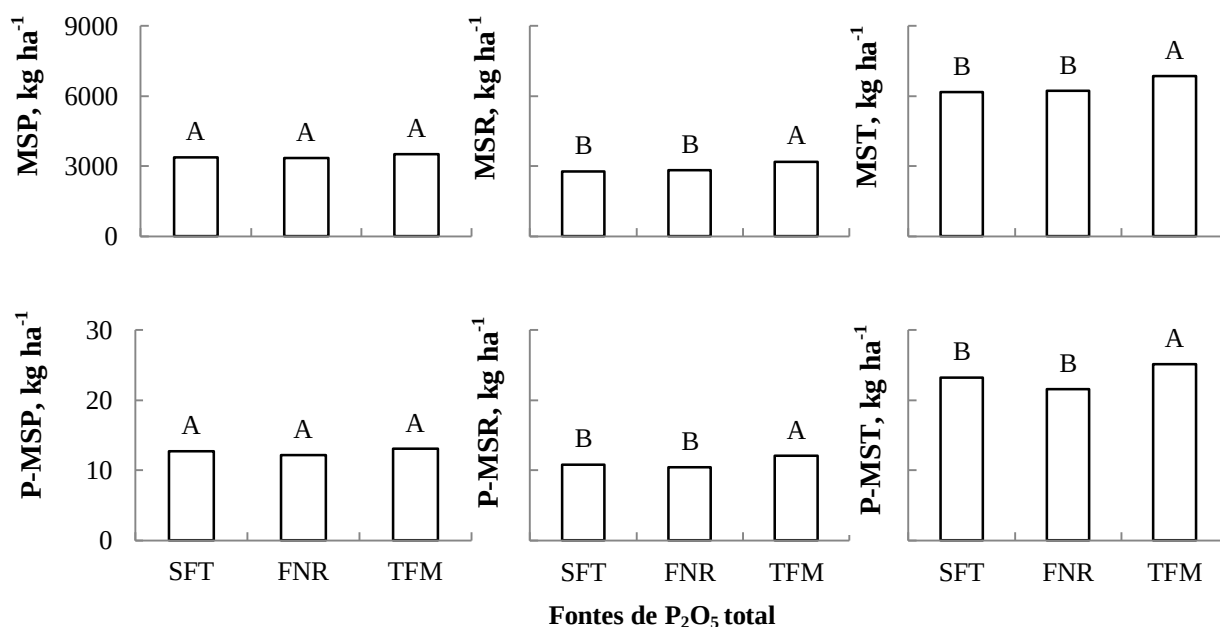


Figura 5. Massa seca produzida em pastejo (MSP), massa seca residual (MSR), massa seca total (MST), fósforo acumulado na MSP (P-MSP), fósforo acumulado na MSR (P-MSR) e fósforo acumulado na MST (P-MST) da aveia preta (2011), após aplicação superficial de fontes de fósforo na integração lavoura-pecuária em plantio direto. SFT: superfosfato triplo; FNR: fosfato natural reativo; TFM: termofosfato magnésiano. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Esses ácidos orgânicos de baixo peso molecular (cítrico, málico, oxálico e tartárico). exsudados pelas raízes, também encontrados no esterco de animais (BAZIRAMAKENGA e SIMARD, 1998), podem ter favorecido a solubilização de P proveniente do TFM. Tem sido observado que ácidos orgânicos competem com os sítios de adsorção de P, favorecendo a disponibilidade deste nutriente para a solução no solo (PAVINATO e ROSOLEM, 2008).

Além disso, o Si presente no TFM pode estar envolvido no aumento de produção de MS da parte aérea por promover maior capacidade fotossintética pelo melhor arranjo das folhas, tornando-as mais eretas (AGARIE et al., 1998).

O rendimento de MSP da aveia preta (2011) não foi influenciado pelas fontes de P (Figura 5), certamente devido à desigualdade no consumo da forragem causada pelos animais, já que o pastejo foi realizado em área total, inclusive sobre o tratamento controle. Além disso, por ocasião da instalação do experimento, o solo da área continha alto e médio teor de MO (51 g dm^{-3}) e P ($4,2 \text{ mg dm}^{-3}$), respectivamente, favorecendo a mineralização do P orgânico (BERTOL et al., 2004). Salienta-se que, em 2010 o rendimento de MSP também não foi influenciado pelas fontes fosfatadas (Figura 4). Na comparação de uma pastagem não pastejada com uma em pastejo, tem sido observado que a presença do animal altera o padrão de distribuição dos nutrientes no solo pela deposição dos dejetos, alterando a reciclagem dos nutrientes (BALBINOT JÚNIOR et al., 2009). Além disso, aproximadamente 90% do fósforo consumido das forragens pode retornar ao solo, principalmente através das fezes (WILLIAMS e HAYNES, 1990).

Os animais distribuem suas excreções aleatoriamente através da pastagem e, portanto, o desenvolvimento das forrageiras pode ter sido influenciado pelos ciclos de pastejo, já que em 2009 foram realizados apenas dois ciclos e em 2010 e 2011, três ciclos. Russele e Franzleubbers (2007) verificaram que as fezes causam maior rejeição ao pastejo em comparação a urina, causando desigualdade de consumo na área. Os autores observaram que enquanto nas áreas com urina a rejeição ocorre em um ciclo de pastejo rotacionado (cerca de quatro semanas), nas áreas com fezes a rejeição pode durar até 16 meses, observando-se a relação de oferta e tempo de pastejo.

Diferente das condições encontradas no ano de 2009, as condições de precipitação encontram-se adequadas para a aveia preta (2011) (Tabela 1). Neste caso, a cultivar IAPAR-

61 atingiu rendimento de MST (6675 kg ha^{-1}) satisfatório em relação ao esperado (entre 4728 e 8358 kg ha^{-1}) (Tabela 3 e Figura 5). A aveia preta tem sido menos exigente em fertilidade que o azevém anual (FONSECA e MARTUSCELLO, 2011). No entanto, neste estudo, a cultivar IAPAR-61 foi mais responsiva à adubação fosfatada, que o azevém anual.

Tem sido observado que a aveia preta extrai os nutrientes das camadas mais profundas do solo, por meio do sistema radicular, disponibilizando-os superficialmente, após o corte da parte aérea e a decomposição pela ação dos microrganismos (MELO et al., 2011). Borkert et al. (2003) observaram que dentre os macronutrientes, o P é reciclado em menor quantidade pela aveia preta, variando de 8 a 12 kg ha^{-1} , no intervalo de classe variando de 5000 a 10000 kg ha^{-1} de MS. No entanto, destaca-se que no presente trabalho o ponto máximo de acúmulo de P-MST foi superior aos valores observados na literatura tanto para a aveia preta (2009) como para a aveia preta (2011), que foram de 14 e 39 kg ha^{-1} , respectivamente (Tabela 3).

O acúmulo de P não indica que as plantas são mais ou menos eficientes, uma vez que tem sido observado que cultivares de plantas (através de adaptações genéticas) podem se desenvolver e produzir bem com menor quantidade desse nutriente (FERNANDES e MURAOKA, 2002). Entretanto, tem sido observado que maiores quantidades de P acumulados e concentrados nos resíduos das gramíneas (P-MSR), acarretam em maiores retornos deste nutriente para o sistema e para a cultura sucessora através da decomposição da palhada (SÁ et al., 2010).

De maneira geral, os altos rendimentos de MST produzidos pelo azevém anual (2010) e pela aveia preta (2011) podem ser atribuídos aos seguintes fatores: (i) o P é o nutriente responsável pelo perfilhamento das plantas, aumentando assim a produção de MS das forragens (GUEDES et al., 2009); (ii) plantas sob pastejo apresentam elevação dos níveis de exsudatos das raízes e a liberação de componentes de alta qualidade para o solo, o que

estimularia a atividade microbiológica, acelerando a ciclagem do fósforo aplicado (CARVALHO et al., 2010); (iii) ácidos orgânicos provenientes da decomposição do material orgânico (raízes e fezes), possuem a capacidade de formar complexos com óxidos de ferro e alumínio, evitando a fixação de P (PAVINATO e ROSOLEM, 2008); (iv) a rebrota das forrageiras pode ter sido influenciada pelas reservas de MO no solo (SOUZA et al., 2008), já que esta apresentou níveis altos no presente estudo (51 g dm^{-3} na camada 0-20 cm); (vii) à presença do ácido indolacético na urina de bovinos, que tem sido estimulante sobre o crescimento das plantas (CESAR et al., 2007); e (viii) ao pastejo com intensidade moderada utilizado no experimento, favorecendo o adequado crescimento vegetal (CARVALHO et al., 2011).

3.5.2. Rendimento de grãos, acúmulo e exportação de fósforo nas culturas de milho e soja

Não houve interação entre fontes e doses de P sobre os atributos RG, P-Ac e P-Ex do milho (2009/10) e da soja (2010/11), com exceção do RG de milho (2011/12) onde a interação foi significativa ($F=2,98$, $P<0,05$). Para o milho (2009/10) os atributos RG, P-Ac e P-Ex não foram influenciados pela aplicação superficial de doses (Tabela 4) e fontes (Figura 6) de P aplicados antecipadamente, por ocasião da semeadura da cultura de inverno.

Isso provavelmente ocorreu devido: (i) ao curto prazo do estudo; (ii) a precipitação foi adequada ao longo de todo o ciclo da cultura (Tabela 1); (iii) o solo apresentou altas concentrações de MO (51 g dm^{-3}) implicando em boa reserva de P orgânico no solo que pode ter sido mineralizado (RESENDE et al., 2006); e (iv) ao aumento da ciclagem de nutrientes observada em sistemas de ILP (CARVALHO et al., 2010).

Tabela 4. Equações de regressão e nível de significância dos atributos avaliados para o milho (2009/10 e 2011/12) e soja (2010/11) submetidos a doses (antecipadas) de fósforo (0, 60, 120, 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total), aplicadas na superfície do solo, em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto.

Atributos	Equação	R ²	Valor de P ⁽¹⁾
<i>Milho (2009/10)</i>			
RG ⁽²⁾	$\hat{y}=\bar{y}= 11908$	-	-
P-Ac ⁽³⁾	$\hat{y}=\bar{y}= 60$	-	-
P-Ex ⁽⁴⁾	$\hat{y}=\bar{y}= 52$	-	-
<i>Soja (2010/11)</i>			
RG	$\hat{y}=\bar{y}= 5067$	-	-
P-Ac	$\hat{y}= 71,992+0,0995x$	0,92	0,01
P-Ex	$\hat{y}= 45,671+0,0444x$	0,57	0,05
<i>Milho (2011/12)</i>			
P-Ac	$\hat{y}= 36,722+0,3853x-0,0014x^2$	0,98	0,01
P-Ex	$\hat{y}= 32,483+0,4808x-0,002x^2$	0,98	0,01

⁽¹⁾Nível de significância da equação. ⁽²⁾RG: rendimento de grãos. ⁽³⁾P-Ac: fósforo acumulado na parte aérea. ⁽⁴⁾P-Ex: fósforo exportado nos grãos.

Para a soja (2010/11) não houve diferença entre os tratamentos sobre o RG (Tabela 4 e Figura 6). Porém, o P-Ac e o P-Ex foram aumentados linearmente mediante o uso de doses de P (Tabela 4), obtendo maiores acúmulos devido à aplicação de SFT e TFM (Figura 6). Esses resultados podem ser caracterizados pelo consumo de luxo exercido pela planta já que não houve respostas para o RG. Fato este, provavelmente interligado ao processo fisiológico de fixação de nitrogênio (FBN), que exige grande quantidade de energia (P na forma de ATP) (TAIZ e ZEIGER, 2004). Em estudos sobre a capacidade de absorção de P e a fixação biológica de N (FBN) na soja, Miao et al. (2007) e Rotaru e Sinclair (2009) verificaram que a deficiência de P tem sido um dos fatores que mais afeta a produção de leguminosas em diversos tipos de solos. Esses autores observaram correlação linear positiva entre a absorção de P e a formação de nódulos, indicando que doses mais elevadas de P estimulariam a FBN, devido ao fato da planta armazenar maiores quantidades de P. Os menores incrementos do P-Ac e P-Ex mediante os tratamentos com o uso de FNR foram plausíveis (Figura 6), pois tem sido observado que as culturas anuais apresentam alta demanda de P em um curto espaço de

tempo e seus efeitos são observados em estudos de médio-longo prazo (NOVAIS e SMYTH, 1999; RESENDE et al., 2006).

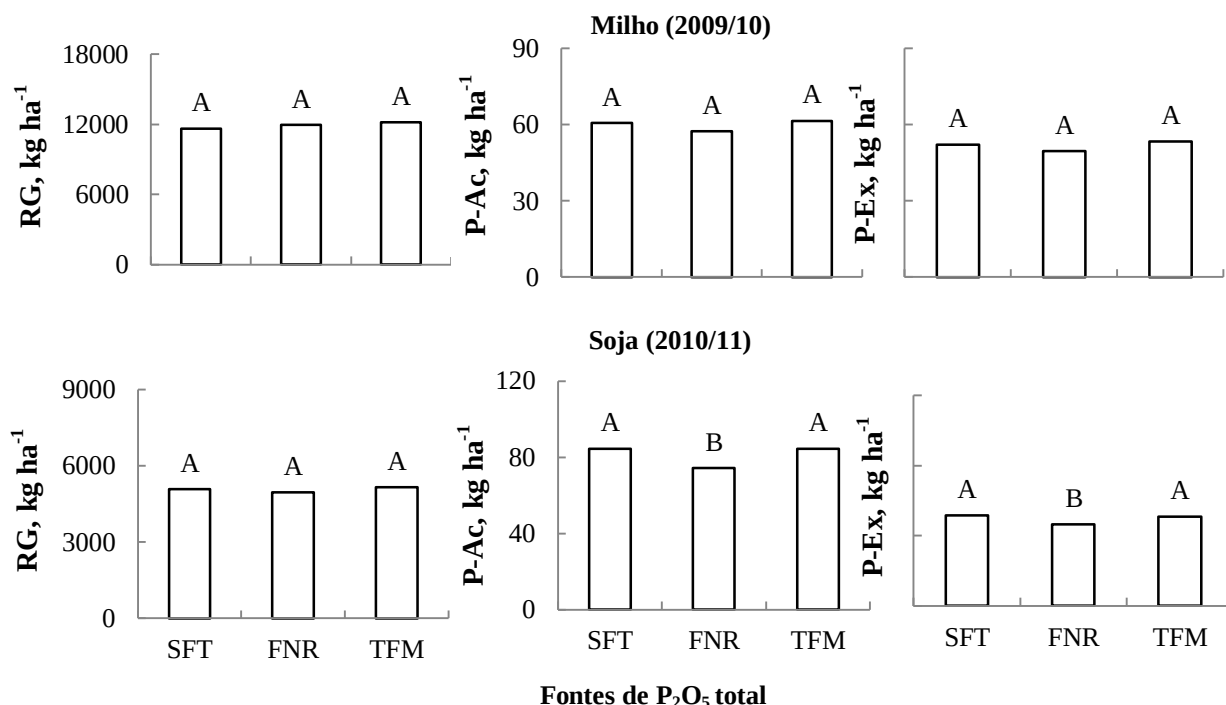


Figura 6. Rendimento de grãos (RG), fósforo acumulado na parte área (P-Ac) e fósforo exportado (P-Ex) nos grãos de milho (2009/10) e soja (2010/11), após aplicação antecipada e superficial de fontes de fósforo na integração lavoura-pecuária em plantio direto. SFT: superfosfato triplo; FNR: fosfato natural reativo; TFM: termofosfato magnesiano. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

No caso do milho (2011/12) houve interação entre doses e fontes de P para o RG (Figura 7). O incremento do RG foi devido ao uso (antecipado) de doses de TFM e FNR, mas não houve diferença pela aplicação de SFT (Figura 7). O máximo RG (14649 kg ha^{-1}) seria obtido mediante o uso de 116 kg ha^{-1} de P_2O_5 na forma de TFM e no caso do FNR, o efeito foi linear.

A ausência de efeito da aplicação antecipada de SFT sobre o rendimento de milho (2011/12) pode ser atribuída: (i) à alta solubilidade deste fertilizante, resultando em imediata disponibilização de P no sistema, favorecendo maior absorção pelas plantas forrageiras e/ou adsorção pelos colóides do solo, em curto espaço de tempo após sua aplicação (ONO et al., 2009), (ii) ao fato dos tratamentos com a aplicação de SFT sobre a aveia preta (2011) –

cultura antecessora ao milho 2011/12 – proporcionarem os menores rendimentos de MS e acúmulos de P nesta cultura, comparado ao uso de TFM (Figuras 5), resultando em menor retorno de P ao sistema, e (iii) ao menor efeito residual do SFT que tem sido observado e comprovado em estudos de médio-longo prazo (PROCHNOW et al., 2003; RESENDE et al., 2006).

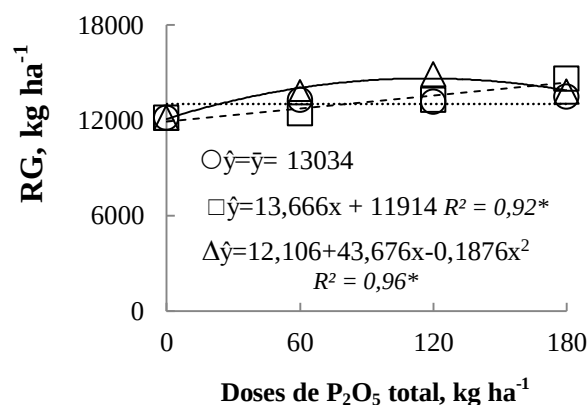


Figura 7. Rendimento de grãos (RG) de milho (2011/12), após aplicação antecipada e superficial de doses e fontes de fósforo na integração lavoura-pecuária em plantio direto. $\circ$ Superfosfato triplo (SFT), $\square$ fosfato natural reativo (FNR), e Δ termofosfato magnésiano (TFM). Pontos são médias de quatro repetições (**: $P < 0,01$ e *: $P < 0,05$).

Quanto ao FNR, apesar de este produto ser insolúvel em água e apresentar baixa solubilidade em ácido cítrico (20 g L^{-1}), tem sido observado que o somatório da sua eficiência, quando estimada em períodos de mais de dois ciclos de cultivo, pode-se igualar aos fosfatos solúveis (MOREIRA et al., 2002). Portanto, neste estudo a dissolução do FNR certamente foi favorecida devida: (i) ao alto teor de MO no solo (51 g dm^{-1}) na camada 0-20 cm diminuindo a probabilidade de adsorção de P, (ii) ao maior tempo de contato do fertilizante com o solo, devido às adubações em anos anteriores, e (iii) ao fornecimento de prótons (H^+) pela provável acidificação da rizosfera, potencializado pela presença de animais no sistema (SOUZA et al., 2008).

Entretanto, a maior eficiência do RG de milho (2011/12) seria observada mediante o uso do TFM, pois para cada quilo de P aplicado no solo na forma de FNR e TFM haveria um incremento de 14 e 44 kg de grãos de milho produzidos, respectivamente (Figura 7).

Analisando a eficiência relativa dos fertilizantes em comparação à testemunha (Tabela 5), destaca-se que as doses de 120 kg ha⁻¹ de TFM e 180 kg ha⁻¹ de FNR seriam as doses que proporcionariam os maiores acréscimos na produção sendo de 23 e 19%, respectivamente. Isso demonstra a alta eficiência de silicofosfatos pelas plantas, pois nesse caso, a mesma eficiência relativa do TFM em relação ao FNR seria obtida com menor dose de fertilizante aplicado.

Tabela 5. Eficiência relativa do rendimento de grãos de milho (2011/12), considerando as doses e fontes de fósforo aplicadas por ocasião da semeadura da aveia preta (2011) em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto.

Fontes de Fósforo	Doses de Fósforo	Eficiência Relativa
	----- kg ha ⁻¹ -----	----- % -----
Superfosfato triplo	60	105 C
Fosfato natural reativo	60	104 C
Termofosfato magnésiano	60	113 B
Superfosfato triplo	120	107 C
Fosfato natural reativo	120	109 B
Termofosfato magnésiano	120	123 A
Superfosfato triplo	180	108 C
Fosfato natural reativo	180	119 A
Termofosfato magnésiano	180	113 B
Testemunha ⁽¹⁾	0	100 D

⁽¹⁾Tratamento testemunha (controle) = 100%. Médias seguidas de mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Houve efeito quadrático para o P-Ac e P-Ex devido à aplicação de doses de P (Tabela 4) e incremento destes atributos mediante uso de TFM (Figura 7). Os maiores acúmulos de P-Ac (63 kg ha⁻¹) e P-Ex (61 kg ha⁻¹) no milho (2011/12) seriam obtidos nas doses de 138 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. O efeito quadrático desses atributos pode estar relacionado com os seguintes fatores: (i) à alta concentração de P no solo que, possivelmente, resultou em decréscimo na concentração de zinco (Zn) na planta, que tem sido o mais limitante para o milho, devido à inibição competitiva P vs. Zn, (MALAVOLTA, 2006); (ii) a dose observada que proporcionou o máximo RG ficou em equilíbrio com a

solução no solo, caracterizando o limite de absorção da planta entre solo-dreno e solo-fonte (NOVAIS e SMYTH, 1999); e (iii) à capacidade de produção máxima do híbrido 30F53 foi alcançada, sendo inclusive, superior ao que tem sido observado para a média de produção no Paraná – entre 13000 a 14000 kg ha⁻¹ (PIONEER, 2011).

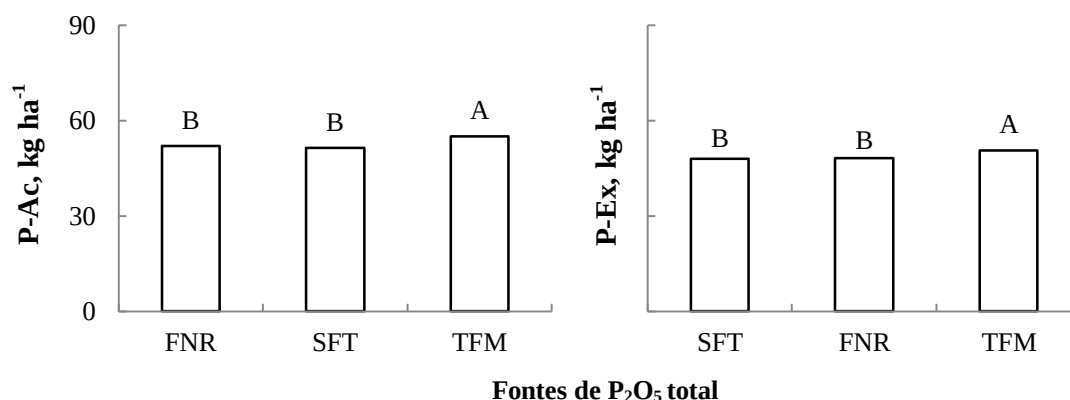


Figura 8. Fósforo acumulado na parte área (P-Ac) e fósforo exportado (P-Ex) nos grãos de milho (2011/12), após aplicação antecipada e superficial de fontes de fósforo na integração lavoura-pecuária em plantio direto. SFT: superfosfato triplo; FNR: fosfato natural reativo; TFM: termofosfato magnesiano. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

As médias de precipitação para as safras de primavera-verão nos meses de janeiro e fevereiro encontraram-se adequadas para o desenvolvimento das culturas de milho (2009/10 e 2011/12) e soja (2010/11) (Tabela 1). Fato que deve ser salientado, pois tem sido observado que é nesse período (florescimento e enchimento de grãos) em que as culturas necessitam de adequada quantidade de água devido à maior demanda por nutrientes (BERGAMASCHI et al., 2004).

A média de produção de grãos de milho da última safra no Paraná foi se de 7873 kg ha⁻¹ e de soja 3360 kg ha⁻¹ (CONAB, 2011). Portanto, neste estudo os RG tanto de milho como de soja (mesmo quando na ausência de efeito) foram elevados em todos os anos. Altos rendimentos de grãos têm sido observados nos estudos com ILP em PD e atribuídos ao incremento na ciclagem de nutrientes proporcionados pelo pastejo animal (BALBINOT JUNIOR et al., 2009, CARVALHO et al., 2010, SILVA et al., 2012).

3.6. CONCLUSÕES

1. O uso de SFT proporcionou maior rendimento de MST e acúmulo de P somente para a aveia preta no primeiro ano de cultivo.

2. No segundo ano, a aplicação de TFM ocasionou maior acúmulo de P no azevém anual e, para a soja, a aplicação tanto de TFM quanto de SFT proporcionaram maior acúmulo e exportação de P nos grãos.

3. Ao final do terceiro ano o uso de TFM proporcionou maior rendimento de MST e acúmulo de P tanto para a aveia preta quanto para a cultura do milho.

4. A aplicação de fontes insolúveis em água, em especial o TFM, obtiveram maiores efeitos residuais, proporcionando maiores rendimentos forrageiros e de grãos de milho, após 36 meses de estudo.

4. APROVEITAMENTO DE FÓSFORO PELA CULTURA DO MILHO NA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM PLANTIO DIRETO

4.1. RESUMO

O fósforo tem sido o nutriente mais limitante nos sistemas agrícolas de produção no Brasil, devido à sua baixa disponibilidade no solo. Os objetivos deste trabalho foram determinar as concentrações de fósforo (P) disponível extraído pelos métodos de Mehlich-1 (M1), Resina trocadora de íons (RTI) e Morgan Modificado (MM) em diferentes camadas de solo, após 36 meses de experimentação com aplicação de fosfatos em um sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) em plantio direto (PD). Ainda, verificar qual método de extração proporciona melhor correlação com atributos da cultura do milho. O experimento foi instalado em abril/2009, no município de Castro-PR, em um Cambissolo Háptico textura muito argilosa. O delineamento empregado foi em esquema fatorial incompleto (3x3+1), com quatro repetições. Os tratamentos consistiram na aplicação anual de doses (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅), na superfície e em área total, por ocasião da semeadura da forrageira de inverno (aveia preta ou azevém anual), nas formas de superfosfato triplo (SFT), fosfato natural reativo (FNR) e termofosfato magnésiano (TFM). Aos 36 meses de experimentação (abril/2012), depois da colheita do milho, procederam-se coletas de solos das camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm, visando determinar as concentrações de P disponível pelos extratores de M1, RTI e MM. Na cultura do milho foram quantificados o rendimento de massa seca (RMS), o rendimento de grãos (RG), o acúmulo de fósforo na massa seca (P-MS) e a exportação de fósforo (P-Ex), devido à colheita dos grãos, para prever a eficiência dos extratores sobre a disponibilidade de P. A Resina trocadora de íons extraiu maiores quantidades de P disponível, seguida do extrator de Mehlich-1 e do Morgan modificado. Nos tratamentos que receberam aplicação de superfosfato triplo, os extratores de Mehlich-1 e Resina trocadora de íons obtiveram eficiência semelhante quando correlacionados com os atributos de RMS, RG, P-MS e P-Ex do milho. Para as fontes insolúveis em água (FNR e TFM), o P extraído pela Resina trocadora de íons melhor se correlacionou com o P-MS e o P-Ex. A solução de Morgan modificada foi ineficiente para prever a biodisponibilidade de P para o milho, cultivado em solo com alto teor de argila e óxidos de Fe e Al, que recebeu a aplicação de doses e fontes de P, em um sistema de ILP em PD.

PALAVRAS-CHAVE: *Zea mays* L., Mehlich-1, Resina trocadora de íons, Morgan modificado, sistema integrado de produção.

4.2. SUMMARY

Phosphorus has been the most limiting nutrient in agricultural production systems in Brazil, due to its low availability in soil. The objectives of this study were to determine the concentration of phosphorus (P) extracted by the methods of Mehlich-1 (M1), ion exchange resin (IER) and Modified Morgan (MM) in different soil layers, after 36 months of study with application of phosphates in a system of crop-livestock integration (CLI) under no-tillage (NT). Also, check which procedure provides better correlation between plant (maize) and soil attributes. The experiment was established in April 2009, in the municipality of Castro-PR in a Dystric Cambisol. The experimental design was an incomplete factorial ($3 \times 3 + 1$), with four replications. The treatments consisted in applying annual rates (0, 60, 120 and 180 kg ha⁻¹ P₂O₅), in the surface (total area), during sowing of winter forage (black oat or annual ryegrass) in the form of triple superphosphate (TSP), rock phosphate (RRP) and magnesium termophosphate (MTP). In April 2012 (36 months of experimentation), after maize harvest, soil samples were collected from the layers 0-5, 5-10, 10-15 and 15-20 cm, to determine the concentrations of available P by the M1, IER and MM extractants. Dry matter yield (DMY), grain yield (GY), phosphorus accumulation in dry mass (P-DM) and phosphorus exportation (P-Ex) were quantified in the maize crop, to predict the efficiency of the extractants on the availability of P for this crop. The IER extracted greater amounts of P, followed by the extractor M1 and MM. In the treatments that received application of TSP, the M1 and IER extractors has obtained similar efficiency when correlated with the maize's attributes (DMY, GY, P-DM and P-Ex). IER was the most efficient extractor which correlated with the P-DM and P-Ex when were applied sources insoluble in water (RRP and MTP). The modified Morgan extractor was ineffective to predicting the bioavailability of P for the maize grown in a soil with high content of clay and Fe and Al oxides, which received the application of rates and sources of P in a CLI system under NT.

KEYWORDS: *Zea mays* L., Mehlich-1, ion exchange resin, modified Morgan, integrated production system.

4.3. INTRODUÇÃO

O sistema de integração lavoura-pecuária (ILP), aliado ao plantio direto (PD) tem assumido presença cada vez maior nas propriedades rurais da região sul do Brasil (MORAES et al., 2002). Isso se deve principalmente às baixas lucratividades que as culturas de inverno, em especial o trigo, têm proporcionado, levando o agricultor a buscar alternativas de incremento na rentabilidade nessa época do ano (CARVALHO et al., 2010).

Para atingir elevados rendimentos nos sistema de produção, o manejo da fertilidade do solo torna-se uma prática fundamental, devido ao fato dos solos brasileiros serem altamente intemperizados e pobres em fósforo (P) (NOVAIS e SMYTH, 1999). Nesse contexto, o fornecimento de P tem sido uma prática essencial no país e o tipo de fonte fosfatada utilizada, tem resultado em respostas distintas para as culturas (RESENDE et al., 2006; SANTOS et al., 2008).

Os fosfatos mais comumente utilizados no Brasil incluem: (i) fosfatos solúveis em água – superfosfatos; (ii) fosfatos insolúveis em água e alta solubilidade em ácido cítrico (20 g L^{-1}) – termofosfatos e; (iii) fosfatos insolúveis em água e baixa solubilidade em ácido cítrico (20 g L^{-1}) – fosfatos naturais reativos (MALAVOLTA, 2006). Os modos de aplicação de P também tem sido diversos, sendo os mais utilizados para produção de grãos: (i) no sulco de semeadura; (ii) a lanco na superfície e; (iii) em faixas (SANTOS et al., 2008). No entanto, tem sido observado que aplicações de adubos fosfatados na superfície e de forma antecipada em sistema PD têm proporcionado altos rendimentos de grãos de soja e milho (BOHAC et al., 2007; BERTOLINI et al., 2008), tornando-se uma interessante alternativa para o sistema de ILP em PD (MORAES et al., 2012).

A análise química do solo consiste na principal ferramenta para a recomendação segura de fertilizante fosfatado (SANTOS e KLIEMANN, 2005). No entanto, a eficiência dos extratores para avaliar a biodisponibilidade de P tem sido questionada e, em muitas situações

de solo e manejo, pode não representar as condições reais de fertilidade deste nutriente (SILVA e RAIJ, 1999; RAIJ, 2011). A maioria dos laboratórios de análise química de solo no Brasil utiliza o extrator Mehlich-1 (M1) para determinação do P no solo sendo, inclusive, o método oficial do Estado do Paraná (PAVAN et al., 1992). Entretanto, esse método tem sido um dos menos indicados para solos argilosos, principalmente onde houve aplicação de fosfatos insolúveis em água (RAIJ, 2011).

O método de extração da Resina trocadora de íons (RTI) é oficialmente utilizado do Estado de São Paulo e tem se demonstrado mais eficiente na determinação da disponibilidade de P do solo em comparação com outros métodos comumente utilizados no Brasil (MIOLA et al., 1999; SANTOS e KLIEMANN, 2005). Seu uso está baseado no fato de que o solo é um trocador de íons, sendo o pH da suspensão resina-solo semelhante ao pH do solo, tendo semelhança com a absorção de P pela planta (RAIJ, 2011). Uma das críticas à RTI tem sido referida à pouca praticidade do método, dificultando seu uso em larga escala (MOREIRA e MALAVOLTA, 2001).

Desta forma, torna-se interessante o estudo sobre outros métodos para extração de P (além dos tradicionalmente utilizados no país), como exemplo da solução de Morgan modificada (MM), sugerida por Magdoff et al. (1999). Essa solução tem sido utilizada nos Estados Unidos e possui maior capacidade de extração do P ligado à fração orgânica do solo – que é expressivo nos sob PD (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2003). Devido ao fato do pH da solução de MM ser próximo ao da rizosfera, provavelmente não superestimaria o P oriundo de fosfatos insolúveis em água.

A eficiência dos extratores para avaliar a biodisponibilidade de P no PD tem sido pouco estudada e ainda não é bem conhecida para os sistemas integrados de produção. Por isso, faz-se necessário o estudo de diferentes tipos de extratores de P que indiquem a melhor

disponibilidade deste nutriente para o milho – uma das culturas mais importantes nos sistemas agropecuários (BALBINOT JUNIOR et al., 2011).

Este trabalho teve por objetivo: (i) determinar as concentrações de P no solo extraído pelos métodos de M1, RTI e MM em camadas distintas de solo, em um sistema de ILP em PD adubado com diferentes fontes e doses de P_2O_5 por ocasião da semeadura de forrageiras anuais de inverno; e (ii) verificar qual método de extração proporciona melhor correlação (para cada fonte utilizada) com atributos do milho: rendimento de massa seca (RMS), rendimento de grãos (RG), acúmulo de P na MS (P-MS) e exportação de P pelos grãos (P-Ex), devido à colheita.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1. Localização, histórico da área, delineamento e condução do experimento

A localização, o histórico da área, o delineamento e a condução do experimento encontram-se descritos no item 3.4.1 e 3.4.2. Nesse capítulo serão descritos os métodos específicos para o entendimento do assunto em questão.

4.4.2. Amostragens de solo e planta

O milho (2011/12) foi considerado como planta indicadora da disponibilidade de P no solo. Portanto, aos 36 meses após a instalação do experimento (abril/2012), procedeu-se a amostragem do solo, neste caso, após a colheita dos grãos. Foram retiradas 12 amostras simples para formar uma amostra composta por parcela (OLIVEIRA et al., 2007a), para cada camada avaliada (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm), mediante uso de trado calador. Também foram estimadas as concentrações de P disponível nas camadas de 0-10 cm (através da média ponderada entre as camadas de 0-5 e 5-10 cm) e de 0-20 cm (média ponderada entre as camadas de 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm).

Amostras de milho (2011/12) foram coletadas para quantificação do rendimento de massa seca (RMS), rendimento de grãos (RG), acúmulo de P na MS (P-MS), e exportação de P pelos grãos (P-Ex), devido à colheita. Quando as plantas de milho atingiram o estágio fenológico R3, foram coletadas 1,0 m de plantas por parcela, onde foram separadas em subamostras de folhas, colmos e espigas para quantificar o RMS e o P-MS. Após a maturação fisiológica (estádio R6), o milho foi colhido e trilhado para a determinação do rendimento de grãos (RG). Foram colhidas de cada parcela cinco linhas centrais por 4,0 m de comprimento, perfazendo uma área de 17,0 m². Subamostras de grãos (100 g) foram retiradas visando quantificar a concentração de P nos grãos (P-Ex).

4.4.3. Análises laboratoriais

As amostras de solo, depois de secas em estufa com circulação forçada de ar a 40°C, durante 48 horas, foram destorroadas, moídas e peneiradas em peneira de malha de 2,0 mm, sendo então chamadas de terra fina seca em estufa (TFSE). As amostras de TFSE foram destinadas às determinações de P disponível pelos seguintes métodos: (i) P disponível, por meio de extração com a solução de Mehlich-1 (P-M1): [ácido clorídrico (HCl) 0,05 mol L⁻¹ + ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0,025 mol L⁻¹], sugerida por Pavan et al. (1992); (ii) P disponível pelo método da Resina trocadora de íons (P-RTI): [Amberlite IRA-410 e Amberlite IRA-120], conforme Raij et al. (1986); e (iii) P disponível pela solução de Morgan modificada (P-MM): [hidróxido de amônio (NH₄OH) + ácido acético (CH₃COOH) 1,25 mol L⁻¹ a pH 4,8], proposta por McIntosh (1969) e Magdoff et al. (1999).

As amostras de planta foram secadas em estufa de circulação de ar forçada a 60 °C, até atingir massa constante, para quantificação do RMS. Os grãos foram pesados e o RG expresso em 130 g kg⁻¹ de umidade. Depois, todas as subamostras foram moídas em moinho tipo “Wiley” equipado com malha de 1,0 mm, e armazenadas até digestão nítrico-perclórica e a quantificação das concentrações de P, conforme métodos propostos por Malavolta et al. (1997). Foram calculados os acúmulos de P-MS e P-Ex mediante a multiplicação da concentração deste nutriente na subamostra pelo RMS e RG, respectivamente. Todas as leituras de P (extratos de solo e planta) foram realizadas por espectrofotometria de absorção molecular.

4.4.5. Análises estatísticas

As concentrações de P no solo determinadas pelos diferentes métodos extratores (M1, RTI e MM), foram submetidas à análise estatística univariada em blocos ao acaso e esquema fatorial incompleto. Nos casos de F significativo ($P < 0,05$), foi aplicado o teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para comparar o efeito de fontes e doses de P entre tratamentos. O efeito das

variáveis foi ajustado pelos modelos de regressão de polinômios ortogonais linear ou quadrático. Na ausência de interação, foram consideradas como repetições: (i) para as doses – os blocos (quatro) e a média das fontes (SFT, FNR e TFM); (ii) para as fontes – os blocos (quatro) e a média das doses (0, 60, 120, 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total).

Coeficientes de correlação (r) de Pearson entre atributos do solo (concentrações de P fornecida por cada um dos extratores, nas diferentes camadas do solo) e do milho (RMS, RG, P-MS e P-Ex), foram utilizados para averiguar a eficiência dos extratores, para cada fonte empregada (SFT, FNR e TFM). Todas as análises estatísticas foram realizadas mediante uso do programa de computador SAS versão 9.2 (SAS System, 2010).

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1. Concentrações de fósforo no solo por diferentes métodos extratores

Para as concentrações de P extraído pela solução de Mehlich-1 (P-M1), houve interação entre fontes e doses de P nas camadas de 0-5, 0-10 e 0-20 cm (Tabela 6). Nas demais camadas (5-10, 10-15, 15-20 cm), não foi observado interação e nem efeito de doses, mas houve efeito de fontes de P sobre a disponibilidade deste nutriente (Tabela 6).

Tabela 6. Valores de F para o fósforo disponível por diferentes extratores, em camadas distintas de solo, após 36 meses de experimentação, mediante aplicação anual de fontes e doses de fósforo na superfície do solo em área total (por ocasião da semeadura da forrageira de inverno), em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto.

Camada do solo	Varição	P-M1 ⁽¹⁾	P-RTI ⁽²⁾	P-MM ⁽³⁾
0-5 cm	Fonte ⁽⁴⁾	46,79**	1,00 ^{NS}	5,73**
	Dose ⁽⁵⁾	132,26**	27,00**	10,86**
	F vs D	11,90**	1,05 ^{NS}	6,24**
5-10 cm	Fonte	8,14**	0,46 ^{NS}	1,24 ^{NS}
	Dose	2,77 ^{NS}	1,85 ^{NS}	2,60 ^{NS}
	F vs D	1,08 ^{NS}	1,11 ^{NS}	0,85 ^{NS}
10-15 cm	Fonte	5,21**	1,04 ^{NS}	- ⁽⁶⁾
	Dose	2,64 ^{NS}	0,24 ^{NS}	
	F vs D	2,24 ^{NS}	0,25 ^{NS}	
15-20 cm	Fonte	12,55**	0,39 ^{NS}	-
	Dose	2,81 ^{NS}	2,56 ^{NS}	
	F vs D	2,14 ^{NS}	0,94 ^{NS}	
0-10 cm	Fonte	47,38**	0,42 ^{NS}	2,26 ^{NS}
	Dose	94,45**	5,93**	2,25 ^{NS}
	F vs D	7,95**	0,37 ^{NS}	2,09 ^{NS}
0-20 cm	Fonte	43,05**	0,22 ^{NS}	4,44**
	Dose	87,30**	4,76**	5,36**
	F vs D	7,26**	0,07 ^{NS}	5,15**

⁽¹⁾P-M1: Fósforo extraído pela solução de Mehlich-1. ⁽²⁾P-RTI: Fósforo extraído pelo método da resina trocadora de íons. ⁽³⁾Fósforo extraído pela solução de Morgan modificada. ⁽⁴⁾Foram estudadas três fontes: superfosfato triplo, fosfato natural reativo e termofosfato magnesiano. ⁽⁵⁾Foram estudadas quatro doses: 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total. ⁽⁶⁾Valores abaixo do limite de detecção (> 0,1 mg dm⁻³ de fósforo) do método de Morgan modificado. **: P<0,01; *: P<0,05 e NS: não significativo.

As concentrações de P-M1 aumentaram linearmente devido ao uso do SFT, FNR e TFM nas camadas de 0-5, 0-10 e 0-20 cm (Figura 9). Para essas camadas o incremento foi maior mediante o uso de doses mais elevadas de FNR. No caso do SFT e TFM, foi observado que os incrementos foram similares entre si, aumentando de acordo com a dose. Nas demais camadas (5-10, 10-15 e 15-20 cm), as doses de P_2O_5 não influenciaram a disponibilidade de P-M1 (Tabela 6).

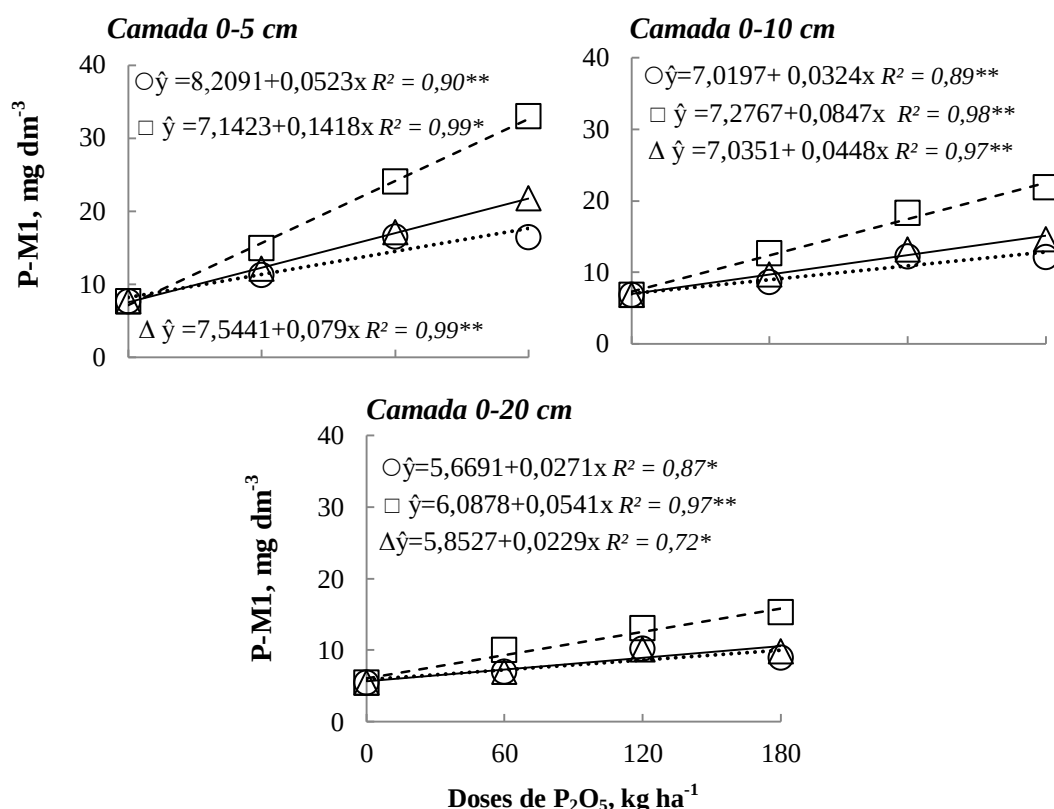


Figura 9. Fósforo disponível extraído pela solução de Mehlich-1 (P-M1), aos 36 meses após a aplicação anual na superfície (em área total) de doses (0, 60, 120 e 180 $kg \ ha^{-1}$) e fontes [superfosfato triplo ($\circ$), fosfato natural reativo ($\square$) e termofosfato magnésiano (Δ)] de P_2O_5 na integração lavoura-pecuária em plantio direto. Pontos são médias de quatro repetições. $^{**}P < 0,01$ e $^{*}P < 0,05$.

Foi observado que em todas as camadas avaliadas, as concentrações de P-M1, mediante aplicação de FNR, foram superiores às demais fontes (SFT e TFM) (Figura 10). Portanto, isso evidenciou a alta capacidade de extração de P ligado ao cálcio (Ca) do extrator Mehlich-1 (SILVA e RAIJ, 1999), que superestimou as concentrações do P disponível (RESENDE et al., 2006). Além disso, tem sido observado que o pH da solução (em torno de

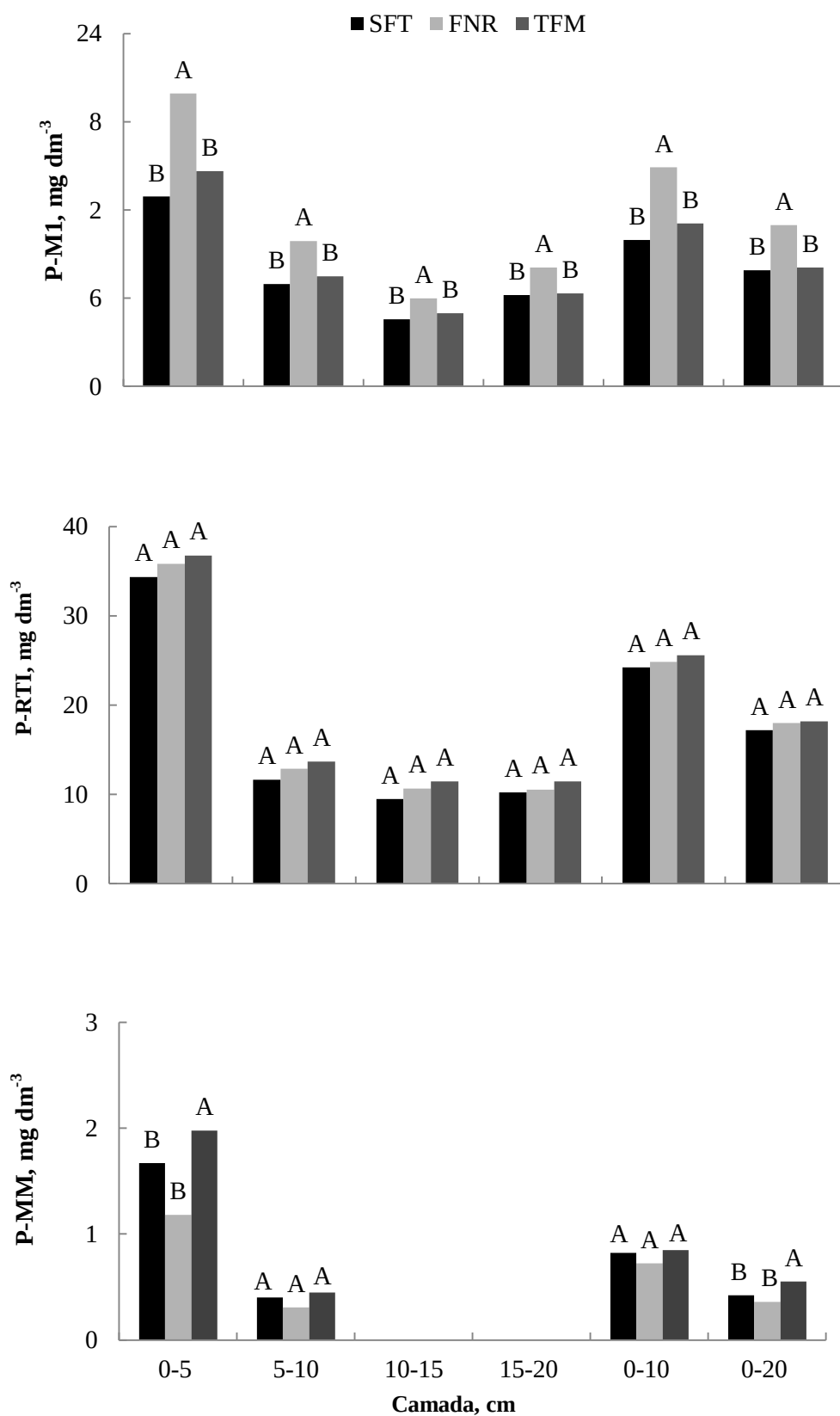


Figura 10. Efeito de fontes em camadas do solo sobre a disponibilidade do fósforo extraído pelo método de Mehlich-1 (P-M1), Resina trocadora de íons (P-RTI) e Morgan modificado (P-MM), aos 36 meses após a aplicação anual na superfície (em área total) de superfosfato triplo (SFT), fosfato natural reativo (FNR) e termofosfato magnésiano (TFM). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P=0,05$), para cada camada.

2,0) é inadequado para a solubilização de fosfatos de ferro (Fe) e alumínio (Al) e favorável para a extração de fosfatos de Ca, mesmo em formas não lábeis (RAIJ, 2011). Resultados semelhantes foram observados em estudos realizados por Brasil e Muraoka (1997); Silva et al. (1999); Santos e Kliemann (2005). Esses autores apontam que o extrator de Mehlich-1 não seria adequado para a extração de P em solos que foram adubados com fosfatos naturais.

Porém, o extrator M1 foi sensível à adição de doses de P, de forma semelhante para as fontes com alta solubilidade (em água – como o SFT e ácido cítrico – como o TFM). Isso evidencia que, delimitando as deficiências do extrator (principalmente com relação ao gradiente de argila no solo) (SILVA et al., 1999), a aplicação de SFT e TFM não ocasionaria problemas relacionados à interpretação do P disponível pelo método oficial do Paraná. Kaminski et al. (1997), comparando a extração de P proveniente do TFM e SFT, verificaram que a adição de doses desses fertilizantes, aumentaram as concentração de P-M1, de forma similar ao presente estudo.

Maiores concentrações de P-M1 nas camadas de 0-5 e 0-10 cm (Tabela 7) podem ser devidas: (i) ao fato da aplicação dos fertilizantes ser realizada na superfície, sem incorporação; (ii) nestas camadas, ocorrer maiores concentrações de carbono orgânico total (Tabela 4), que ocasiona diminuição na adsorção específica do ortofosfato (H_2PO_4^-) (GUPPY et al., 2005); (iii) devido à presença do animal que proporciona alta concentração de dejetos no sistema, aumentando o acúmulo de matéria orgânica (MO), nas camadas superficiais, até 10 cm (SOUZA et al., 2008); e (iv) pela desfolha, o pastejo proporciona maior renovação do sistema radicular das forrageiras (CARVALHO et al., 2010), aumentando a liberação de ácidos orgânicos que competem com os sítios de adsorção de P (PAVINATO e ROSOLEM, 2008), nas camadas mais superficiais.

Tabela 7. Concentrações mínimas, máximas e médias (mg dm^{-3}) de fósforo disponível por diferentes extratores, em camadas distintas de solo, após 36 meses de experimentação, mediante aplicação anual de fontes¹ e doses² de fósforo na superfície do solo em área total (por ocasião da semeadura da forrageira de inverno), em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto.

Camada	Superfosfato triplo			Fosfato natural Reativo			Termofosfato magnesiano		
	Mínima	Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média
---cm---	-----mg dm ⁻³ -----								
Fósforo disponível pela solução de Mehlich-1									
0-5	8,30	21,57	14,94	11,48	34,56	23,02	11,83	23,93	17,88
5-10	4,76	9,53	7,15	7,11	13,50	10,31	4,96	11,73	8,35
10-15	3,02	10,42	6,72	4,27	9,21	6,74	3,92	8,84	6,38
15-20	5,27	8,25	6,76	6,04	10,85	8,45	3,09	10,52	6,81
0-10	6,77	15,05	10,91	9,36	23,90	16,63	7,41	15,92	11,67
0-20	4,92	11,73	8,33	8,07	15,87	11,97	6,12	11,68	8,90
Fósforo extraído pelo método da Resina trocadora de íons									
0-5	29,68	54,05	41,87	24,60	54,38	39,49	23,98	53,71	38,85
5-10	6,43	16,64	11,54	8,82	22,50	15,66	7,17	23,07	15,12
10-15	5,74	12,70	9,22	7,36	15,16	11,26	6,39	13,17	9,78
15-20	7,39	16,62	12,01	6,95	15,35	11,15	6,43	23,92	15,18
0-10	18,72	31,36	25,04	22,44	36,19	29,32	16,41	35,04	25,73
0-20	12,89	23,51	18,20	11,99	24,95	18,47	12,40	27,44	19,92
Fósforo extraído pela solução de Morgan modificada									
0-5	1,58	4,33	2,96	0,80	1,66	1,23	1,05	5,39	3,22
5-10	0,15	0,77	0,46	0,15	0,54	0,35	0,15	0,84	0,50
10-15	- ⁽³⁾	-	-	-	-	-	-	-	-
15-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0-10	0,43	2,55	1,49	0,27	1,03	0,65	0,27	2,77	1,52
0-20	0,20	1,24	0,72	0,14	0,52	0,33	0,24	1,39	0,82

⁽¹⁾Foram estudadas três fontes: superfosfato triplo, fosfato natural reativo e termofosfato magnesiano. ⁽²⁾Foram estudadas quatro doses: 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total. ⁽³⁾Valores abaixo do limite de detecção (> 0,1 mg dm⁻³ de fósforo) do método de Morgan modificado.

Destaca-se que as concentrações de P-M1 na camada de 0-10 cm foram em média 24, 29 e 24% superiores ao observado para a camada média de 0-20 cm, para os tratamentos que receberam SFT, FNR e TFM, respectivamente (Tabela 7). Tanto esse gradiente vertical de P no solo, quanto a ausência de efeito da aplicação de doses de P₂O₅ nas camadas de 5-10, 10-15 e 15-20 cm (Tabela 6) se devem aos seguintes fatores: (i) a aplicação dos fertilizantes foi realizada na superfície (em área total), sem incorporação; (ii) a migração de P em solo tropical é muito baixa, devido à alta adsorção do ortofosfato nos óxidos de Fe e Al (NOVAIS et al., 1999); e (iii) o manejo conservacionistas adotado no PD ocasiona apenas movimentação

do solo na linha de semeadura (SANTOS et al., 2008), favorecendo a maior concentração de nutrientes nas camadas até 10 cm de profundidade (SCHLINDWEIN e GIANELLO 2008).

Não houve interação entre fontes e doses de P sobre a disponibilidade deste nutriente, extraído pelo método da Resina trocadora de íons (P-RTI), para todas as camadas de solo avaliadas (Tabela 6). Houve aumento quadrático das concentrações de P-RTI, devido ao uso de doses de P_2O_5 , nas camadas de 0-5, 0-10 e 0-20 cm (Figura 11). As máximas concentrações de P-RTI nas camadas 0-5 cm ($44,4 \text{ mg dm}^{-3}$), 0-10 cm ($27,0 \text{ mg dm}^{-3}$) e 0-20 cm ($19,0 \text{ mg dm}^{-3}$) seriam obtidas nas doses de 128, 126 e 126 kg ha^{-1} de P_2O_5 total, respectivamente.

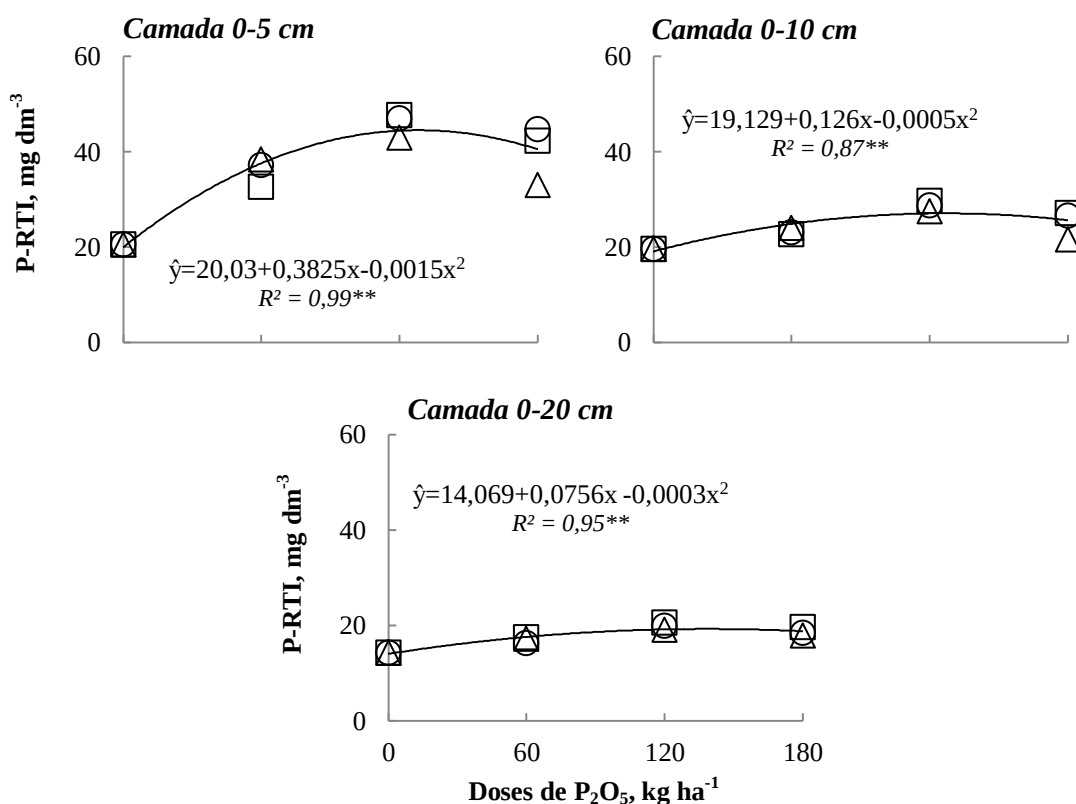


Figura 11. Fósforo disponível extraído pelo método da Resina trocadora de íons (P-RTI), aos 36 meses após a aplicação anual na superfície (em área total) de doses (0, 60, 120 e 180 kg ha^{-1}) e fontes [superfosfato triplo ($\circ$), fosfato natural reativo ($\square$) e termofosfato magnésiano (Δ)] de P_2O_5 na integração lavoura-pecuária em plantio direto. Pontos são médias de quatro repetições. $^{***}P < 0,01$.

Para as demais camadas (5-10, 10-15 e 15-20 cm), as doses de P_2O_5 não influenciaram na disponibilidade de P-RTI (Tabela 6), de forma similar ao observado para as

concentrações de P-M1 (Tabela 6). Ainda, as fontes de P não influenciaram as concentrações de P-RTI no solo (Figura 10). A RTI tem sido pouco afetada por resíduos de P ligado ao Ca no solo (fato pertinente quando o solo recebe FNR) (Tabela 7), devido ao efeito de tamponamento da suspensão em pH pouco abaixo da neutralidade e à presença de íons bicarbonato (RAIJ, 2011). Resultados similares aos obtidos no presente estudo também foram observados por Silva et al. (1999); Silva e Raij (1999); Moreira e Malavolta (2001) e Schlindwein e Gianello (2008).

Maiores concentrações de P-RTI foram obtidas das camadas de 0-5 e 0-10 cm (Figura 11), como também observado para o P-M1 (Figura 9). No entanto, as concentrações de P-RTI na camada 0-10 cm foram em média 27, 37 e 23% superiores em relação à camada de 0-20 cm, para os tratamentos que receberam SFT, FNR e TFM, respectivamente (Tabela 7).

Para o P extraído pela solução de Morgan modificada (P-MM), foi possível avaliar as concentrações deste nutriente apenas nas camadas de 0-5, 5-10, 0-10 e 0-20 cm (Tabelas 6 e 7). Nas demais camadas (10-15, 15-20 cm), as concentrações de P extraídos ficaram abaixo do limite de detecção do método ($> 0,1 \text{ mg dm}^{-3}$), sendo então, considerados valores zero (0,0) para o cálculo da média ponderada da camada de 0-20 cm (Tabelas 6 e 7).

Houve interação entre fontes e doses de P para a disponibilidade de P-MM nas camadas de 0-5 e 0-20 cm (Tabela 6 e Figura 12). Para as demais camadas não houve efeito dos tratamentos sobre a disponibilidade de P-MM (5-10 e 0-10 cm), ou as concentrações ficaram abaixo do limite de detecção (10-15 e 15-20 cm) (Tabela 6).

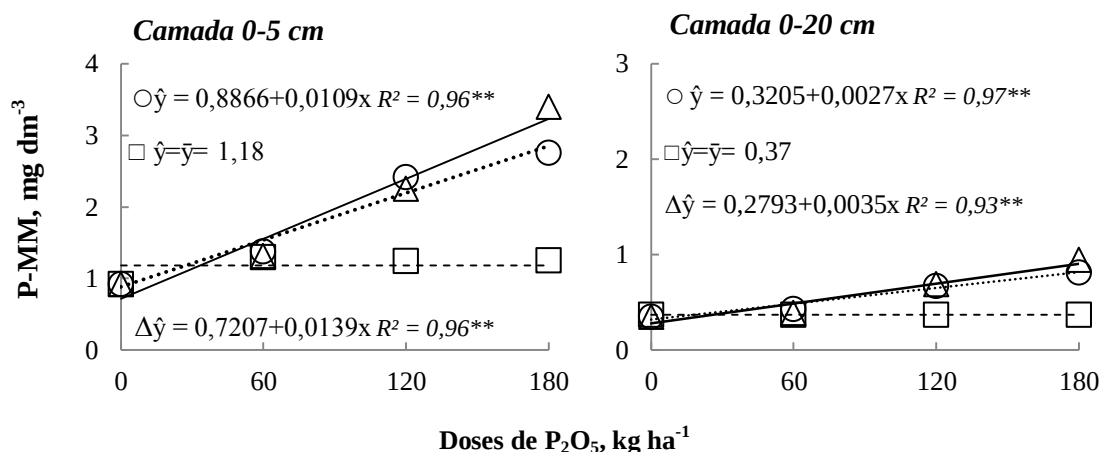


Figura 12. Fósforo disponível extraído pelo método de Morgan modificado, aos 36 meses após a aplicação anual na superfície (em área total) de doses (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹) e fontes [superfosfato triplo (○), fosfato natural reativo (□) e termofosfato magnésiano (△)] de P₂O₅ na integração lavoura-pecuária em plantio direto. Pontos são médias de quatro repetições. ******P<0,01.

As concentrações de P-MM aumentaram linearmente com o uso de doses de SFT e TFM nas camadas de 0-5 e 0-20 cm, mas o extrator não foi capaz de detectar o incremento de P no solo proveniente do FNR (Figura 12). No entanto, as concentrações de P extraído nos tratamentos que receberam TFM foram superiores às que receberam SFT (Figura 10). Devido ao fato da solução de MM ser um ácido orgânico diluído, tamponado a pH 4,8, pode ser que tenha favorecido a dissolução do TFM, pois apesar de ser insolúvel em água, esta fonte apresenta alta solubilidade em ácido cítrico (MALAVOLTA, 2006). Na camada 0-5 cm as concentrações médias de P-MM entre os tratamentos que receberam SFT e FNR não foram diferentes, e este fato também ocorreu na camada de 0-20 cm (Figura 10).

Destaca-se que as concentrações de P-MM apresentaram valores bem inferiores aos observados para os demais extratores, principalmente nos tratamentos com FNR (Tabela 7). Essa capacidade distinta de extração do P pode estar associada ao modo de ação do extrator, bem como às interações do P com o Ca presente nas fontes fosfatadas. Provavelmente, houve ação mais moderada do ácido acético sobre a solubilização da apatita, em comparação aos outros extratores (SILVA et al., 2008). Além disso, devido ao pH da solução (4,8), certamente os fosfatos de Fe e Al não foram solubilizados, resultando em baixas concentrações de P disponíveis (CABALCETA e CORDERO, 1994).

De forma similar ao ocorrido para o P-M1 e P-RTI, as concentrações de P-MM, foram superiores nas camadas superficiais (0-5 e 0-10 cm) (Tabela 7). Isso demonstrou que a adubação superficial em área total, aliada à maior concentração de material orgânico proveniente da ILP (MORAES et al., 2012), resultou em maior disponibilidade de P nas camadas superficiais (até 10 cm), concordando com as observações de Souza et al. (2008).

De modo geral, as concentrações de P disponível no solo após 36 meses de estudo, foram observadas na seguinte ordem: Resina trocadora de íons > Mehlich-1 > Morgan modificado (Tabela 7).

4.5.2. Correlações entre o fósforo extraído e os atributos do milho

Os efeitos de fontes e doses de fosfatos sobre os atributos do milho (RMS, RG, P-MS e P-Ex) em sistema de ILP em PD foram discutidos em outro trabalho. No presente artigo, esses atributos foram utilizados apenas para estudos de correlação (r) com o P disponível. Os resultados determinados pelas análises químicas podem não representar as concentrações disponíveis do nutriente no solo, mas devem apresentar a melhor correlação possível (RAIJ, 2011). Para a discussão deste trabalho, os valores de r foram classificados em cinco faixas, conforme Gujarati (2006): $0,00 < r < 0,19$ – muito fraca; $0,20 < r < 0,39$ – fraca; $0,40 < r < 0,69$ – moderada; $0,70 < r < 0,89$ – forte; $0,90 < r < 1,00$ – muito forte.

Os atributos de RMS, RG, P-MS e P-EX do milho correlacionam-se positivamente com as concentrações de P-M1 e P-RTI nas camadas de 0-5, 0-10 e 0-20 cm, mediante a aplicação das três fontes fosfatadas (SFT, FNR e TFM) (Tabela 8). Para as demais camadas (5-10, 10-15 e 15-20 cm), não houve correlação entre os atributos de planta (RMS, RG, P-MS e P-EX) e o P-M1 e P-RTI (Tabela 8).

Quanto às concentrações de P-MM, essas não se correlacionaram com os atributos de planta de milho (Tabela 8), devido à sua baixa capacidade de extração de P do solo (Tabela 7). Cabalceta e Cordero (1994) observaram valores abaixo de $5,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de P-MM em

Tabela 8. Coeficientes de correlação entre as concentrações de fósforo disponível por diferentes extratores e camadas distintas de solo, e os atributos do milho, após 36 meses de experimentação, mediante aplicação anual de fontes¹ e doses² de fósforo na superfície do solo em área total (por ocasião da semeadura da forrageira de inverno), em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto.

Camada (cm)	P-M1 ⁽³⁾			P-RTI ⁽⁴⁾			P-MM ⁽⁵⁾		
	SFT ⁽⁶⁾	FNR ⁽⁷⁾	TFM ⁽⁸⁾	SFT	FNR	TFM	SFT	FNR	TFM
<i>Rendimento de massa seca do milho</i>									
0-5	0,66** ⁽⁹⁾	0,52*	0,55*	0,69**	0,64**	0,65**	0,20 ^{NS}	0,14 ^{NS}	0,21 ^{NS}
5-10	0,18 ^{NS}	0,23 ^{NS}	0,18 ^{NS}	0,18 ^{NS}	0,24 ^{NS}	0,31 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,02 ^{NS}	0,11 ^{NS}
10-15	0,31 ^{NS}	0,19 ^{NS}	0,17 ^{NS}	0,34 ^{NS}	0,21 ^{NS}	0,29 ^{NS}	- ⁽¹⁰⁾	-	-
15-20	0,36 ^{NS}	0,32 ^{NS}	0,24 ^{NS}	0,37 ^{NS}	0,33 ^{NS}	0,26 ^{NS}	-	-	-
0-10	0,63**	0,51*	0,58*	0,64**	0,60**	0,67**	0,23 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,21 ^{NS}
0-20	0,62**	0,50*	0,53*	0,65**	0,65**	0,62**	0,18 ^{NS}	0,12 ^{NS}	0,20 ^{NS}
<i>Rendimento de grãos de milho</i>									
0-5	0,62**	0,50*	0,51*	0,65**	0,60**	0,59*	0,14 ^{NS}	0,12 ^{NS}	0,23 ^{NS}
5-10	0,12 ^{NS}	0,10 ^{NS}	0,17 ^{NS}	0,14 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,04 ^{NS}	0,06 ^{NS}	0,18 ^{NS}
10-15	0,21 ^{NS}	0,21 ^{NS}	0,28 ^{NS}	0,22 ^{NS}	0,30 ^{NS}	0,30 ^{NS}	-	-	-
15-20	0,18 ^{NS}	0,23 ^{NS}	0,19 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,25 ^{NS}	0,21 ^{NS}	-	-	-
0-10	0,60**	0,52*	0,55*	0,61**	0,58*	0,58*	0,12 ^{NS}	0,08 ^{NS}	0,22 ^{NS}
0-20	0,63**	0,50*	0,52*	0,64**	0,59**	0,61**	0,10 ^{NS}	0,02 ^{NS}	0,15 ^{NS}
<i>Fósforo acumulado na massa seca do milho</i>									
0-5	0,76**	0,62**	0,68**	0,79**	0,74**	0,75**	0,26 ^{NS}	0,18 ^{NS}	0,31 ^{NS}
5-10	0,19 ^{NS}	0,32 ^{NS}	0,16 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,35 ^{NS}	0,36 ^{NS}	0,05 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,17 ^{NS}
10-15	0,38 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,33 ^{NS}	0,38 ^{NS}	0,39 ^{NS}	0,42 ^{NS}	-	-	-
15-20	0,40 ^{NS}	0,34 ^{NS}	0,42 ^{NS}	0,41 ^{NS}	0,55 ^{NS}	0,48 ^{NS}	-	-	-
0-10	0,74**	0,63**	0,66**	0,75**	0,68**	0,69**	0,20 ^{NS}	0,12 ^{NS}	0,30 ^{NS}
0-20	0,73**	0,60**	0,64**	0,77**	0,72**	0,73**	0,23 ^{NS}	0,15 ^{NS}	0,25 ^{NS}
<i>Fósforo exportado nos grãos de milho</i>									
0-5	0,72**	0,61**	0,66**	0,76**	0,71**	0,73**	0,28 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,34 ^{NS}
5-10	0,14 ^{NS}	0,30 ^{NS}	0,23 ^{NS}	0,16 ^{NS}	0,33 ^{NS}	0,30 ^{NS}	0,23 ^{NS}	0,02 ^{NS}	0,32 ^{NS}
10-15	0,31 ^{NS}	0,18 ^{NS}	0,31 ^{NS}	0,32 ^{NS}	0,38 ^{NS}	0,37 ^{NS}	-	-	-
15-20	0,18 ^{NS}	0,15 ^{NS}	0,22 ^{NS}	0,20 ^{NS}	0,35 ^{NS}	0,37 ^{NS}	-	-	-
0-10	0,72**	0,62**	0,66**	0,73**	0,68**	0,69**	0,16 ^{NS}	0,15 ^{NS}	0,28 ^{NS}
0-20	0,71**	0,61**	0,62**	0,76**	0,70**	0,73**	0,17 ^{NS}	0,09 ^{NS}	0,27 ^{NS}

⁽¹⁾Foram estudadas três fontes: superfosfato triplo, termofosfato magnesiano e fosfato natural reativo. ⁽²⁾Foram estudadas quatro doses: 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total. ⁽³⁾P-M1: Fósforo extraído pela solução de Mehlich-1. ⁽⁴⁾P-RTI: Fósforo extraído pelo método da resina trocadora de íons. ⁽⁵⁾Fósforo extraído pela solução de Morgan modificada. ⁽⁶⁾SFT: Superfosfato triplo. ⁽⁷⁾FNR: Fosfato natural reativo. ⁽⁸⁾TFM: Termofosfato magnesiano. ⁽⁹⁾Corresponde a 16 observações. ⁽¹⁰⁾Valores abaixo do limite de detecção (> 0,1 mg dm⁻³ de fósforo) do método de Morgan modificado. **: P<0,01; *: P<0,05 e NS: não significativo.

quatro tipos de solos da Costa Rica, e verificaram a ineficiência da solução de Morgan modificada para a determinação do P disponível em solos com altos concentrações de óxidos de Fe e Al. Os resultados semelhantes do presente estudo, indicam que talvez a solução de

Morgan modificada não seja eficiente para avaliar a biodisponibilidade deste nutriente para a cultura do milho em solos argilosos cultivados sob sistema de ILP em PD no sul do Brasil.

As correlações positivas entre as concentrações de P disponível (P-M1 e P-RTI) nas camadas 0-5, 0-10 e 0-20 cm, e os atributos de rendimentos (RMS e RG), foram moderados, independente da fonte utilizada (Tabela 8). Isso evidenciou que para esses atributos, a superioridade da RTI em relação ao M1 (RAIJ, 2011), não ocorreu no presente estudo, concordando com as observações realizadas por Moreira e Malavolta (2001).

Foram observadas correlações fortes entre o P-MS e o P-Ex com o P disponível (P-M1 e P-RTI), nos tratamentos que receberam SFT (Tabela 8). Esses resultados indicam a equivalência dos procedimentos laboratoriais de M1 e RTI para avaliação do P disponível em solo que recebeu aplicação de fonte fosfatada de alta solubilidade em água (SILVA et al., 1999; SANTOS e KLIEMANN, 2005).

Quando foram empregadas doses de FNR e TFM, os valores de r entre o P-RTI com o P-MS e o P-Ex foram similares ou superiores aos de P-M1 para esses atributos do milho (Tabela 8). Melhores correlações entre o P-MS e o P-Ex do milho com o P-RTI nesses tratamentos se devem: (i) ao meio de extração do método ser de baixa concentração salina, favorecendo a dissolução de P disponível; (ii) o pH da solução é próximo a 7,0, fator favorável para a extração das formas mais disponíveis de P, na faixa de pH pertinente para as plantas; e (iii) a mistura de resinas aniônicas e catiônicas reduz a força iônica e a concentração de íons divalentes e trivalentes na solução, aumentando a atividade do P em solução, favorecendo a transferência do solo para a resina (RAIJ, 2011). Portanto, os resultados do presente trabalho concordam com estudos realizado por Silva e Raij (1999) e Silva et al. (2008), em solos fertilizados com fontes de P insolúveis em água, onde o método da RTI foi superior ao M1 para prever a biodisponibilidade de P.

Salienta-se ainda que, para os tratamentos com FNR e TFM, os atributos P-MS e P-Ex se correlacionaram fortemente com o P-RTI, nas camadas de 0-5 e 0-20 cm e moderadamente na camada de 0-10 cm (Tabela 8). Isso mostra a superioridade da RTI em avaliar o P biológico, inclusive em camadas mais profundas (até 20 cm), concordando com os resultados observados por Schlindwein e Gianello (2008). No estado de São Paulo, a RTI tem sido utilizada, não somente para avaliar o P disponível, mas também para avaliar Ca, Mg e K trocáveis no solo. Para a extração de P provenientes de fontes insolúveis em água, a RTI seria o método mais adequado de avaliação, mas não tem sido utilizada rotineiramente em todo país, devido à preferência por métodos mais simples (RAIJ, 2011).

Os valores de r entre o P disponível (P-M1 e P-RTI) com o P-MS e P-Ex foram superiores quando comparados aos atributos de RMS e RG. Foram consideradas correlações fortes 50% dos valores de r observados entre o P disponível (P-M1 e P-RTI) e o P-MS e P-Ex (Tabela 7), e correlações moderadas, 100% dos valores entre o P disponível (P-M1 e P-RTI) com o RMS e RG (Tabela 8). Isso indica maior precisão dos extratores quando estes são correlacionados com as quantidades de P na planta ou nos grãos (P-MS e P-Ex), comparado aos atributos de rendimentos da cultura (SILVA et al., 1999).

Dos 72 valores de r significativos ($P < 0,01$ ou $P < 0,05$), 20 foram enquadrados na faixa de correlação forte e os demais, na faixa moderada (Tabela 8). Quando comparados os valores de r e o P disponível (P-M1 e P-RTI) com os atributos do milho (P-MS e P-Ex), apenas em quatro ocasiões, os valores foram melhores classificadas (correlações forte) devido à camada de solo avaliada (Tabela 8). Normalmente, não foi verificada diferença entre a faixa de interpretação dos valores de r e a concentração do P-M1 e P-RTI nas camadas de 0-5, 0-10 ou 0-20 cm. Isso indica que, o fracionamento da amostragem de solos em camadas de 0-10 cm, conforme a SBCS (2004) e de 0-5 e 5-20 cm, conforme IAPAR (1996), não necessariamente

implicaria em melhores correlações entre o P-M1 e P-RTI e os atributos do milho, mediante aplicação superficial (em área total) de fosfatos (solúveis e insolúveis) na ILP em PD.

Portanto, a eficiência dos extratores para as plantas de milho após 36 meses de estudo, poderia ser classificada na seguinte ordem: (i) nos tratamentos com o uso de SFT: Resina trocadora de íons $\cong$ Mehlich-1 > Morgan modificado; (ii) nos tratamentos com aplicação de FNR: Resina trocadora de íons $\geq$ Mehlich-1 > Morgan modificado; e (iii) nos tratamentos com o uso de TFM: Resina trocadora de íons $\geq$ Mehlich-1 > Morgan modificado (Tabela 8).

4.6. CONCLUSÕES

1. As concentrações de fósforo (P) disponível no solo após 36 meses de estudo, variaram de acordo com cada extrator. A Resina trocadora de íons (RTI) extraiu maiores quantidades de P disponível, seguida do extrator de Mehlich-1 (M1) e do Morgan modificado (MM).

2. Nos tratamentos que receberam aplicação de superfosfato triplo, os extratores de M1 e RTI obtiveram eficiência semelhante quando correlacionados com os atributos de rendimento de massa seca (RMS), rendimento de grãos (RG), fósforo acumulado na massa seca (P-MS) e fósforo exportado (P-Ex) pelos grãos de milho.

3. Para as fontes insolúveis em água (fosfato natural reativo e termofosfato magnesiano), o P extraído pela RTI melhor se correlacionou com o P-MS e o P-Ex.

4. A solução de MM foi ineficiente para prever a biodisponibilidade de P para o milho, cultivado em solo com alto teor de argila e óxidos de ferro e alumínio, que recebeu a aplicação de fontes e doses de P, em um sistema de ILP em PD.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Após 36 meses de estudo o uso de termofosfato magnésiano proporcionou maiores rendimentos de massa seca total para a aveia-preta e maiores rendimentos de grãos de milho. Os extratores de Melich-1 e Resina trocadora de íons seriam eficientes para avaliar o fósforo disponível do solo quando adubado com superfosfato triplo no sistema de ILP em PD. No entanto, para o solo adubado com fontes insolúveis em água (termofosfato magnésiano e fosfato natural reativo), a Resina trocadora de íons teria eficiência maior em comparação ao extrator de Melich-1.

Os resultados do experimento tiveram sucesso em responder aos questionamentos que originaram a proposta de estudo. No entanto, faz-se necessário avançar no conhecimento, pois sistemas de integração lavoura-pecuária exigem abordagem interdisciplinar para o entendimento dos processos sistêmicos. Estudos sobre a ciclagem do fósforo devem ser perseguidos para o melhor entendimento deste nutriente em todos os compartimentos do sistema. Visando desta forma, determinar o seu melhor aproveitamento pelas culturas através de adequações para recomendações de adubação em solos sob sistemas integrados de produção.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGARIE, S.; UCHIDA, H.; AGATA, W. et al. Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). **Plant Production Science**, v.1, p.89-95, 1998.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo no sistema plantio direto. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L.. (Org.). **Fertilidade do Solo**. 1.ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1. p.873-928, 2007.

ANGHINONI, I.; ASSMANN, J. M.; MARTINS, A. P.; et al. **Ciclagem de nutrientes em integração lavoura-pecuária**. III Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil. UTFPR. Pato Branco, 2011.

ANGHINONI, I.; BISSANI, C. A. Fósforo a adubos fosfatados. In: BISSANI, C. A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.; J.; CAMARGO, F. O. A. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Gênese, p.117-138, 2004.

ASSMANN, A.L.; SOARES, A.B.; ASSMANN, T.S. **Integração lavoura-pecuária para agricultura familiar**. 1 ed. Londrina: IAPAR, v.7, 49 p., 2008.

BALBINO, L.C.; BARCELLOS, A. de O.; STONE, L.F. **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF)**. Brasília, Embrapa, 130p., 2011.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; MORAES, A.; VEIGA, M.; et al. Integração lavoura- pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, v.39, n.6, 2009.

BALBINOT JUNIOR, A.A.; MORAES, A.; PELISSARI, A.; et al. Estratégias de uso do solo no inverno e seu efeito no milho cultivado em sucessão. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.17, p.94-107, 2011.

BAZIRAMAKENGA, R.; SIMARD, R.R. Low molecular weight aliphatic acid contents of composted manures. **Journal of Environmental Quality**, 557-561 p., 1998.

BEDIN, I.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.; et al. Fertilizantes fosfatados e produção da soja em solos com diferentes capacidades tampão de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.27, p.639-646, 2003.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.831-839, 2004.

BERTOL, D.L.; GUADAGNIN, J.C.; RITTER, S.R. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. Perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.28, p.1045-1054, 2004.

BERTOLINI, E.V.; GAMERO, C.A.; SALATA, A.C.; et al. Antecipação da adubação de semeadura do milho em dois sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2355-2366, 2008.

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.02, p.259-266, 2007.

BORKERT, C. M.; GAUDÊNCIO, C. A.; PEREIRA, J. E.; et al. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 38, n. 1, p. 143-153, jan. 2003.

BRASIL, E. C.; MURAOKA, T. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p. 599- 606, 1997.

CABALCETA, G.; CORDERO, A. Níveis críticos de fósforo em Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. **Agronomia Costarricense**, v.18, p.147-161, 1994.

CANO, C.C.P.; CECATO, U.; CANTO, M.W.; et al. Produção de Forragem do Capim-Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq. cv. Tanzânia-1). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.33, n.6, p.1949-1958, 2004.

CARVALHO, P. C. F., ANGHINONI, I., MORAES, A.; et al. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.88, p.259-273, 2010.

CARVALHO, P. C. F., ANGHINONI, I., KUNRATH, T. R.; et al. **Integração soja-bovinos de corte no sul do Brasil**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 60 p., 2011.

CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A. E.; SANTOS, C. D.; et al. Interação silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília - DF**, v.36, p.557-565, 2001.

CAVIGLIONE, J.H.; KIIHL, L.R.B.; CARAMORI, P.H.; et al. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina : IAPAR, 2000.

CESAR, N.Z.C; PAULA de, P.D.; POLIDORO, J.C. et al. Efeito estimulando da urina de vaca sobre o crescimento de mudas de pepino, cultivadas sob manejo orgânico. **Ensaios e Ciência**, vol. 11, n.1, p. 67-71, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Levantamentos de safra**. 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>. Acesso: 16 de novembro de 2012.

COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, p.527-535, 2003.

COSTA, S.E.E.V.G.A.; SOUZA, E.D.; ANGUINONI, I. et al. Phosphorus and root distribution and corn growth under long term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2009.

CURI, N.; LARACH, J.O.I.; KÄMPF, N.; et al. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas-SP, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 90p., 1993.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FAO. **O aumento populacional e os desafios da segurança alimentar**. 2011. Disponível em: <https://www.fao.org.br/apdsa.asp>. Acesso em: 15/11/2012.

FATTORE, N.; ANGHINONI, I. Eficiência de absorção de nutrientes por espécies forrageiras de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 27:251-258, 1992.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA – FEBRAPDP. **Evolução da área de plantio direto no Brasil – dados estatísticos**. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br/arquivos/BREvolucaoPD72a06.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2013.

FERNANDES, C.; MURAOKA, T. Absorção de fósforo por híbridos de milho cultivados em solo de cerrado. **Scientia Agricola**, v.59, n.4, p.781-787, 2002.

FONSECA, D. M. da; MARTUSCELLO, J. A. Plantas Forrageiras. Viçosa, MG: Ed. UFRV, 537p., 2010.

FONTOURA, S.M.V.; VIEIRA, R.C.B.; BAYER, C.; et al. Eficiência técnica de fertilizantes fosfatados em Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, 1907-1914, 2010.

FUNDAÇÃO ABC. **Agrobanco: banco de dados agronômicos**. 2008. Disponível em: <http://www.fundacaoabc.com.br/>. Acesso em: 21 de nov. 2012.

GUEDES, E.M.S.; FERNANDES, A.R.; LIMA, E.V.; et al. Fosfato natural de arad e calagem e o crescimento de *Brachiaria brizantha* em Latossolo amarelo sob pastagem degradada na Amazônia. **Revista Ciência Agrária**, Belém-PA, v.52, p.117-129, 2009.

GUJARATI, D. **Econometria básica**. 4 ed. Rio de Janeiro, Elsevier, 784p., 2006.

GUPPY, C.N.; MENZIES, N.W.; MOODY, P.W.; BLAMEY, F.P.C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Australia, v 43, p.189-204, 2005.

HAVLIN, J.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; et al. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7 ed., Prentice Hall: New Jersey, 2005.

HERRERO, M.; THORNTON, P. K.; NOTENBAERT, A. M.; et al. Smart Investments in Sustainable Food Production: Revisiting Mixed Crop-Livestock Systems. **Science**, v.327, 2010.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). **Aveia preta, cultivar IAPAR-61 Ibiporã**. 2010. Disponível em: <http://www.cppse.embrapa.br>. Acesso em 15 de novembro de 2012.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). **Amostragem de solo para análise química: plantio direto e convencional, culturas perenes, várzeas, pastagens e capineiras**. Londrina, 28 p., 1996. (IAPAR, Circular 90).

KAMINSKI, J.; PESSOA, A.C.S.; RHEINHEIMER, D. Efeito do tempo de incubação de termofosfato magnésiano no solo e inoculação com fungos micorrízicos na recuperação de fósforo pelo capim-pensacola. **Ciência Rural**, v.27, 1997.

KEULEN, V.H.; SCHIRE, H. Crop-livestock systems: old wine in new bottles. **Proceedings of the International Crop Science**, Brisbane, AUS, 2004.

MACEDO, M.C.M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, p.133-146, 2009.

MAGDOFF, F.R.; HRYSHKO, C.; JOKELA, W.E.; et al. Comparison of phosphorus soil test extractants for plant availability and environmental assessment. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p.999-1006, 1999.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Editora Ceres, São Paulo- SP, n.1,631p., 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 319p, 1997.

MARTHA JUNIOR, G.B; CORSI, M. Pastagens no Brasil: Situação atual e perspectivas. **Preços Agrícolas**, v.15, n.170, p.3-6, 2001.

McINTOSH, J.L. Bray and Morgan soil test extractants modified for testing acid soils from different parent materials. **Agronomy Journal**, v.61, p.259–265, 1969.

MELO, A.V.; GALVÃO, J.C.C.; BRAUN, H. et al. Extração de nutrientes e produção de biomassa de aveia preta cultivada em solo submetido a dezoito anos de adubação orgânica e mineral. **Ciências Agrárias**, v. 32, n. 2, p. 411-420, 2011.

MIAO, S.J., QIAO Y.F, HAN X.Z., et al. Nodule Formation and Development in Soybeans (*Glycine max* L.) in Response to Phosphorus Supply in Solution Culture. **Soil Science Society of China**, Pedosphere v.17(1), p.36-43, 2007.

MIOLA, G.R.; TEDESCO, M.J.; BISSANI, C.A.; et al. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para a cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.813-819, 1999.

MORAES, A., PELISSARI, A., ALVES, S.J. et al. Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil. In: MELLO, N.A., ASSMANN, T.S. (Eds.). **I Encontro de integração lavoura-pecuária no sul do Brasil**. p.3-42. 2002.

MORAES, A.; CARVALHO, P.C.F.; LUSTOSA, S.B.; et al. Sistemas integrados de produção agrícola e pecuária: caminhos para intensificação sustentável. **Anais...**, FERTIBIO, Maceió-AL, 2012.

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

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; MORAES, L.A.C. Eficiência de fontes e doses de fósforo na alfafa e centrosema cultivadas em Latossolo Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília- BR, v.37, p. 1459-1466, 2002.

MOTOMIYA, W.R.; FABRÍCIO, A.C.; MARCHETTI, M.E. et al. Métodos de aplicação de fosfato na soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.4, p.307-312, 2004.

NICOLOSO, R.S.; LANZANOVA, M.E.; LOVATO, T. Manejo das pastagens de inverno e potencial produtivo de sistemas de integração lavoura-pecuária no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, p.1799-1805, 2006.

NORO, G.; BASSO, S.M.S.; FONTANELI, R.S.; et al. Gramíneas anuais de inverno para produção de forragem: avaliação preliminar de cultivares. **Revista Agrociência**, v.7, p. 35-40, 2003.

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

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

OLIVEIRA, F.H.T.; ARRUDA, J.A.; SILVA, I. de F.; et al. Amostragem para avaliação da fertilidade do solo em função do instrumento de coleta das amostras e de tipos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa-MG. v.31, p.973-983, 2007a.

OLIVEIRA, P.P.A.; OLIVEIRA, W.S.; CORSI, M. Efeito residual de fertilizantes fosfatados solúveis na recuperação de pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em Neossolo Quartzarênico. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.36, n.6, p.1715-1728, 2007b.

ONO, B. F.; MONTAGNA, J.; NOVELLINO, J.O.; et al. Eficiência agronômica de superfosfato triplo e fosfato natural de Arad em cultivos sucessivos de soja e milho. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v.33, p.727-734, 2009.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2011. Disponível em: <http://www.onu.org.br>. Acesso em 15/11/2012.

PAULETTI, V. Nutrientes: Teores e Interpretações. **Fundação ABC**, Castro-PR. v.2, p.86, 2004.

PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; et al. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná. 38p., 1992.

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**. 32:911-920, 2008.

PIONEER. **Resultados acima de 12000 kg/ha – safra 2010/11**. Informativo Técnico, 2011.

PROCHNOW, L.I.; CHIEN, S.H.; DILLARD, E.F.; et al. Synthesis, characterization, and agronomic evaluation of iron phosphates impurities in superphosphates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p.1551-1563, 2003.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. International Plant Nutrition Institute, Piracicaba-SP, 420 p., 2011.

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

RANNO, S. K.; SILVA, L.S.; GATIBONI, L.C. et al. Capacidade de adsorção de fosforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 01, p. 21-28, 2007.

RESENDE, A.V.; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C.; et al. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.30, p.453-466, 2006.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems under subtropical conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, p.2339-2354, 2003.

RICHART, A.; KAEFER, J.E.; DAGA, J. Desempenho do trigo em resposta a aplicação de termofosfato. **Synergismus scyentifica**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, v.4 (1), 2009.

ROTARU, V.; SINCLAIR, T.R. Interactive influence of phosphorus and iron on nitrogen fixation by soybean. **Environmental and Experimental Botany**, v.66, n.1, p. 94-99, 2009.

RUSSELE M. P.; FRANZLEUBBERS, A. J. Introduction to symposium: integrated crop-livestock system for profit and sustainability. **Agronomy Journal**, v.99, p.323-324, 2007.

RUSSELLE, M.P. Nutrient cycling in pasture. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUÇÃO ANIMAL EM PASTEJO, 1997, Viçosa, MG. **Anais.**, Viçosa: UFV, 471p. p.235-266, 1997.

SÁ, J.C.; FERREIRA, A.O.; BRIEDES, C.; et al. Crescimento radicular, extração de nutrientes e produção de grãos de genótipos de milho em diferentes quantidades de palha de aveia preta em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1207-1216, 2010.

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, n.2, 2008.

SANTOS, E.A.; KLIEMANN, H.J. Disponibilidade de fósforo de fosfatos naturais em solos de cerrado e sua avaliação por extratores químicos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.35, p.139-146, 2005.

SAS System. **SAS Institute Inc. SAS OnlineDoc® 9.2**. Cary, NC: SAS Institute, 2010.

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, p.611-617, 2000.

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.

SEGATELLI, C. R. **Produtividade da soja em semeadura direta com antecipação da adubação fosfatada e potássica na cultura da *Euleunice coracana***. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2004.

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

SILVA, F.N.; FURTINI NETO, A.E.; CARNEIRO, L.F. et al. Crescimento e produção de grãos da soja sob diferentes doses e fontes de fósforo em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, vol.33 n.5, 2009.

SILVA, H. A.; MORAES, A.; CARVALHO, P. C. F.; et al. Maize and soybean production in integrated system under no-tillage with different pasture combinations and animal categories. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n.4, p. 757-765, 2012.

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

SILVA, W.M.; FABRICIO, A. C.; MARCHETTI, M.E.; et al. Eficiência de extratores de fósforo em dois Latossolos do Mato Grosso do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.34, n.12, p.2277-2285, 1999.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. **Sciences**, v.22, p.755–775, 2002.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO (SBCS). **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10 ed., Porto Alegre, 400 p., 2004.

SOUZA, E.D.; ANDRADE, S.E.V.G.; ANGHINONI, I.; et al. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34., p.79-88, 2010.

SOUZA, E.D.; COSTA, S.E.V.G.A.; LIMA, C.V.S. Carbono orgânico e fósforo microbiano em sistema de ILP submetidos à intensidade de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre, Artmed, 719p., 2004.

WILLIAMS, P.H.; HAYNES, R.J.; Influence of improved pastures and grazing animals on nutrient cycling within New Zealand soils, **New Zealand Journal of Ecology**. v.14, 1990.