



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO EM SISTEMAS DE MANEJO DO  
SOLO E ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO**

**RAFAEL DE SOUZA NUNES**

**TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA**

**BRASÍLIA – DF  
MARÇO/2014**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO EM SISTEMAS DE MANEJO DO  
SOLO E ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO**

**RAFAEL DE SOUZA NUNES**

**ORIENTADOR: WENCESLAU J. GOEDERT**  
**CO-ORIENTADOR: DJALMA MARTINHÃO GOMES DE SOUSA**

**TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA**

**PUBLICAÇÃO: 026D/2014**

**BRASÍLIA/DF**  
**MARÇO/2014**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO EM SISTEMAS DE MANEJO DO  
SOLO E ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO**

**RAFAEL DE SOUZA NUNES**

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM AGRONOMIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
AGRONOMIA.**

**APROVADA POR:**

---

**WENCESLAU J. GOEDERT (ORIENTADOR)**

Professor Doutor / Universidade de Brasília / CPF: 005.799.550-87 / e-mail: goedert@unb.br

---

**CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO (EXAMINADOR INTERNO)**

Professor Doutor / Universidade de Brasília / CPF: 029.754.447-02 / e-mail: cicerocef@unb.br

---

**TAIRONE PAIVA LEÃO (EXAMINADOR INTERNO)**

Professor Doutor / Universidade de Brasília / CPF: 713.262.271-49 / e-mail: tleao@unb.br

---

**IBANOR ANGHINONI (EXAMINADOR EXTERNO)**

Professor Doutor / Universidade Federal do Rio Grande do Sul / CPF: 082.574.000-25 / e-mail: ibanghi@ufrgs.br

---

**THOMAZ ADOLPHO REIN (EXAMINADOR EXTERNO)**

Pesquisador Doutor / Embrapa Cerrados / CPF: 027.990.018-07 / e-mail: thomaz.rein@embrapa.br

**BRASÍLIA/DF, 24 de março de 2014.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Nunes, Rafael de Souza

Eficiência de uso do fósforo em sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada por um longo período. / Rafael de Souza Nunes; Orientação de Wenceslau J. Goedert; Co-orientação de Djalma M. G. de Sousa – Brasília, 2014.

150 p.: il.

Tese de Doutorado (D) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2014.

1. Preparo convencional do solo. 2. Plantio direto. 3. Fontes de fósforo. 4. Modos de aplicação. 5. Fracionamento do fósforo. 6. Distribuição de raízes. 7. Soja. 8. Milho.

I. Goedert, W.J. II. Doutor.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NUNES, R.S. **Eficiência de uso do fósforo em sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada por um longo período.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2014, 150 p. Tese de Doutorado.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rafael de Souza Nunes

TÍTULO: Eficiência de uso do fósforo em sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada por um longo período.

GRAU: Doutor ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Rafael de Souza Nunes

CPF 013.080.541-65

Embrapa Cerrados, Rod. 020, Km 18, Caixa Postal 08223, CEP 73310-970, Planaltina/DF – Brasil.

+55 61 3388 9814 / rafael.nunes@embrapa.br

**OFEREÇO,**

*Ao meu querido Deus, fonte de  
toda sabedoria.*

**DEDICO,**

*À minha esposa, Heidi.*

*Àos meus pais, irmã e amigos.*

*Presentes em todos os momentos.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu Jesus, por ter me criado à Sua imagem e semelhança (Gen 1:26), por ter me resgatado através de amor imensurável (S. João 3:16; 15:13) e porque em breve retornará (Apoc: 22:12), consumando a transformação que me proporciona a cada dia (2 Cor 3:18; Apoc. 21:5).

À minha esposa Heidi Mara Z. de Moura, pelo amor, amizade e dedicação que tanto me incentivaram a completar mais esta etapa. Pelo companheirismo e alegria que me traz a cada dia.

À minha mãe, Marly A. de Souza e Nunes, por ter me ensinado um Caminho e me incentivado nEle, por ter doado boa parte de sua vida para que eu pudesse conquistar algo em minha, por me compreender e me aceitar sempre. Enfim, por me amar.

Ao meu pai Wagner Nunes (*in memorium*), pelo exemplo de dedicação no trabalho e coragem diante das circunstâncias da vida.

À minha irmã Taynã de Souza Nunes, pela força e compreensão em todos os momentos.

Ao meu tio Vandair Nunes, pelo apoio e incentivo a cada novo desafio.

A todos os meus familiares, que distantes ou perto torcem pelo meu sucesso.

Ao meu orientador, professor Wenceslau J. Goedert, pela orientação desde a graduação, pelo exemplo de otimismo, dedicação e amor ao ensino. Pelo incentivo em seguir, e às vezes esperar, mas nunca desistir.

Ao pesquisador e amigo Djalma Martinhão Gomes de Sousa, pela oportunidade de aprender que a vida é mais do que aquilo que se vê. Pelo exemplo de sinceridade, compromisso, ética e serviço à sociedade. Por me ensinar a amar a Ciência do Solo. Pela orientação desde a graduação, sem nunca perder o ânimo para ensinar.

Ao pesquisador Thomaz Adolpho Rein, pelos anos de convívio na Embrapa Cerrados, sempre disposto a ajudar na minha formação acadêmica.

Aos membros da banca examinadora, professores Ibanor Anghinoni, Cícero Célio de Figueiredo e Tairone Paiva Leão, pela disponibilidade em contribuir com a qualidade da avaliação deste trabalho.

Ao técnico agrícola da área de solos da Embrapa Cerrados, Valmir Vieira de Sousa, pela amizade, exemplo de dedicação, pela qualidade do trabalho realizado durante os 17 anos de condução do experimento e pela coordenação de todas as etapas das atividades de campo deste trabalho.

Aos operários de campo da área de solos da Embrapa Cerrados, pelo auxílio nas atividades de campo e aprendizagem de maneira descontraída.

Aos técnicos do Laboratório de Química Analítica do Solo e do Laboratório de Química Analítica de Plantas da Embrapa Cerrados, pela colaboração e apoio na execução das análises necessárias.

Aos estagiários do Laboratório de Química Analítica do Solo da Embrapa Cerrados, em especial à Antônia Adriana Mota Arrais, Joseane de Andrade Rêgo, Hugo Érike Ramos Reis, Caio Alvarenga Meller e Marcus Murilo dos Santos, pela amizade e dedicação com que ajudaram na execução das análises deste trabalho.

À Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília pelo crescimento profissional proporcionado desde a graduação e pela realização de mais este sonho.

À CAPES pelos recursos financeiros concedidos durante parte do período de estudo.

À Embrapa Cerrados, por disponibilizar infraestrutura para a realização deste trabalho. Aos chefes desta unidade, José Roberto Rodrigues Peres e Cláudio Takao Karia, que pela compreensão e incentivo possibilitaram a conclusão deste trabalho de forma satisfatória.

Aos amigos da Embrapa Cerrados, em especial ao Fábio Bueno dos Reis Jr., João de Deus G. dos Santos Jr., Ieda de Carvalho Mendes, Arminda Moreira de Carvalho, Juaci Vitoria Malaquias e demais colegas que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica.

Aos professores da Universidade de Brasília por todo aprendizado proporcionado desde a graduação.

Enfim, meu muito obrigado a todos que contribuíram para a execução deste trabalho e para minha formação pessoal e acadêmica.

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>ÍNDICE DE APÊNDICES.....</b>	<b>xvi</b>
<b>RESUMO GERAL.....</b>	<b>xvii</b>
<b>GENERAL ABSTRACT.....</b>	<b>xix</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS E HIPÓTESES.....</b>	<b>3</b>
2.1. OBJETIVO GERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2.3. HIPÓTESES.....	3
<b>3. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO.....</b>	<b>4</b>
3.1. Fósforo e produção agrícola no Cerrado.....	4
3.2. Compartimentos do fósforo do solo.....	5
3.3. Efeitos do manejo nos compartimentos do fósforo do solo.....	12
3.4. Disponibilidade do fósforo no solo e absorção pelas plantas.....	15
3.5. Eficiência do uso do fósforo.....	20
<b>4. CAPÍTULO 1. EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO POR SOJA E MILHO NA REGIÃO DO CERRADO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO.....</b>	<b>24</b>
4.1. RESUMO.....	24
4.2. INTRODUÇÃO.....	25
4.3. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.4.1 Produtividade de soja e milho.....	32
4.4.2 Eficiência de uso do fósforo.....	40
4.4.3 Balanço de fósforo no solo.....	48
4.5. CONCLUSÕES.....	50
<b>5. CAPÍTULO 2. DISTRIBUIÇÃO DAS FRAÇÕES DO FÓSFORO DO SOLO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO.....</b>	<b>52</b>
5.1. RESUMO.....	52
5.2. INTRODUÇÃO.....	53
5.3. MATERIAL E MÉTODOS.....	54
5.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
5.4.1 Análise de variância.....	58
5.4.2 Recuperação do fósforo total pelo fracionamento sequencial.....	60
5.4.3 Distribuição das frações de fósforo no solo.....	60
5.4.3.1 Frações de P lábil.....	61
5.4.3.2 Frações de P moderadamente lábil.....	63
5.4.3.3 Frações de P pouco lábil.....	70
5.4.3.4 Interpretação conjunta de todas as frações de P no solo.....	72
5.4.4 Frações de acúmulo de fósforo.....	75
5.5. CONCLUSÕES.....	83

<b>6. CAPÍTULO 3. DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO E RAÍZES NO SOLO E PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO .....</b>	<b>85</b>
6.1. RESUMO .....	85
6.2. INTRODUÇÃO.....	86
6.3. MATERIAL E MÉTODOS.....	87
6.4. RESULTADOS .....	91
6.4.1 Distribuição de fósforo e raízes no solo .....	91
6.4.2 Produção de biomassa, absorção de fósforo, índices de eficiência e produtividade de soja e milho.....	97
6.5. DISCUSSÃO .....	99
6.4.3 Distribuição de fósforo e raízes no solo .....	99
6.4.4 Produção de biomassa, absorção de fósforo, índices de eficiência e produtividade de soja e milho.....	102
6.6. CONCLUSÕES .....	103
<b>7. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>105</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>106</b>
<b>9. APÊNDICES .....</b>	<b>127</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1. EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO POR SOJA E MILHO NA REGIÃO DO CERRADO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO

- Figura 4.1.** Precipitação acumulada mensal, temperatura máxima, média e mínima mensal na área experimental, na média do período de 1994 a 2011. Fonte: Estação Meteorológica da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF. .... 29
- Figura 4.2.** Produtividade anual e acumulada de soja e milho em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), aplicados a lanço (L) ou no sulco de semeadura (S). A produtividade de grãos anual e acumulada obtidas no tratamento sem adubação fosfatada em SPC foi de  $199 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $3.385 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente. .... 33
- Figura 4.3.** Evolução do acúmulo de P no solo em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), aplicados a lanço (L) ou no sulco de semeadura (S). Barra horizontal indica a dose de P necessária para correção do solo segundo o método do poder tampão proposto por Sousa et al. (2010). .... 34
- Figura 4.4.** Produtividade de grãos de soja durante a fase de correção gradual (4 primeiros anos) do experimento em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD) recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicados a lanço (L) ou no sulco de semeadura (S). Valores correspondem à média das fontes de P ( $n = 6$ ). Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%. .... 35
- Figura 4.5.** Produtividade de soja durante os 9 primeiros anos do experimento em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD) recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR). Valores correspondem à média dos modos de aplicação ( $n = 6$ ). Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%. .... 36
- Figura 4.6.** Produtividade anual e acumulada de soja e milho em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD). Valores para cada sistema de manejo de solo correspondem à média dos manejo de adubação fosfatada ( $n = 12$ ). Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%. .... 39
- Figura 4.7.** Eficiência de uso do fósforo por soja e milho em diferentes períodos de cultivo em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço (L) ou no sulco de semeadura (S). Correção: 1° ao 4° cultivo; Monocultivo de soja: 5° ao 9° cultivo; Monocultivo de milho: 10° e 11° cultivos; Rotação: 12° ao 17° cultivo; Todos: 1° ao 17° cultivo. .... 40
- Figura 4.8.** Eficiência de uso do fósforo por soja durante a correção gradual com P (1° ao 4° cultivo) em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicados a lanço (L) ou no sulco de semeadura (S). Valores correspondem à média das fontes de P ( $n = 6$ ). Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%. .... 41

**Figura 4.9.** Eficiência de uso do fósforo por soja e milho em diferentes períodos de cultivo em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 15 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR). Valores correspondem à média dos modos de aplicação (n = 6). Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%. Correção: 1° ao 4° cultivo; Monocultivo de soja: 5° ao 9° cultivo; Monocultivo de milho: 10° e 11° cultivos; Rotação: 12° ao 17° cultivo; Todos: 1° ao 17° cultivo. .... 42

**Figura 4.10.** Evolução da eficiência de uso do fósforo por 12 cultivos de soja em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD). Valores para cada sistema de manejo de solo correspondem à média dos manejos de adubação fosfatada (n = 12). \*, Significativo a 5% pelo teste t. .... 44

**Figura 4.11.** Distribuição em profundidade do carbono orgânico do solo avaliada aos 8 anos (a), 10 anos (b), 14 anos (c) e 17 anos (d) de cultivo em um Latossolo Vermelho muito argiloso em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD). Valores para cada sistema de manejo de solo correspondem à média dos quatro manejos de adubação fosfatada com três repetições (n = 12). \*, Significativo a 5% pelo teste t. .... 45

**Figura 4.12.** Evolução da distribuição em profundidade do carbono orgânico do solo em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (a) ou plantio direto (b). Valores para cada sistema de manejo de solo correspondem à média dos quatro manejos de adubação fosfatada com três repetições (n = 12). .... 46

**Figura 4.13.** Distribuição em profundidade do P orgânico do solo avaliada aos 10 anos (a) e 17 anos (b) de cultivo em um Latossolo Vermelho muito argiloso em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD). Valores para cada sistema de manejo de solo correspondem à média dos quatro manejos de adubação fosfatada com três repetições (n = 12). \*, Significativo a 5% pelo teste t. .... 47

**Figura 4.14.** Evolução da distribuição em profundidade do P orgânico do solo em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (a) ou plantio direto (b). Valores para cada sistema de manejo de solo correspondem à média dos quatro manejos de adubação fosfatada com três repetições (n = 12). .... 47

## **CAPÍTULO 2. DISTRIBUIÇÃO DAS FRAÇÕES DO FÓSFORO DO SOLO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO**

**Figura 5.1.** Relação entre o somatório das frações de P (Pt Σ fracionamento) e o P total obtido por digestão do solo (Pt digestão) para um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo (SPD e SPC) e adubação fosfatada (SFT, FNR, Lanço, Sulco) e no cerrado nativo, em 5 camadas, com três repetições (n = 135). \*\*\* significativo a 0,1% pelo teste F. .... 60

**Figura 5.2.** Distribuição relativa do P inorgânico (a) e orgânico (b) da fração bicarbonato em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada. .... 63

**Figura 5.3.** Distribuição relativa do P inorgânico (a) e orgânico (b) da fração NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada. .... 65

<b>Figura 5.4.</b> Distribuição relativa do P inorgânico da fração HCl em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada. ....	67
<b>Figura 5.5.</b> Distribuição relativa do P inorgânico (a) e orgânico (b) da fração NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup> em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.....	69
<b>Figura 5.6.</b> Distribuição relativa do P inorgânico (a) e orgânico (b) da fração residual em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada. ....	72
<b>Figura 5.7.</b> Fracionamento do P total do solo em 5 camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso após 17 anos de cultivos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada. ....	72
<b>Figura 5.8.</b> Participação de cada fração de P em relação ao total do solo em 5 camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso após 17 anos de cultivos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada. ....	76
<b>Figura 5.9.</b> Participação de cada fração de Pi em relação ao P geoquímico (a) e de Po em relação ao P biológico (b) em 5 camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso após 17 anos de cultivos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada. ....	77
<b>Figura 5.10.</b> Variação no P geoquímico e P biológico em relação ao cerrado natural, em 5 camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso após 17 anos de cultivos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.....	81
<b>Figura 5.11.</b> Variação nas frações do Po em relação ao cerrado natural, em 5 camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso após 17 anos de cultivos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada. ....	82
<b>Figura 5.12.</b> Variação no P geoquímico e P biológico em relação ao cerrado natural, na camada de 0-30 cm para SPC e SPD (a) e na camada de 0-20 cm para SPC e 0-10 cm para SPD em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 17 anos de cultivos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.....	83

### CAPÍTULO 3. DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO E RAÍZES NO SOLO E PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO

<b>Figura 6.1.</b> Precipitação e temperaturas mínima e máxima diárias durante os meses cultivados com soja na safra agrícola 2009/10 (a) e milho na safra agrícola 2010/11 (b), na área experimental, com indicação das datas de emergência das plântulas (E), florescimento (F) e colheita (C). Fonte: Estação Meteorológica da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF. ....	90
<b>Figura 6.2.</b> Disponibilidade de P (Bray 1) em três camadas de um Latossolo Vermelho muito argiloso em diferentes sistemas de manejo de solo e da adubação fosfatada aos 14 anos (a) e 17 anos (b) de cultivo. SPC - sistema de preparo convencional; SPD - sistema plantio direto; SFT - superfosfato triplo; FNR - fosfato natural reativo; aplicação à lanço na superfície (L); aplicação no sulco de semeadura (S). Barras horizontais indicam o DMS pelo teste t a 5%. .	91
<b>Figura 6.3.</b> Distribuição relativa do teor de P disponível (Bray 1) em três camadas de um Latossolo Vermelho muito argiloso em diferentes sistemas de manejo de solo e da adubação fosfatada aos 14 anos (a) e 17 anos (b) de cultivo. SPC - sistema de preparo convencional; SPD - sistema plantio direto; SFT - superfosfato triplo; FNR - fosfato natural reativo; aplicação à lanço na superfície (L); aplicação no sulco de semeadura (S). ....	92

**Figura 6.4.** Disponibilidade de P (Bray 1) na camada de 0-20 cm em um Latossolo Vermelho muito argiloso em diferentes sistemas de manejo de solo e da adubação fosfatada aos 14 anos (a) e 17 anos (b) de cultivo. SPC - sistema de preparo convencional; SPD - sistema plantio direto; SFT - superfosfato triplo; FNR - fosfato natural reativo; aplicação à lanço na superfície (L); aplicação no sulco de semeadura (S). Barras representam a média ponderada das camadas de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm. Linhas tracejadas indicam o teor mínimo de cada classe de interpretação de acordo com calibração para a região do Cerrado (Sousa, D.M.G., dados não publicados). Letras maiúsculas comparam sistemas dentro de cada manejo de adubação e minúsculas comparam manejos de adubação dentro de cada sistema, a 5% pelo teste t. .... 93

**Figura 6.5.** Densidade de superfície de raízes de soja (a) e milho (b) em três camadas de um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado em diferentes sistemas de manejo de solo e da adubação fosfatada. SPC - sistema de preparo convencional; SPD - sistema plantio direto; SFT - superfosfato triplo; FNR - fosfato natural reativo; aplicação à lanço na superfície (L); aplicação no sulco de semeadura (S). Barras horizontais indicam o DMS pelo teste t a 5%. . 94

**Figura 6.6.** Distribuição relativa da densidade de superfície de raízes de soja (a) e milho (b) em três camadas de um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado em diferentes sistemas de manejo de solo e da adubação fosfatada. SPC - sistema de preparo convencional; SPD - sistema plantio direto; SFT - superfosfato triplo; FNR - fosfato natural reativo; aplicação à lanço na superfície (L); aplicação no sulco de semeadura (S). .... 95

**Figura 6.7.** Densidade de superfície de raízes de soja (a) e milho (b) na camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado em diferentes sistemas de manejo de solo e da adubação fosfatada. SPC - sistema de preparo convencional; SPD - sistema plantio direto; SFT - superfosfato triplo; FNR - fosfato natural reativo; aplicação à lanço na superfície (L); aplicação no sulco de semeadura (S). Barras representam a média ponderada das camadas de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm. Letras maiúsculas comparam sistemas dentro de cada manejo de adubação e minúsculas comparam manejos de adubação dentro de cada sistema, a 5% pelo teste t. .... 95

**Figura 6.8.** Relação entre P disponível (Bray 1) e densidade de superfície de raízes de soja em sistema de preparo convencional (a) e plantio direto (b) e milho em sistema de preparo convencional (c) e plantio direto (d) em um Latossolo Vermelho muito argiloso. Pontos representam os valores para a combinação entre fonte do fertilizante (FNR ou SFT), modo de aplicação (sulco ou lanço) e camada (0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm), com três repetições (n = 36). \*\*\* significativo a 0,1% pelo teste F. .... 96

**Figura 6.9.** Modelo de regressão em árvore para P disponível (Bray 1) e densidade de superfície de raízes de soja e milho em diferentes camadas de amostragem (0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm), sistema de manejo de solo (sistema de preparo convencional - SPC e plantio direto - SPD), fonte do fósforo (superfosfato triplo - SFT e fosfato natural reativo - FNR) e modo de aplicação (lanço na superfície - L e sulco de semeadura - S).  $\eta$  indica a fração percentual da variabilidade total explicada por cada ramificação. .... 97

## ÍNDICE DE TABELAS

### CAPÍTULO 1. EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO POR SOJA E MILHO NA REGIÃO DO CERRADO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO

<b>Tabela 4.1.</b> Análise química do solo na camada de 0-20 cm em dois momentos antes da implantação do experimento .....	28
<b>Tabela 4.2.</b> Sequência de cultivos principais e de cobertura no experimento em estudo.....	28
<b>Tabela 4.3.</b> Densidade do solo em seis camadas de Latossolo Vermelho argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação e em área nativa de Cerrado localizada ao próxima ao experimento.....	31
<b>Tabela 4.4.</b> Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações, como resultado da análise de variância, e coeficiente de variação (CV) para a produtividade anual e acumulada de soja e milho ao longo dos 17 anos de cultivo do experimento.....	33
<b>Tabela 4.5.</b> Balanço do P em um Latossolo Vermelho argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.....	49

### CAPÍTULO 2. DISTRIBUIÇÃO DAS FRAÇÕES DO FÓSFORO DO SOLO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO

<b>Tabela 5.1.</b> Textura e mineralogia do solo na camada de 40-60 cm cm antes da implantação do experimento.....	55
<b>Tabela 5.2.</b> Análise química do solo na camada de 0-20 cm em dois momentos antes da implantação do experimento .....	55
<b>Tabela 5.3.</b> Características dos fertilizantes fosfatados utilizados no experimento .....	56
<b>Tabela 5.4.</b> Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações, como resultado da análise de variância, para as diversas frações de P .....	59
<b>Tabela 5.5.</b> P inorgânico e orgânico da fração $\text{NaHCO}_3$ em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação.	62
<b>Tabela 5.6.</b> P inorgânico e orgânico da fração $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação.....	64
<b>Tabela 5.7.</b> P inorgânico da fração $\text{HCl}$ em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação .....	66
<b>Tabela 5.8.</b> P inorgânico e orgânico da fração $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação.....	68
<b>Tabela 5.9.</b> P inorgânico e orgânico da fração residual em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação.	71
<b>Tabela 5.10.</b> Frações de P em diferentes camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso com vegetação natural do cerrado.....	80

### CAPÍTULO 3. DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO E RAÍZES NO SOLO E PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO

**Tabela 6.1.** Matéria seca na parte aérea (MSPA), fósforo acumulado (PA) na parte aérea no florescimento, índice de eficiência de absorção de fósforo (EAP), índice de eficiência de utilização de fósforo (EUP) e produtividade de grãos de soja (16º cultivo) e milho (17º cultivo) em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), aplicados à lanço na superfície ou no sulco ..... 98

## ÍNDICE DE APÊNDICES

<b>APÊNDICE A:</b> FÓSFORO DISPONÍVEL – BRAY 1 .....	128
<b>APÊNDICE B:</b> FÓSFORO ORGÂNICO TOTAL.....	130
<b>APÊNDICE C:</b> FÓSFORO TOTAL DO SOLO – DIGESTÃO ÁCIDA.....	132
<b>APÊNDICE D:</b> FRACIONAMENTO DO FÓSFORO DO SOLO – EXTRAÇÕES.....	134
<b>APÊNDICE E:</b> FRACIONAMENTO DO FÓSFORO DO SOLO – DETERMINAÇÕES NO EXTRATO DE $\text{NaHCO}_3$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ .....	136
<b>APÊNDICE F:</b> FRACIONAMENTO DO FÓSFORO DO SOLO – DETERMINAÇÕES NO EXTRATO DE $\text{NaOH}$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ .....	139
<b>APÊNDICE G:</b> FRACIONAMENTO DO FÓSFORO DO SOLO – DETERMINAÇÕES NO EXTRATO DE $\text{HCl}$ $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ .....	142
<b>APÊNDICE H:</b> FRACIONAMENTO DO FÓSFORO DO SOLO – DETERMINAÇÕES NO EXTRATO DE $\text{NaOH}$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ .....	143
<b>APÊNDICE I:</b> FRACIONAMENTO DO FÓSFORO DO SOLO – DETERMINAÇÕES NO RESÍDUO DE SOLO.....	146
<b>APÊNDICE J:</b> AMOSTRAGEM, SEPARAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE RAÍZES NO SOLO .....	149

## **RESUMO GERAL**

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-graduação em Agronomia  
Universidade de Brasília

### **EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO EM SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO E ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO**

Autor: Rafael de Souza Nunes

Orientador: Wenceslau J. Goedert

Local e data: Brasília, 24 de março de 2014

Por ser obtido a partir de um recurso natural não renovável, o fertilizante fosfatado deve ser usado de forma a maximizar sua eficiência de uso. No entanto, o melhor entendimento do efeito de práticas agrícolas nesse processo só pode ser obtido em experimentos de longa duração. O objetivo deste trabalho foi compreender os efeitos do sistema de manejo do solo e da adubação fosfatada por um longo período na produtividade de grãos e eficiência de uso do fósforo por soja e milho. Para isso, um Latossolo Vermelho distrófico muito argiloso com disponibilidade inicial de fósforo muito baixa foi cultivado por 17 anos com as culturas de soja e milho, recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  em dois manejos de solo (sistema de preparo convencional ou plantio direto) e em quatro manejos de adubação fosfatada (superfosfato triplo ou fosfato natural reativo, com aplicação no sulco de semeadura ou a lanço na superfície). Anualmente foram avaliadas as produtividades de grãos e eficiência de uso do fósforo por soja e milho, calculada pela relação entre o fósforo extraído nos grãos e aquele aplicado ao solo. Foram realizadas amostragens de solo em profundidade, avaliando-se os teores de carbono orgânico, fósforo disponível por Bray 1, fósforo total, e suas frações orgânicas e inorgânicas, em diferentes períodos do experimento. Foi avaliada a distribuição de raízes em profundidade e a produção de biomassa e absorção de fósforo por soja (16º cultivo) e milho (17º cultivo) no florescimento das culturas. No longo prazo, o plantio direto e a adubação com superfosfato triplo resultaram em maior produtividade de grãos e eficiência de uso do fósforo em relação ao preparo convencional e à adubação com fosfato natural reativo, respectivamente. Em relação ao preparo convencional, no plantio direto houve maiores ganhos de carbono orgânico e fósforo orgânico no solo, acúmulo de fósforo inorgânico em

frações mais lábeis e acúmulo de fósforo orgânico no solo na fração associada à proteção física por agregados. A adubação com fosfato natural reativo proporcionou acúmulo de formas de fósforo inorgânico associadas à presença de fertilizante não solubilizado, bem como de formas adsorvidas com menor labilidade, em relação ao superfosfato triplo, especialmente quando aplicado a lanço em plantio direto. Enquanto o sistema de preparo convencional resultou em distribuição mais homogênea de fósforo e raízes de soja e milho no perfil, no plantio direto houve acentuado gradiente em profundidade, especialmente com aplicação do fertilizante a lanço, mas que não representou qualquer limitação à absorção do nutriente e produtividade dessas culturas. Apenas no plantio direto houve relação entre a distribuição de fósforo e de raízes de soja no solo, justificando a maior produção de biomassa, absorção de fósforo e produção de grãos dessa cultura nesse sistema, em relação ao preparo convencional. Por outro lado, houve relação entre a distribuição de fósforo e de raízes de milho no solo nos dois sistemas de manejo do solo, justificando o comportamento semelhante dessa cultura nos diferentes manejos de solo e adubação fosfatada.

**Palavras-chave:** preparo convencional do solo, plantio direto, fontes de fósforo, modos de aplicação, fracionamento do fósforo, distribuição de raízes, soja, milho.

## **GENERAL ABSTRACT**

Doctorate Thesis  
Graduate Program in Agronomy  
University of Brasília

### **PHOSPHORUS USE EFFICIENCY IN SOIL MANAGEMENT SYSTEMS AND PHOSPHATE FERTILIZER FOR A LONG PERIOD**

Author: Rafael de Souza Nunes

Adviser: Wenceslau J. Goedert

Place and date: Brasília, March 24, 2014

Because phosphate fertilizer is produced from a nonrenewable natural resource, it should be used in a way that maximizes its efficiency. However, a better understanding of the effect of agricultural practices in this process can only be obtained in long-term experiments. The aim of this research was to understand the effect of soil management and phosphate fertilization for a long period on the grain yield and phosphorus use efficiency for soybean and corn. A clayey Oxisol with very low initial availability of phosphorus was grown for 17 years with soybean and corn receiving  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  of  $\text{P}_2\text{O}_5$  in two soil management system (conventional tillage and no-tillage) and four fertilizer managements (triple superphosphate and reactive phosphate rock, applied at sowing or broadcast). Each year, the grain yield and phosphorus use efficiency (calculated by the ratio of the extracted phosphorus in grains and that applied to the soil) by soybean and corn were evaluated. Soil samples were carried out in depth, evaluating the contents of organic carbon, available phosphorus - Bray 1, total phosphorus and its organic and inorganic fractions, in different periods of the research. The distribution of roots, biomass production and phosphorus uptake by soybean ( $16^\circ$  cultivation) and corn ( $17^\circ$  cultivation) at the flowering stage was assessed. In the long term, no-tillage and fertilization with triple superphosphate resulted in increased grain yield and efficiency of phosphorus use in relation to conventional tillage and fertilization with reactive phosphate rock, respectively. Compared to conventional tillage, no-tillage showed increased levels of organic carbon and organic phosphorus in the soil, accumulation of inorganic phosphorus in more labile forms and accumulation of organic phosphorus forms in the soil associated with physical protection by aggregates. The fertilization with reactive phosphate rock resulted in

accumulation of inorganic phosphorus forms associated with the presence of non-solubilized fertilizer and adsorbed forms with lower lability, in relation to triple superphosphate, especially with broadcast application in no-tillage. While conventional tillage resulted in more homogeneous distribution of phosphorus and roots of soybeans and corn in profile, in no-till there was a marked gradient in depth, but that did not represent any limitation on nutrient absorption and yield of these crops. Only in no-tillage there was a relationship between the distribution of phosphorus and soybean roots in the soil, justifying the higher biomass, phosphorus uptake and grain yield of this crop in this system, compared to conventional tillage. On the other hand, there was a relationship between the distribution of phosphorus and corn roots in the soil in both soil management systems, justifying the similar behavior of this culture in the different soil management and phosphate fertilization.

**Keywords:** conventional tillage, no-tillage, phosphorus forms, application modes, phosphorus fractionation, root distribution, soybean, corn.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma vez que os solos do Cerrado apresentam, em condições naturais, baixa disponibilidade de fósforo para o favorável desenvolvimento de praticamente todas as plantas cultivadas para produção de alimentos, fibras, biocombustíveis, madeira e carne, torna-se necessária adição de fertilizantes fosfatados ao solo. Isto é feito tanto para elevar o nível de disponibilidade a valores adequados antes do início do sistema produtivo como para mantê-lo ao longo das safras agrícolas, por adições periódicas que reponham, ao menos, o fósforo que foi retirado por ocasião das colheitas.

No entanto, nesses solos, diversos fatores interferem para que a eficiência desse processo, que constitui a construção da fertilidade do solo e sua manutenção ao longo do tempo, seja baixa, sendo o principal deles a elevada capacidade de retenção de P na fase sólida, bem como a ineficiência morfofisiológica das plantas cultivadas em relação às nativas da região. Isso resulta num requerimento de grandes aportes de fósforo na fase de correção, acima das quantidades necessárias para formação da planta, bem como de adições anuais acima da exportação das culturas (Anghinoni, 2004), visando compensar a capacidade dreno do solo que é bem maior do que a da planta (Novais et al., 2007).

Somando-se a isso, fatores externos à lavoura, como a alta nos preços dos fertilizantes observada nos últimos anos (ANDA, 2014), bem como as estimativas de duração das reservas de rochas fosfáticas no mundo (300 anos) (USGS, 2014), conclui-se que buscar sistemas de produção e manejo da adubação fosfatada que possibilitem maior eficiência de uso do fósforo do fertilizante aplicado ao solo se torna uma questão de sobrevivência econômica da propriedade bem como do homem que dela depende.

Acredita-se que o adequado estudo da eficiência de uso do fósforo de fertilizantes fosfatados envolve a avaliação do balanço entre entradas e saídas de fósforo no sistema, em função da fonte e modo de aplicação do fertilizante e do sistema de manejo do solo, que são importantes fatores que afetam a eficiência do fertilizante fosfatado (Anghinoni, 2004). Além disso, essas avaliações serão mais completas quanto maior o tempo de abordagem do estudo. Isso porque as fontes diferem quanto ao efeito residual (Sousa et al., 2010), as respostas aos diferentes modos de aplicação são influenciadas por fenômenos de redistribuição de fósforo no perfil ao longo do tempo (Costa et al., 2010) e os efeitos do manejo do solo são cumulativos, principalmente pelo contraste entre o revolvimento anual e a ausência de preparo do solo, com propriedades emergentes resultantes da nova dinâmica estabelecida (Nicolodi, 2007). No entanto, este tipo de estudo é limitado para as condições da região do Cerrado, carecendo de informações que forneçam base suficiente para definir um manejo eficiente no longo prazo.

Apesar de diversas pesquisas demonstrarem que a eficiência de uso do fósforo de fertilizantes fosfatados é baixa, não ultrapassando 40% (Lindsay, 1979; Yamada & Lopes, 1998; Sousa et al., 2010; Cunha et al., 2011), a adoção de adequadas técnicas de manejo do solo e adubação pode resultar em eficiência de uso muito acima dos valores frequentemente relatados (Syers et al., 2008; Sousa et al., 2010).

De qualquer forma, sempre que a eficiência de uso do fósforo não for igual ou superior a 100%, há acúmulo do nutriente no solo. Isso é o que ocorre com as adubações fosfatadas corretivas total ou gradual (Sousa et al., 2004), em monocultivos de baixa eficiência como soja, trigo, feijão, arroz (Sousa et al., 2010; Franchini et al., 2011) ou sistemas de rotação com maior proporção dessas culturas em relação aquelas consideradas mais eficientes, como o milho (Franchini et al., 2011), bem como em sistemas com adubação fosfatada acima do necessário, realidade frequente nos sistemas produtivos brasileiros (Cunha et al., 2011).

Esse balanço positivo de fósforo no sistema leva ao acúmulo do nutriente no solo (Nunes et al., 2011b), cujas formas químicas e labilidade dependerão das reações de transformação no solo, que por sua vez são dinâmicas e dependem, em grande parte, do manejo adotado. As formas de acúmulo do fósforo no solo têm sido estudadas por meio do fracionamento químico sequencial (Hedley et al., 1982; Cross & Schlesinger, 1995) e tem contribuído para o entendimento da dinâmica do fósforo no solo.

O acúmulo de fósforo em formas de maior labilidade representa uma maior capacidade de reposição do fósforo absorvido pelas plantas na solução do solo. No entanto, para que ocorra adequada absorção, crescimento e produtividade das culturas no longo prazo, a disponibilidade do nutriente deve estar associada à presença de alta densidade de raízes capazes de absorvê-lo, uma vez que o suprimento às raízes ocorre por difusão (Barber, 1995). Apesar das raízes apresentarem elevada plasticidade (Hodge et al., 2009; Mulia et al., 2010), respondendo tanto fisiologicamente quanto morfológicamente à distribuição e disponibilidade de nutrientes no solo (Robinson, 1996), resultados experimentais sugerem que deve-se evitar elevada concentração do fósforo num pequeno volume, em função da absorção ser dependente, além dos teores de fósforo, do volume de solo adubado (Anghinoni, 1992; Klepker & Anghinoni, 1993).

## **2. OBJETIVOS E HIPÓTESES**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste trabalho foi compreender os efeitos do sistema de manejo do solo e da adubação fosfatada na produtividade de grãos e eficiência de uso do fósforo por soja e milho.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

a) Caracterizar o comportamento da produtividade de grãos e da eficiência de uso do fósforo por soja e milho ao longo do tempo em diferentes sistemas de manejo do solo e da adubação fosfatada;

b) Identificar as frações de acúmulo preferencial de fósforo no solo em diferentes sistemas de manejo do solo e da adubação fosfatada;

c) Avaliar a relação entre a distribuição de fósforo disponível e raízes de soja e milho no perfil e sua influência na absorção do nutriente e produtividade dessas culturas em diferentes sistemas de manejo do solo e da adubação fosfatada.

### **2.3. HIPÓTESES**

a) Os efeitos do manejo do solo e da adubação fosfatada na produtividade de grãos e eficiência de uso do fósforo por soja e milho dependem do tempo de cultivo;

b) O sistema plantio direto proporciona acúmulo de frações de maior labilidade em relação ao preparo convencional;

c) O sistema de manejo do solo e da adubação fosfatada com maior relação entre a distribuição de fósforo disponível e raízes de soja e milho no perfil proporciona maior absorção do nutriente e produtividade dessas culturas.

### 3. ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO

#### 3.1. Fósforo e produção agrícola no Cerrado

O desenvolvimento da agricultura, impulsionado pelo contínuo aumento da população mundial e subsequente alta da demanda por alimentos, geralmente está associado com o aumento da produtividade das culturas, visto que a incorporação de novas áreas no processo produtivo tem se tornado limitada, por questões topográficas e/ou ambientais. Neste sentido, o incremento das produtividades está intimamente relacionado com a adição de adubos ao solo visando fornecer às plantas, cada vez mais produtivas, as quantidades necessárias de cada nutriente e manter os níveis adequados no solo e, por conseguinte, sua fertilidade.

A maioria dos solos brasileiros apresenta baixa disponibilidade de fósforo (P), sendo necessária a adição desse nutriente para recuperar áreas improdutivas devido à deficiência desse nutriente. Isso é o que ocorre com os solos do Cerrado que, em condições naturais, apresentam baixíssima disponibilidade de P para o favorável desenvolvimento de praticamente todas as plantas cultivadas para produção de alimentos, fibras, biocombustíveis, madeira e carne, tornando-se necessária adição de fertilizantes fosfatados ao solo. Sousa et al. (2010) apresentam as respostas positivas de diversas culturas à adubação fosfatada em um Latossolo Vermelho argiloso no Cerrado com disponibilidade de P muito baixa mostrando que, além de culturas anuais, espécies consideradas menos exigentes em P como a *Brachiaria* e mandioca também são responsivas à adubação.

A adubação fosfatada, além de necessária para elevar o nível de disponibilidade de P a valores aceitáveis antes de iniciar o sistema produtivo, é importante por mantê-la ao longo das safras agrícolas, por adições periódicas que reponham, ao menos, o P que foi retirado por ocasião das colheitas. No entanto, no Cerrado, diversos fatores interferem para que a eficiência desse processo, que constitui a construção da fertilidade do solo e sua manutenção ao longo do tempo, seja baixa, sendo o principal deles a elevada capacidade de retenção de P na fase sólida dos solos, bem como a ineficiência morfofisiológica das plantas cultivadas em relação às nativas da região. Isso resulta em grandes aportes de P na fase de correção, acima das quantidades necessárias para formação da planta, bem como de adições anuais acima da exportação das culturas (Anghinoni, 2004), visando compensar a capacidade dreno do solo que é bem maior do que a da planta (Novais et al., 2007).

Nos últimos anos observou-se uma tendência de alta nos preços dos fertilizantes que não foi acompanhada pelo proporcional aumento do preço do produto agrícola comercializado. Assim, a relação de troca produto:fertilizante entre 1998 e 2013 apresentou aumentos de cerca de 108% para a média de seis produtos agrícolas (arroz, café, cana de

açúcar, feijão, soja e milho) (ANDA, 2014). Além disso, baseado na média de consumo de rochas fosfáticas observadas em 2012 e 2013 estima-se uma duração das reservas mundiais de pouco mais de 300 anos (USGS, 2014).

Assim, conclui-se que buscar sistemas de produção e manejo da adubação fosfatada que possibilitem maior eficiência de uso do fertilizante aplicado ao solo se torna uma questão de sobrevivência econômica da propriedade bem como do homem que dela depende.

### **3.2. Compartimentos do fósforo do solo**

O P do solo é dividido em dois grandes grupos: P inorgânico (Pi) e P orgânico (Po), dependendo da natureza do composto a que está ligado. Dentro destes dois grupos as formas de P são de difícil identificação devido à diversidade e complexidade de suas formas químicas resultante da infinidade de reações que o elemento pode sofrer.

O Pi é representado pelo P presente na estrutura dos minerais primários e secundários (precipitados), o P adsorvido óxidos de Fe e Al e argilominerais, além do P da solução do solo, encontrado em pequenas quantidades.

O P adicionado ao solo através dos adubos fosfatados provoca reações que tendem ao equilíbrio entre as fases sólida e líquida do solo. Após a dissolução dos adubos fosfatados adicionados, a maior parte do P é adsorvida à fase sólida, formando compostos de solubilidade variáveis (Uehara & Gillman, 1981).

A adsorção do fosfato no solo varia de acordo com o tamanho e a reatividade da superfície específica de adsorção dos colóides, capacidade de oclusão do colóide a que o fosfato será adsorvido e concentração e espécie iônica que compete com o fosfato pelo sítio de adsorção (Uehara & Gillman, 1981). A reatividade da superfície de adsorção varia de acordo com a presença de Ca, Fe e Al, ou na estrutura dos colóides ou fortemente adsorvido a estes, formando pontes de cátions (Wild, 1950; Thomas & Peaslee, 1973). Desta forma, solos ácidos e mais intemperizados apresentam menor contribuição do Ca em relação ao Fe e Al, na adsorção dos fosfatos, sendo que destes, a adsorção envolvendo Fe confere menor labilidade ao fosfato do que a envolvendo Al (Hingston et al., 1974).

As reações de adsorção do fosfato à colóides minerais contendo Fe e Al ocorrem em duas etapas (Meurer et al., 2004). A primeira, denominada complexo de esfera externa, é rápida e envolve apenas atração eletrostática entre o íon e a superfície de carga oposta do colóide, havendo presença de pelo menos uma molécula de água entre eles. O fosfato adsorvido neste processo é mais facilmente dessorvido (Parfitt, 1978). Em seguida, se as condições físico-químicas forem favoráveis, ocorre a segunda etapa do processo de adsorção,

denominado complexo de esfera interna. Esta fase é mais lenta e ocorre, principalmente, em sítios de baixa cristalinidade e elevado desbalanço de cargas, que são mediadas pelo pH do solo. Nestas regiões, a adsorção se dá pela troca entre grupos  $\text{OH}^{1/2+}$  ligados ao metal e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , formando ligações de diferentes tipos: monodentada, onde um átomo do metal se liga a um oxigênio do fosfato; bidentada, onde um átomo do metal se liga a dois oxigênios do fosfato; e binucleada, onde dois átomos do metal se ligam, cada um, a um oxigênio do fosfato (Fixen & Grove, 1990). O tipo de ligação a que o fosfato estará adsorvido aos colóides é influenciado por diversos fatores e a ordenação monodentadas, bidentadas e binucleadas representa uma ordem crescente de energia de ligação e tempo de contato do fosfato com o sítio de adsorção e uma ordem decrescente de teor de fosfato no solo e possibilidade de dessorção (Parfitt, 1978).

As reações de adsorção do fosfato à colóides minerais contendo Ca ocorrem principalmente em solos calcários e funcionam como núcleos de formação e acúmulo de minerais de fosfato de cálcio estáveis (White, 1980). Após a adsorção, reações de precipitação subsequentes levam a formação de minerais amorfos de elevada estabilidade, caracterizando o fenômeno de envelhecimento do fosfato (Parfitt, 1978). Em solos ácidos, onde não há presença de minerais contendo Ca, esse fenômeno ocorre em função, puramente, de reações de precipitações sucessivas, em zonas de alta concentração de P e Ca na forma iônica, originadas por fosfatagem ou calagem.

O processo de precipitação ocorre quando as concentrações dos íons participantes das reações de dissolução e precipitação excedem o produto de solubilidade dos respectivos compostos (Sample et al., 1980), havendo a formação de compostos insolúveis, sendo que se as condições forem favoráveis, os produtos de precipitação tendem a se transformar em formas cada vez mais estáveis.

Os fosfatos precipitam no solo reagindo principalmente com  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{K}^+$  tendo  $\text{HPO}_4^{2-}$  e  $\text{PO}_4^{3-}$  como contra íon (Sample et al., 1980). Em solos ácidos, os principais compostos de precipitação formados e que têm reconhecida implicação na dinâmica do P no solo, em ordem decrescente de solubilidade, são:  $\text{H}_6(\text{NH}_4)_3\text{Al}_5(\text{PO}_4)_8 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  (amônio taranaquita),  $\text{H}_6\text{K}_3\text{Al}_5(\text{PO}_4)_8 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  (potássio taranaquita),  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (estregita) e  $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (variscita). Em solos alcalinos, os principais compostos de precipitação formados, em ordem decrescente de solubilidade, são:  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (bruchita),  $\text{CaHPO}_4$  (fosfato dicálcico),  $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (fosfato octacálcico),  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  (fosfato tricálcico),  $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$  (hidroxiapatita) e  $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$  (fluorapatita) (Lindsay et al., 1989). Apesar de ser um levantamento antigo, pouca informação sobre os compostos de precipitação envolvendo o P foi agregada desde então.

A dinâmica de dissolução e precipitação desses compostos, que depende principalmente das concentrações dos íons envolvidos e pH do solo, juntamente com a dinâmica de adsorção e dessorção regulam as concentrações das formas iônicas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$  na solução do solo, que apresentam muito baixa concentração, se comparada a essas formas inorgânicas que a regulam (Sample et al., 1980).

O outro grupo é o P orgânico. Este ocorre no solo, primeiramente, nas formas orgânicas presentes na biomassa microbiana, já que na pedogênese, é o primeiro representante da biota capaz de assimilar fosfatos que estão sendo liberados do intemperismo de rochas e minerais e incorporar na sua estrutura. Em seguida, plantas que passam a existir no sistema se aproveitam dos fosfatos liberados de minerais primários bem como de produtos de decomposição microbiana. Desta forma, o Po do solo é oriundo dos resíduos vegetais depositados no solo, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição.

Muitos fatores influenciam o conteúdo de Po em solos nativos. Dentre eles destacam-se o material de origem (Williams & Steinbergs, 1958), textura (Kaila, 1963), conteúdo de matéria orgânica (Fares et al., 1974), drenagem dos solos (Williams & Saunders, 1956), pH dos solos (Kaila, 1963), quantidade de chuvas e temperatura (Walker & Adams, 1959). Deste modo, o conteúdo de Po dos solos se apresenta bastante variável, sendo valores freqüentemente encontrados nas camadas superficiais da ordem de 20 a 80% (Dalal, 1977). Além disso, valores extremos como 4% em Argissolos (Williams & Steinbergs, 1958) e 95% em áreas nativas turfosas (Kaila, 1956) já foram reportados.

Dentre todos os componentes da matéria orgânica do solo (N, P, S, C, H, O) o P é o único que não entra na biosfera primariamente pela atmosfera, sendo oriundo de Pi presente no material de origem, que sofre pedogênese, de modo que os minerais primários, quando intemperizados, liberam o elemento em solução do solo, conforme comentado anteriormente.

A relação entre os nutrientes da matéria orgânica e o carbono do solo é bastante variável e valores da ordem de 110:9:1 (Black & Goring, 1953) para a relação C:N:P têm sido aceitos, sendo que as maiores variações ocorrem com relação ao P, com variações na relação C:P desde 100:0,15 até 100:3,05 (Barrow, 1961).

A variedade de compostos orgânicos presentes no solo e suas possíveis interações com o P fazem com que cerca de metade dos compostos orgânicos fosfatados sejam de natureza química indefinida (Anderson & Malcom, 1974). Os compostos fosfatados já identificados no solo podem ser divididos em três grupos (Condrón et al., 2005): ésteres fosfóricos, fosfonatos e anidridos fosfóricos.

Os ésteres fosfóricos são o grupo mais abundante e são classificados, de acordo com o número de ésteres presentes, em monoésteres, diésteres e triésteres, sendo que os triésteres tem origem sintética e não foram encontrados na natureza (Emsley & Hall, 1976).

Os principais compostos monoésteres fosfóricos já identificados no solo são os fosfatos de inositol, que apesar de, em geral, se apresentarem como o componente predominante do Po total dos solos (Dalal, 1977; Turner et al., 2002), valores muito baixos, da ordem de 0,4%, já foram reportados (Williams & Anderson, 1968). Além dos fosfatos de inositol, fosfoproteínas, mononucleotídeos e açúcares fosfatos são exemplos de monésteres fosfóricos já identificados nos solos, mas concentrações traço (Stevenson & Cole, 1999).

Os principais compostos diésteres fosfóricos já identificados no solo são os fosfolipídios, ácidos nucleicos, ácido teicóico e compostos aromáticos. Os fosfolipídeos constituem uma importante forma de ciclagem do elemento no sistema solo, já que representam a maior parte do Po total dos tecidos das plantas (Bielecki, 1973), porém, uma pequena parte no conteúdo de Po total dos solos (0,5% a 7%) (Dalal, 1977; Magid et al., 1996). Os ácidos nucleicos e seus derivados representam até 3% do Po total dos solos (Magid et al., 1996). Os ácidos teicóicos estão presentes em paredes celulares de bactérias Gram-positivas e actinomicetos e, apesar de encontrados em quantidades muito baixas (Guggenberger et al., 1996), valores de participação no Po total do solo da ordem de 20% já foram reportados (Makarov et al., 2002). Os diésteres fosfóricos aromáticos existem no solo em concentrações traço e sua estrutura química específica ainda é desconhecida (Amelung et al., 2001).

Os fosfonatos são compostos que apresentam a ligação C-P e tiveram sua primeira identificação no solo reportada por Newman & Tate (1980). Apesar da função dos fosfonatos na natureza não ser ainda bem compreendida, sabe-se que a ligação C-P apresenta maior resistência à oxidação e hidrólise do que a ligação C-O-P dos ésteres, sugerindo uma importância no acúmulo de Po no solo. Cade-Menun et al. (2000) observaram valores de até 12% na participação de fosfonatos no Po total do solo.

Os anidridos fosfóricos são polifosfatos orgânicos, como a adenosina difosfato e a adenosina trifosfato, presentes em concentrações traço no solo (Stevenson & Cole, 1999)

As diferenças na participação no Po total do solo e a labilidade dos compostos estão relacionadas com o tipo de ligação química entre o íon fosfato e a matriz orgânica do composto, além de possíveis interações entre os compostos orgânicos e os colóides minerais. Assim, tomando como exemplo os ésteres fosfóricos, grupo mais abundante no solo e de natureza química mais amplamente conhecida, a estrutura química de compostos com fosfatos ligados a matriz orgânica por ligações diéster (fosfolipídios e ácidos nucleicos) permitem a

decomposição por organismos quimioorganotróficos em busca de carbono, energia e elétrons, resultando na liberação dos íons fosfato e contribuindo para a ciclagem do elemento no sistema. Por outro lado, fosfatos ligados a matriz orgânica do composto por ligações monoéster (fosfatos inositol) apresentam elevada estabilidade estrutural e menor labilidade no sistema, constituindo a maior fração de acúmulo do Po do solo (Stewart & Tiessen, 1987).

Outra fração de Po do solo é aquela contida na biomassa microbiana, que é muito importante devido à sua rápida ciclagem, podendo representar de 2% a 24% do Po do solo (Brookes et al., 1984). A mineralização do Po por ação da microbiota pode ocorrer de duas maneiras: a ação direta sobre os compostos orgânicos, por sua necessidade de obter carbono para formação estrutural, energia e elétrons para processos metabólicos; e a ação enzimática por meio de fosfatases, enzimas extracelulares capazes de romper as ligações monoéster e diéster entre fosfato e matriz orgânica, sem, contudo decompô-la a CO<sub>2</sub>. De maneira geral a ação direta dos microorganismos promove a formação de compostos orgânicos de relação C:P mais baixa, já que o requerimento de carbono desses indivíduos é maior do que o de P (Moreira & Siqueira, 2002). Por outro lado, a ação de enzimas fosfatases permite a liberação dos íons fosfato, sem, contudo haver decomposição do material vegetal e evolução de CO<sub>2</sub>, promovendo a formação de compostos com elevada relação C:P. Isto, em parte, justifica a grande variabilidade nesta relação relatada na literatura (Barrow, 1961).

O último compartimento de Po nos solos é aquele presente na solução do solo, que pode representar até 90% do teor total de P na solução do solo (Pierre & Parker, 1927; Stevenson & Cole, 1999).

Usualmente tem se classificado o P no solo em função de sua dinâmica no sistema, sendo dividido em lábil, pouco lábil e P residual ou não lábil, de acordo com a capacidade de determinadas frações em suprir a solução do solo em ânions fosfatos. No que se refere puramente às características das frações do P, essa capacidade de suprimento será determinada principalmente em função da energia de ligação com que o elemento está associado ao substrato. No entanto, esse não é o fator exclusivo, tendo importância aspectos como grau de revolvimento do solo, dinâmica de microorganismos e pH do solo.

A fração lábil corresponde a fosfatos inorgânicos adsorvidos aos minerais do solo com baixa energia de ligação, como as monodentadas, fosfatos orgânicos de ligações de baixa energia, como as diéster, além de Po presente na biomassa microbiana. O P pouco lábil é aquele de natureza orgânica e inorgânica que apresenta elevada força de ligação com os componentes do solo bem como aqueles oclusos dentro de agregados do solo protegidos fisicamente da decomposição/solubilização microbiana ou da ação do pH do solo. O P residual compreende a fração restante, entre o P total do solo e às demais frações e representa

a fração orgânica recalcitrante no solo com elevado grau de proteção física e química e Pi estrutural de minerais primários e secundários (Stewart & Sharpley, 1987).

Uma vez que desconsidera características da planta que acessa o P, bem como possíveis interações entre esta e microorganismos, como micorrizas, esta definição torna-se incompleta no sentido de classificar o composto fosfatado quanto à capacidade que possui de suprir a demanda das plantas. Isso é facilmente observado já que, em ecossistemas naturais, grandes quantidades de biomassa são mantidas apesar do pouco conteúdo de P “lábil” no solo.

Como foi exposto, o P no solo pode assumir diversas formas estruturais, interagir com outros íons e formar diversos compostos de natureza orgânica e inorgânica. Uma primeira tentativa de identificar esses compostos foi feita por Dean (1938) e posteriormente modificada por Chang & Jackson (1957). Consiste numa metodologia que permite estimar diferentes formas de P no solo utilizando soluções com propriedades químicas de extração específicas para cada forma e que ficou conhecida como fracionamento sequencial do fósforo.

Os extratores propostos são soluções de cloreto de amônio + fluoreto de amônio ( $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_4\text{F}$ ), hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), citrato de sódio + hidrosulfito de sódio ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ), que apresentam propriedade de extração para fosfatos de alumínio, fosfatos de ferro, fosfatos de cálcio e fosfatos oclusos, respectivamente. Estes extratores são utilizados de maneira seqüencial, evitando a extração simultânea de várias formas, fato que ocorreria se cada um fosse utilizado isoladamente no solo como tal. Algumas modificações foram propostas por Olsen & Sommers (1982).

O fracionamento proposto por Chang & Jackson (1957) apresenta a limitação de não contemplar formas orgânicas de P no solo e não separar as formas inorgânicas de acordo com o grau de disponibilidade às plantas. No entanto é considerado um trabalho clássico, amplamente utilizado ao longo dos anos e que contribuiu muito nos estudos da dinâmica de transformações do P no solo.

Cerca de 25 anos após, foi proposta por Hedley et al. (1982) uma metodologia de extração seqüencial de P capaz de separar formas orgânicas e inorgânicas de acordo com a labilidade no sistema. As extrações seguem uma sequência que retira do solo formas de menor estabilidade e maior labilidade até aquelas de maior estabilidade no sistema e menor labilidade. O Pi extraído com resina trocadora de ânions e com bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ ) representa as formas de adsorção biologicamente mais disponíveis (Cross & Schlesinger, 1995), associadas aos óxidos de Fe e Al e argilominerais possivelmente formando complexos de esfera externa e complexos de esfera interna mais fracamente adsorvidos, como as ligações monodentadas (Parfitt, 1978; Meurer et al., 2004). O Pi extraído com hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$ ) é considerado moderadamente lábil e está

associado a formas adsorvidas aos óxidos de Fe e Al e argilominerais, possivelmente formando complexos de esfera interna moderadamente adsorvidos (Meurer et al., 2004), bem como formas precipitadas com Fe e Al com diferentes graus de cristalização. O Pi que está protegido fisicamente no interior de microagregados, detectado após quebra por vibração com ultra-som seguida de extração com hidróxido de sódio ( $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ), é considerado não disponível, assim como o Pi extraído com ácido clorídrico ( $\text{HCl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ), cuja composição é de fosfatos de cálcio estáveis. Também, o Po extraído com bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3 \text{ } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) é facilmente mineralizável e contribui para a disponibilidade às plantas e aos microorganismos. O Po extraído com hidróxido de sódio ( $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) é considerado moderadamente lábil, que juntamente com o Po detectado após vibração com ultra-som acumula-se ao longo do desenvolvimento do solo. Ao final da sequência de extrações, o solo é analisado quanto ao P total residual, que é composto por formas inorgânicas associadas à própria estrutura dos minerais do solo ou adsorvidas formando complexos de esfera interna, em ligações muito estáveis, como as bidentadas e binucleadas (Parfitt, 1978; Meurer et al., 2004), bem como formas orgânicas de elevada estabilidade. Assim, as formas lábeis ou disponíveis incluem a soma do Pi e Po extraídos pela resina e bicarbonato, as formas moderadamente lábeis incluem a soma do Pi e Po extraído pelo hidróxido, enquanto que as não lábeis incluem as demais formas (Pi e Po ultra-som, Pi ácido e P residual). Essa técnica de fracionamento sofreu alterações, principalmente visando conferir maior exequibilidade, como por exemplo, as propostas por Condrón et al. (1985), que utilizaram hidróxido de sódio  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  em substituição à sonificação seguida de extração com hidróxido de sódio  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , procedimento desde então amplamente adotado. Além disso, alguns trabalhos suprimiram o uso da resina trocadora de ânions (Qualls & Richardson, 1995; Solomon et al., 2002). No entanto, algumas alterações foram propostas com objetivos de conferir maior adequabilidade do fracionamento a determinados tipos de solo. É o caso, por exemplo, do fracionamento proposto por Tiessen e Moir (2008) que, para solos intemperizados, utilizaram o ácido clorídrico (HCl) a quente com o objetivo de retirar Po em formas mais estáveis, que não seriam extraídas pelo hidróxido de sódio e, conseqüentemente, computadas no P total residual, mas que teriam importante participação nas transformações do P no solo.

Apesar da interpretação da labilidade de cada fração feita por Hedley et al. (1982) ser muito adotada, existem outras interpretações (Cross & Schlesinger, 1995). Há completa concordância quanto a participação do Pi extraído por resina e Pi e Po extraídos por  $\text{NaHCO}_3$  no compartimento considerado lábil no solo. No entanto, as frações de labilidade intermediária apresentam certa divergência de interpretação. Enquanto muitos autores

consideram com labilidade moderada no solo apenas as frações extraídas pelo NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, interpretando as frações NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> e HCl como pouco ou não lábeis (Hedley et al., 1982; Cross & Schlesinger, 1995) existem autores que incluem essas duas frações no compartimento considerado moderadamente lábil (Bowman & Cole, 1978; Tiessen et al., 1984). Por fim, apesar de praticamente todas as interpretações classificarem o P residual como não lábil no solo, muitos trabalhos demonstraram a possibilidade de sua conversão a formas mais lábeis e uso pelas plantas em condições de exaustão do P do solo (Guo & Yost., 1998; Guo et al., 2000; Gatiboni et al., 2007), enfatizando-se que esse processo se dá em velocidades insuficientes para satisfazer a demanda das plantas e manutenção de elevadas produtividades. Assim, por se tratar de uma interpretação conceitual, parece mais correto classificar essa fração como pouco lábil, assim como o fez Souza (2008), inclusive para ajudar a desmistificar a ideia de que exista alguma fração de P essencialmente “não lábil”, concordando com o pensamento de Gatiboni (2003, p.69).

### **3.3. Efeitos do manejo nos compartimentos do fósforo do solo**

Apesar das limitações existentes nas técnicas de fracionamento químico do P no solo (Condrón & Newman, 2011; Gatiboni et al., 2013), muitos trabalhos têm sido feitos ao longo das décadas que seguiram o desenvolvimento dessas técnicas, sendo muitas delas favoráveis em diferenciar efeito de tipo de solo (Tiessen et al., 1984; Smeck, 1985; Sharpley et al., 1987), sistemas de cultivo (Hedley et al., 1982; Dick, 1983; Sharpley & Smith, 1985; Weil et al., 1988; Neufeldt et al., 1999; Tokura et al., 2002; Silva et al., 2003), tempo de cultivo (Tokura et al., 2002), manejo da adubação (Conte et al., 2003, Silva et al., 2003; Santos et al., 2008), rotação de cultura (O’Halloran et al., 1987; Rheinheimer & Anghinoni, 2001, 2003) e preparo de solo (Rheinheimer & Anghinoni, 2001, 2003) nas frações de P do solo.

No entanto, o assunto parece não ter se esgotado, principalmente quando se leva em consideração que grande parte desses estudos foram realizados em vasos, condições estas que apesar de bastante úteis não são capazes de representar com exatidão a dinâmica que ocorre no campo. Além disso, quando os trabalhos eram feitos em campo, o sistema de preparo empregado na maioria das vezes foi o sistema de preparo convencional (SPC), amplamente utilizado na época.

Uma vez que o sistema plantio direto (SPD) tem sido amplamente adotado em função de seus benefícios do ponto de vista ambiental e econômico, e este sistema apresenta dinâmicas química, física e biológica diferenciadas, resultando num maior nível de organização, em relação ao sistema de preparo convencional (Vezzani, 2001), pode-se inferir que particulares transformações do P no solo, por efeito das adubações ou uso pelas plantas,

ocorrerão no plantio direto. Outro ponto a ser destacado é o fato de que o SPD pode ser encarado como um equilíbrio em formação, com propriedades emergentes em função do tempo (Nicolodi, 2007). Assim, são necessários ensaios de longa duração que avaliem de que forma as práticas de manejo já estudadas em outras condições interferem na dinâmica do P e seu uso pelas plantas no plantio direto, já que ao longo do tempo há alterações nas formas de P no solo (Tokura et al., 2002).

O uso dos solos para fins agrícolas provoca alterações em todos os compartimentos do P no solo, seja pelo efeito de queimadas, reduzindo o estoque de  $P_o$ , preparo do solo reduzindo o  $P_o$  e o P lábil, ou pela absorção das culturas e adubação, alterando todos os compartimentos.

O P adicionado pelos fertilizantes pode sofrer inúmeras reações no solo sendo que adsorção e precipitação são as principais e a velocidade de sua solubilização, que em geral é menor que 48 horas para fosfatos solúveis (Lindsay & Stephenson, 1959), dependerá principalmente da disponibilidade de água. Durante a solubilização do fertilizante fosfatado, íons presentes na solução saturada que se forma migram em direção ao solo, reagindo com o mesmo e entre si, enquanto a água presente no solo migra em direção ao adubo, de modo que a intensidade da movimentação e produtos de reação dependem da natureza química do fertilizante (Lindsay et al., 1962; Khasawneh et al., 1974, 1979; Sample et al., 1979). De modo geral os principais produtos de reação de fertilizantes fosfatados monocálcicos, como os superfosfatos, são fosfatos de Al, Fe e fosfatos dicálcicos (Lindsay et al., 1962; Sousa & Volkweiss, 1987b), sendo que 25% do P adicionado como fosfato monocálcico permanece no solo em resíduos em formas insolúveis, como fosfatos dicálcicos e apatitas (Sousa & Volkweiss, 1987b), com disponibilidade às plantas dependente de um possível revolvimento ou alterações químicas promovidas por algumas plantas e seus compostos/resíduos ou microorganismos.

Apesar de importante, o conhecimento das reações primárias que ocorrem na região de aplicação dos fertilizantes fosfatados é incompleta na tentativa de determinar de que forma afeta os compartimentos de P no solo, uma vez que como o ambiente é dinâmico, o P precipitado ou adsorvido pode sofrer novas transformações, bem como aquele contido nos resíduos orgânicos.

Desta forma, a influência da adubação fosfatada nas transformações do P no solo tem sido avaliada com maior esclarecimento em experimentos de longo prazo e a técnica utilizada tem sido o fracionamento químico do P, em especial o desenvolvido por Hedley et al. (1982).

De modo geral, o que se observa é que em solos tropicais a maior parte do P adicionado acaba constituindo a fração de  $P_i$  considerada moderadamente lábil (Conte et al.,

2003; Silva et al., 2003) principalmente aquela extraída por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> que parece ser a mais dinâmica no solo (Rheinheimer & Anghinoni, 2001) dentre as frações menos lábeis. Outra observação importante é a de que a adição de P pouco altera o conteúdo das frações de Po (Conte et al., 2003), sendo que o aumento observado no conteúdo de P total ocorre principalmente em função do aumento no conteúdo de Pi. Apesar disso, Rixon (1966) observou acúmulo preferencial de P aplicado na forma de Po em pastagens.

A absorção de P pelas plantas e remoção pelas colheitas sem posterior reposição do P exportado também altera os compartimentos de P no solo sendo que, apesar das frações consideradas mais lábeis manterem equilíbrio direto com a solução do solo, de onde a planta absorve P, todas as frações contribuem para a nutrição das plantas ao longo dos anos. Nestes casos, formas menos lábeis atuarão repondo formas mais lábeis (Beck & Sanchez, 1994; Gatiboni et al., 2007) e formas orgânicas assumem uma participação maior com o passar dos anos (Gatiboni et al., 2007).

O tamponamento das formas lábeis por formas menos lábeis dependerá do tipo de solo e região, como observados por Tiessen et al. (1984), onde, em solos pouco intemperizados, 86% da variação do P considerado lábil, extraído por resina aniônica, era explicado pela variação de Pi extraído por NaHCO<sub>3</sub> e NaOH sendo que o primeiro atua como fonte e o segundo como dreno do P lábil. Já em solos muito intemperizados, esses autores observaram que 80% da variação do P extraído pela resina era explicado pela variação de Po extraído por NaHCO<sub>3</sub>, que atua como fonte de P, sendo que o Po extraído por NaOH aparece como principal dreno.

Poucas são as contribuições de frações orgânicas do P às plantas em ecossistemas naturais de regiões temperadas (Russell, 1973) e isso se deve à baixa taxa de mineralização do material orgânico depositado na superfície do solo. Por outro lado, em regiões tropicais, parte substancial do P absorvido pelas plantas advém dessas frações. Entre os agro-ecossistemas, pastagens em diversas regiões do globo (Rixon, 1966; Sharpley, 1985) e áreas de culturas em regiões tropicais (Enwezor, 1977; Anderson, 1980) apresentam o Po como um considerável supridor do requerimento de P às plantas.

Estudos conduzidos por McLaughling et al. (1988 a,b) mostram que o P contido nos resíduos culturais pode não contribuir significativamente para a nutrição da cultura subsequente, mas fazer parte do Po do solo, constituindo uma forma de reserva, e que a contribuição do P dos resíduos culturais para as subseqüentes culturas dependerá da disponibilidade de outras formas de P e deverá ser maior, caso o solo seja pobre em P. Por outro lado, Haas et al. (1961) encontraram após 40 anos de cultivo, uma redução de 42% no conteúdo total de Po em solos do sul dos EUA contra 27% em solos temperados do norte

desse país, mostrando a relativa importância das frações orgânicas de P no suprimento das plantas em solos intemperizados.

Apesar de ser evidente que todas as frações de P podem contribuir, até certo ponto e em determinadas circunstâncias, para o crescimento das plantas (Enwezor, 1977), para aquelas frações menos lábeis, isso ocorre em velocidade inferior à demanda das culturas (Gatiboni et al., 2007).

### **3.4. Disponibilidade do fósforo no solo e absorção pelas plantas**

As plantas absorvem P nas formas aniônicas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , que são as formas de especiação iônica de maior ocorrência nas faixas de pH usualmente encontradas nos solos, de 4,0 a 8,5 (Barber, 1995).

Uma vez que as plantas absorvem P da solução do solo, a fase sólida passa a ser a fonte potencial do nutriente e sua liberação pode ocorrer por meio de processos de dessorção e solubilização, para o  $\text{P}_i$  adsorvido e precipitado, respectivamente, bem como mineralização, no caso do  $\text{P}_o$ , sendo que esses processos dependem de diversos fatores do solo, do ambiente e da planta.

O fluxo de P inicia na fase sólida, com sua liberação para a solução do solo e transporte até a superfície das raízes (Olsen & Kemper, 1968) e, uma vez absorvido pelas plantas, é redistribuído entre seus órgãos, determinando o seu desenvolvimento e rendimento.

A capacidade de acesso ao P do solo pela planta irá depender de características de ambos (planta e solo) e estas das condições ambientais. Uma vez que a planta absorve o P da solução do solo, esta torna-se altamente dependente da capacidade do solo em repor o P da solução numa velocidade que permita a manutenção da concentração na região de absorção acima da mínima requerida pela planta (Barber, 1995; Corey, 1987).

Três mecanismos atuam promovendo o contato do P do solo com a superfície radicular (Bouldin, 1961; Barber, 1962; Barber, 1995): interceptação radicular, fluxo de massa e difusão. Os dois primeiros são obtidos, respectivamente, em função da porcentagem de espaços porosos ocupados por raízes e em função da massa de água transpirada pela cultura, ambos relacionados ao teor de P na solução do solo e respondendo por, no máximo, 10% do total de P acumulado nas plantas (Barber, 1974, 1995). Deste modo, a diferença entre a quantidade de P absorvido pela planta e a quantidade explicada por esses dois mecanismos corresponde à participação do mecanismo de difusão neste processo, cuja descrição conceitual é apresentada por Nye & Tinker (1977), Wild (1981), Wietholter (1985) e Barber (1995) e tendo a aplicação na estimativa de absorção de P pelas plantas se mostrado satisfatória (Olsen & Watanabe, 1963, 1970; Baldovinos & Thomas, 1967). No entanto, em condições em que os

teores de P na solução do solo são altos, como nas regiões próximas aos grânulos de fertilizantes fosfatados solúveis ou na região do sulco em aplicações localizadas do P, o fluxo de massa pode se tornar importante mecanismo de suprimento de P as raízes.

Uma vez que a difusão (equação 1) (Barber, 1995) se processa a distâncias muito curtas em função de um gradiente de concentração de P ( $dc/dx$ ) na solução do solo em relação à concentração na superfície da raiz (equação 2) (Corey & Schulte, 1973), a quantidade de P que chega às raízes ( $dq/dt$ ) é dependente da área de sistema radicular (A), da disponibilidade de P na região de sua influência ( $dc/dx$ ) bem como do coeficiente de difusão efetiva ( $D_e$ ) (equação 3) (Nye & Tinker, 1977):

$$dq / dt = A D_e (dc/dx) \quad (1)$$

$$dc/dx = (C_1 - C_2) / L \quad (2)$$

$$D_e = D_1 \theta f / b \quad (3)$$

em que,  $C_1$  é a concentração do nutriente na solução do solo (não influenciada pelo processo de difusão e a uma distância L da raiz);  $C_2$  é a concentração do nutriente na solução do solo na superfície da raiz; e L é a distância entre  $C_1$  e  $C_2$ , que pode variar de 0,5 a 4,0 mm, ou mais (Anghinoni & Meurer, 2004);  $D_1$  é o coeficiente de difusão de P em água ( $8,9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ );  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de água; f é o fator de impedância; e b é o poder tampão de P do solo.

O fator de impedância, adimensional, variável conforme a tortuosidade do caminho difusivo pode ser estimado através das seguintes equações para solos francos e arenosos ( $f_a$ ) e solos argilosos ( $f_b$ ) (Barraclough & Tinker, 1981):

$$f_a = 1,58 \theta - 0,172 \quad (4)$$

$$f_b = 0,99 \theta - 0,172 \quad (5)$$

À medida que a planta absorve o P na solução do solo próximo à raiz é necessário que haja uma reposição de P para que a absorção continue ocorrendo. A capacidade do solo repor o P na solução é denominada poder tampão (b) e depende da concentração de P na fase sólida ( $C_s$ ) em equilíbrio com o P da solução ( $C_1$ ) (Barber, 1995):

$$b = C_s / C_1 \quad (6)$$

O poder tampão exerce o efeito de diminuir o coeficiente de difusão efetivo ( $D_e$ ) de íons na solução do solo, principalmente daqueles que são fortemente adsorvidos às partículas de solo (Nye & Tinker, 1977).

A quantidade de P que chega até as raízes por difusão depende, ainda, da taxa de absorção e da magnitude do sistema radicular (A). A taxa de absorção, expressa pela quantidade absorvida por unidade de área ou comprimento de raiz e tempo, é função da concentração de P na superfície das raízes, a qual é controlada por características fisiológicas

que variam com as espécies. O P absorvido transloca-se para regiões de maior atividade celular, para ser utilizado na produção vegetal. Já, a magnitude do sistema radicular, além de características intrínsecas da planta, pode ser afetada por fatores de solo, como densidade, aeração, disponibilidade de nutrientes e de elementos tóxicos.

Um sistema radicular bem desenvolvido é importante para utilização de forma eficiente do P aplicado ao solo. Portanto, em solos que apresentem restrição ao crescimento das raízes das plantas, tanto superficial como subsuperficial, como alta acidez, toxidez de alumínio e deficiência de cálcio, práticas como a calagem e, em algumas situações a gessagem, são imprescindíveis.

A absorção de P da solução do solo que entra em contato com a superfície das raízes é determinada pela extensão do sistema radicular, concentração de P na superfície da raiz e capacidade das raízes em absorver P (Anghinoni, 1979). Esta capacidade, em função da concentração na solução, pode ser descrita pela equação de Michaelis-Menten, com três parâmetros: velocidade máxima de absorção ( $V_{max}$ ); concentração do íon na qual ocorre a metade da velocidade máxima ( $K_m$ ); e concentração do íon na solução quando a absorção é zero (Nye & Tinker, 1977). A capacidade de absorção é diretamente proporcional a  $V_{max}$  e inversamente proporcional a  $K_m$ .

Barber (1995) comparou soja e milho quanto a parâmetros morfológicos do sistema radicular e parâmetros cinéticos de absorção de P encontrados na literatura, e observou que, em geral, para um solo em condições adequadas de fertilidade química, física e biológica, o milho apresenta o dobro de densidade de raízes e 6,25 vezes maior influxo máximo de P, em relação à soja. Essas características, a princípio, indicam ser o milho mais aparelhado para absorver P, em uma mesma condição de solo.

O suprimento de P a apenas uma parte do sistema radicular das plantas aumenta a absorção desse nutriente devido a modificações na morfologia das raízes aumentando sua taxa de crescimento na parte suprida com P. Numa situação como, esta Anghinoni (1979) observou que no milho houve redução no raio das raízes e, conseqüentemente, aumento no volume de solo explorado por unidade de massa de raiz. Aumentos em  $V_{max}$  e, dependendo da espécie, decréscimo em  $K_m$ , tem também sido apontados como causas da maior absorção de P na parte do sistema radicular suprida com P (Jungk & Barber, 1974; Edwards & Barber, 1976). Nas partes não supridas com P, o desenvolvimento de raízes é limitado pela quantidade de P translocada internamente nas plantas.

O desenvolvimento do sistema radicular das plantas é afetado por fatores genéticos, do solo e ambientais (Kovar et al., 1992). Sistemas de manejo que promovam maior exploração do solo pelas raízes das plantas são desejáveis em função do melhor aproveitamento da água e

nutrientes, maior tolerância a estresses do solo e, por consequência, maior produção das culturas.

Embora estudos que envolvam avaliação do sistema radicular das plantas sejam limitados pelas dificuldades metodológicas (Oliveira et al., 2000; Amos & Walters, 2006), sua importância é bastante reconhecida e diversos trabalhos têm sido realizados nessa temática (Pedó, 1986; Klepker, 1991; Klepker & Anghinoni, 1995; Klepker, 1996). No entanto, a literatura carece de trabalhos que inter-relacionem diversas características do solo e ambiente no desenvolvimento do sistema radicular das culturas.

Como o P é o nutriente que mais influencia na distribuição do sistema radicular das plantas (Mollier & Pellerin, 1999), uma vez que a distribuição de P e raízes parecem estar intimamente associadas, a distribuição do P disponível no perfil do solo tem sido objeto de estudo por décadas, principalmente pelo fato desse nutriente estar entre os de menor mobilidade no solo (Barber, 1995).

A distribuição do P é influenciada pelo tipo de solo, sistema de preparo, manejo da adubação fosfatada, espécie cultivada, dentre outros fatores (Muzilli, 1983; Cowie et al., 1996). No entanto, de maneira geral, independentemente do manejo, o P adicionado nos sistemas agrícolas de produção de grãos em Latossolo de Cerrado encontra-se limitado à camada superficial de 0-20 cm de profundidade (Nunes et al., 2008), sendo que dentro dessa camada o manejo do solo e da adubação afeta profundamente a distribuição de P.

O SPD proporciona acúmulo de P na camada superficial do solo (Selles et al., 1997) devido às aplicações anuais que em geral, situam-se até 10 cm de profundidade, e pela manutenção dos restos culturais na superfície, que ao se decomporem liberam P nesta camada. Esse fato tem sido observado tanto para formas de P consideradas disponíveis (Sidiras & Pavan, 1985), quanto para as diversas formas de fracionamento (Rheinheimer & Anghinoni, 2001, 2003), sendo esse efeito ampliado ao longo do tempo (Tokura et al., 2002; Costa et al., 2010) e em função do tipo de adubação fosfatada (Costa et al., 2010).

Apesar da redistribuição do P do solo ocorrer (Duiker & Beegle, 2006), a tendência observada é o acúmulo do nutriente na camada até 5 cm de profundidade no longo prazo (Merten & Mielniczuk, 1991; Cowie et al., 1996; Bayer & Mielniczuk, 1997), sendo que, abaixo dessa camada, a disponibilidade é bastante reduzida (Hussain et al., 1999; Essington & Howard, 2000).

O acúmulo superficial de P no SPD em relação ao SPC pode representar, para camada de 0-2,5 cm, de 2 (Rheinheimer & Anghinoni, 2001) a 10 vezes (Bayer & Bertol, 1999) maiores teores no SPD, em experimentos de longa duração, sendo que valores de P disponível freqüentemente encontrados no SPD situam-se entre 4 a 7 vezes superiores em relação ao

SPC na camada de 0 a 5 cm (Shear & Moschler, 1969). Esse efeito pode representar sérias limitações na absorção de P e água pelas plantas em períodos de estiagem (Klepker, 1996) quando a camada superficial do solo torna-se seca e, apesar de haver raízes e P, não há absorção.

A redistribuição do P no SPD para camadas mais profundas do solo ocorre de forma lenta e cumulativa, pela movimentação de solo e partículas de fertilizante promovida pela abertura do sulco de plantio, pela mobilização de ânions orgânicos (Pavinato et al., 2008), pelo crescimento das raízes das plantas (Franchini et al., 2004) e pela atuação de microorganismos e fauna do solo.

Durante seu crescimento, as raízes são forte drenos de P, que é translocado da região de absorção para as raízes em crescimento em regiões de baixa disponibilidade na subsuperfície. Após a morte da planta, o P é liberado nessa camada pela mineralização das raízes (Franchini et al. 2004; Gregory, 2006), sendo esse efeito tão mais pronunciado quanto mais agressivo for o sistema radicular da planta em questão (De Maria & Castro, 1993). Este fato demonstra a importância do estabelecimento de rotações de cultura. O mesmo fenômeno pode ser observado com microorganismos, como os fungos micorrízicos, por exemplo, que, apresentam alta capacidade de assimilação de  $P_i$  (Jakobsen et al., 2005), podendo suprir parte da demanda da planta, por associações micorrízicas, ou incorporando P em sua biomassa que, posteriormente, poderá estar disponível às plantas pela mineralização.

O SPC proporciona uma maior homogeneidade do P na camada sob influência do equipamento de preparo, mesmo com apenas um único preparo (Eltz et al., 1989), sendo esse efeito observado para as diversas formas de P (Rheinheimer & Anghinoni, 2001, 2003), proporcionando um crescimento radicular mais profundo nesse sistema (Hughes et al., 1992). Por outro lado promove a exposição do P a novos sítios de adsorção (Sousa & Volkweiss, 1987a).

O efeito do modo de aplicação do adubo na distribuição do P, absorção pelas plantas e, por consequência, nas repostas produtivas das culturas depende de diversos fatores como tipo de solo, nível de fertilidade do solo, sistema de preparo adotado, dose de fertilizante a ser aplicada e fonte do P, sendo que esses fatores interagem entre si (Anghinoni, 2004).

A adubação localizada no sulco de plantio favorece uma elevada concentração de P numa região limitada de solo (Selles et al., 1997), ou seja, níveis elevados de disponibilidade numa área pequena, limitando a proporção de raízes capazes de absorver o nutriente (Resende, 2004) o que poderá afetar negativamente os rendimentos em plantas com sistema radicular pouco plástico, principalmente em cultivos com elevado espaçamento. Por outro lado a adubação em área total permite maior contato da raiz com o P (Klepker & Anghinoni,

1993; Resende, 2004). No entanto, trabalhos têm mostrado que, independentemente do manejo da adubação fosfatada, existe uma alta concentração de raízes de culturas anuais na camada até 10 cm (Klepker & Anghinoni, 1993; Anghinoni & Meurer, 1999), o que pode ser prejudicial em situações de déficit hídrico (Klepker, 1996; Kochhann et al., 1999).

Em condições de baixa fertilidade há resposta diferenciada aos modos de aplicação do fertilizante, sendo que doses baixas têm a resposta favorecida pelo menor contato com o solo, como ocorre na aplicação no sulco de semeadura, principalmente no caso de fontes solúveis (Fox & Kang, 1978; Anghinoni & Barber, 1980). No caso de fosfatos de menor solubilidade, as respostas são favorecidas pelo maior contato com o solo, como ocorre nas aplicações a lanço na superfície. De maneira geral, ausência de resposta ao modo de aplicação é verificada em solos com elevados teores de P (Randall & Hoelf, 1988; Hargrove, 1985) ou altas doses de adubação (Anghinoni & Barber, 1980) e os efeitos da localização no sulco são ampliados em cultivos de maior espaçamento, pelo aumento da relação fertilizante/volume de solo adubado, de modo que em espaçamentos estreitos as respostas são semelhantes à adubação a lanço.

Desta forma, percebe-se que não existe recomendação prévia de melhor manejo da adubação fosfatada, sendo necessário avaliar cada situação do ponto de vista do solo, da planta cultivada e das condições climáticas da região, a fim de determinar de que forma a adubação fosfatada proporcionará a mais eficiente absorção de P pela planta e por consequência produtividade das culturas.

### **3.5. Eficiência do uso do fósforo**

Vários conceitos de eficiência de uso de nutrientes têm sido elaborados (Baligar & Fageria, 1999), podendo se referir à planta ou sistema, incluindo ou não aspectos econômicos, sendo que cada forma de avaliar a eficiência pode ser usada, de acordo com a abordagem a ser feita. Em geral, a eficiência nutricional expressa a relação entre produção obtida e insumos aplicados, ou seja, representa a quantidade de matéria seca ou grãos produzidos por unidade de nutriente aplicado. Teoricamente, a eficiência nutricional diminui com níveis crescentes de um nutriente, se houve resposta da cultura, devido à diminuição relativa do acréscimo na produtividade com sucessiva adição de nutriente.

No que se refere à adubação e com exceção da abordagem econômica, um sistema agrícola pode ser considerado eficiente de acordo com a capacidade que possui de converter o fertilizante adicionado em produção. Assim a máxima eficiência seria alcançada quando o sistema permitisse que a mesma quantidade de nutriente adicionada fosse retirada na forma de produção ao final de um ciclo, cuja duração dependerá do sistema adotado. Seguindo neste pensamento, e ainda excluindo a abordagem econômica, a máxima eficiência de uso de

fertilizantes seria obtida quando somente se trabalhasse com a denominada adubação de manutenção ou reposição e sem que haja prejuízos para o estado de fertilidade do solo e produtividade.

Fenômenos como lixiviação, principalmente para K e N, volatilização, para N, e adsorção específica, para P, competem com essa idéia, dificultando a obtenção dessa máxima eficiência teórica. Além disso, a implantação de um sistema agrícola, nas condições naturais do solo, principalmente nos intemperizados, com muito baixa disponibilidade de P, nunca permitiria que essa situação fosse alcançada, sendo necessária a criação de uma “condição prévia” para que ela ocorresse, que pode ser obtida pela formação de níveis mínimos adequados de fertilidade, do ponto de vista da presença de nutrientes, pH do solo, conteúdo de matéria orgânica e população microbiana.

No que se refere à eficiência de uso do P, práticas como calagem, gessagem, fosfatagem e adubação verde visam permitir a formação dessa condição prévia, de modo que a partir daí, o sistema adotado, do ponto de vista do manejo do solo, culturas, adubação, irrigação, pode definir com que eficiência o fertilizante será utilizado.

Como exemplo, numa adubação anual de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , uma produção de grãos de milho de  $5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , com teor de P nos grãos de  $10 \text{ kg Mg}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , resultaria numa eficiência de 50%, enquanto uma produção de  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  resultaria numa eficiência de 100%. Desta forma, percebe-se que o aumento da eficiência de uso do P, para uma mesma adubação fosfatada e, considerando que os demais nutrientes não são limitantes, estaria relacionado ao aumento da capacidade de absorver P e convertê-lo em produtividade das culturas. Isso depende de diversos fatores relacionados à adubação fosfatada (fonte de P, granulometria, modo de aplicação), ao solo (textura, tipo de minerais de argila, pH, teor de matéria orgânica do solo e população microbiana), à planta (tipo de sistema radicular e capacidade de interação com microorganismos) ou ao clima (temperatura do ar e do solo, disponibilidade de água e insolação).

Os solos altamente intemperizados são vistos como um dreno de P, cuja magnitude depende principalmente da quantidade e qualidade da fração argila do solo (Novais et al., 2007). A magnitude do efeito dreno do solo pode ser observada por técnicas como curvas de adsorção onde em Latossolos de cerrado até  $9.200 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  podem ser adsorvidos na camada de 0-20 cm (Novais et al., 2007). Esses valores contrastam com as quantidades de P requeridas pelos cultivos anuais como a soja, que para produzir  $4 \text{ ton grão ha}^{-1}$  absorve do solo cerca de  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (palha e grãos) mostrando que a planta, em um ciclo de cultivo, pode constituir um dreno cerca de 150 vezes ( $9200/60$ ) menor do que o solo pelo P adicionado via adubação.

Refletindo nisso Novais et al. (2007, p.473) comentam: *“Se pensarmos numa floresta tropical, com 54,5 kg ha<sup>-1</sup> de P imobilizados em sua biomassa, com valores de ciclagem da ordem de 17 kg ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>, via serrapilheira e transceptação sobre um solo com poder de fixar 4.000 kg ha<sup>-1</sup> de P, torna-se difícil explicar como esse equilíbrio se mantém.”*... *“Não deve haver, na verdade, equilíbrio entre planta, ou entre o P ciclado, e componentes minerais do solo. Se esse equilíbrio ocorresse de fato, de maneira plena, o solo não permitiria a manutenção do P na biomassa, em quantidades necessárias à floresta na grandeza atual. Assim, esse solo não é apenas um meio físico de sustentação da floresta, mas também um “buraco-negro” para o P que entrar em contato com sua fase mineral”*.

De fato não é a quantidade máxima de adsorção do solo que se necessita adicionar para obter a máxima produção de cultivos anuais, uma vez que com cerca de 320 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, dos quais 240 kg incorporados até 20 cm (dose de correção) e 80 kg no sulco de plantio, elevadas produtividades são obtidas em latossolos argilosos de Cerrado com muito baixa disponibilidade inicial de P (Sousa & Lobato, 2004).

Na realidade, a máxima capacidade de adsorção ocorre em laboratório numa condição totalmente favorável no que se refere ao contato entre o P e a superfície adsorvente, sendo que no solo não é isso o que ocorre, em virtude da imperfeita homogeneidade de contato do P com o solo, proporcionada pelos métodos de preparo do solo, e da localização do adubo aplicado, por efeito do modo de aplicação ou por sua granulometria. Sousa (1980) calculou como 50% o volume de solo teoricamente ocupado por P após 121 dias de reação com grânulos de superfosfato triplo de cerca de 2 mm de diâmetro, na dose de 400 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sendo que com o aumento do diâmetro dos grânulos e mantendo-se a dose, o volume diminui, chegando a 19% para grânulos de cerca de 6 mm de diâmetro.

Isso mostra que, na prática, possivelmente devido às técnicas que reduzem o contato entre o P e o solo, a adição de uma quantidade de P bem inferior à capacidade máxima de adsorção pelo solo já fornece a condição prévia para que um sistema de manejo altamente eficiente no uso do nutriente se estabeleça. No entanto, é comum o pensamento, principalmente por parte dos agentes produtivos (produtores e assistência técnica), de que nos solos tropicais “a eficiência da adubação fosfatada é baixa”, “o fósforo se fixa irreversivelmente nas argilas” e “são necessárias adubações sempre um pouco acima da quantidade exportada pelas culturas para se manter as produtividades”. Esse pensamento tem sido gerado a partir da conclusão de que a eficiência da adubação fosfatada é baixa em solos altamente intemperizados, de que o solo seria um dreno constante e que esse efeito somente cessaria quando a capacidade de adsorção do mesmo fosse preenchida.

Alguns trabalhos tem mostrado que, de modo geral, a eficiência da adubação fosfatada no Brasil é baixa (Sousa et al., 2010; Cunha et al., 2011). Avaliando dados nacionais de

consumo de fertilizantes e estimativas de exportação de nutrientes pela colheita de 18 culturas agrícolas a eficiência do uso do P adicionado na forma de fertilizante fosfatado variou de 41% a 63% entre 1988 e 2010, com média de 52% (Cunha et al., 2011). Apesar de baixos esses valores são maiores do que os 30% preconizados por Yamada & Lopes (1998) e que constituem o senso comum sobre o assunto, principalmente no setor produtivo.

Essa informação existe em função da experiência de produção em áreas no SPC, onde toda base teórica sobre o assunto foi desenvolvida. Nesse sistema, a cada novo revolvimento formas lábeis de P são expostas a novos sítios de adsorção (Sousa & Volkweiss, 1987a), reduzindo sua disponibilidade ao longo do tempo. No entanto, no SPD uma nova dinâmica química, física e biológica se estabelece (Vezzani, 2001), com propriedades emergentes em função do tempo (Nicolodi, 2007) e permitindo manutenção de elevadas produtividades, melhor aproveitamento do P (Coelho & Alves, 2004) bem como menor demanda de fertilizantes fosfatados (Resende, 2004) ao longo dos anos, em relação ao SPC. Além disso, práticas de manejo do solo, da adubação fosfatada e das culturas indicam possibilidade de alcançar eficiência de uso do P muito maior (Sousa et al., 2010; Franchini et al., 2011). Sousa et al. (2010), avaliando a eficiência da adubação fosfatada encontraram valores de 94% quando o solo encontrava-se corrigido com P, em plantio direto, num sistema de rotação soja-milho, confirmando os pressupostos de Syers et al. (2008), de que, no nível crítico, a eficiência do uso de P é igual ou próxima a 100%.

Desta forma, tornam-se necessários estudos de campo de longo prazo que elucidem a dinâmica de P no SPD, que na safra 2011/12 ocupava quase 32 milhões de hectares no Brasil (FEBRAPDP, 2013), ou seja, cerca de 63% da área cultivada com grãos na referida safra (CONAB, 2014). Ao que parece, o SPD associado a práticas de manejo de adubação e culturas pode ser o caminho que conduza a uma máxima eficiência de uso do P.

## 4. CAPÍTULO 1

### EFICIÊNCIA DE USO DO FÓSFORO POR SOJA E MILHO NA REGIÃO DO CERRADO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO

#### 4.1. RESUMO

Por ser obtido a partir de um recurso não renovável, o fertilizante fosfatado deve ser usado de forma a maximizar sua eficiência. No entanto, o melhor entendimento do efeito de práticas agrícolas nesse processo só pode ser obtido em experimentos de longa duração. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do sistema de manejo do solo e da adubação fosfatada na produtividade de grãos e eficiência de uso do fósforo por soja e milho ao longo do tempo. O experimento foi conduzido em Latossolo Vermelho muito argiloso com disponibilidade inicial de fósforo muito baixa, sendo cultivado por 17 anos com as culturas de soja e milho recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  em dois manejos de solo (sistema de preparo convencional ou plantio direto) e em quatro manejos de adubação fosfatada (superfosfato triplo ou fosfato natural reativo, com aplicação no sulco de semeadura ou a lanço na superfície). Anualmente foram avaliadas as produtividades de grãos e eficiência de uso do fósforo por soja e milho, calculada pela relação entre o fósforo extraído nos grãos e aquele aplicado ao solo. Foram realizadas amostragens de solo em profundidade, avaliando-se os teores de carbono orgânico (após 8, 10, 14 e 17 anos de cultivos), fósforo total (após 14 e 17 anos de cultivos) e fósforo orgânico (após 10 e 17 anos de cultivos). Enquanto não havia acumulado no solo uma quantidade de fósforo equivalente à necessária para a correção, maiores produtividades e eficiência de uso do nutriente foram obtidas com aplicação do fertilizante a lanço no sistema de preparo convencional e no sulco no plantio direto. Após o solo estar corrigido com fósforo, não houve diferenças entre os dois modos de aplicação. Por outro lado, em qualquer fase, a adubação com fosfato natural reativo apresentou menor desempenho em relação ao superfosfato triplo no plantio direto, enquanto no preparo convencional o comportamento das duas fontes foi semelhante. A eficiência de uso do fósforo aumentou com a participação do milho no esquema de rotação de culturas. No longo prazo, o plantio direto proporcionou maior produtividade e eficiência de uso do fósforo em relação ao preparo convencional, possivelmente devido ao aumento da matéria orgânica e do fósforo orgânico do solo observado nesse sistema conservacionista.

## 4.2. INTRODUÇÃO

Uma vez que os solos do Cerrado apresentam, em condições naturais, baixa disponibilidade de fósforo (P) para o favorável desenvolvimento de praticamente todas as plantas cultivadas, torna-se necessária adição de fertilizantes fosfatados ao solo. Isto é feito, primeiramente, visando elevar esse nível de disponibilidade a valores aceitáveis antes do início do sistema produtivo (fase de correção) e, em seguida, mantendo-o ao longo das safras agrícolas por meio de adições periódicas que reponham, ao menos, o P que foi retirado por ocasião das colheitas (fase de manutenção).

No entanto, nessa região, diversos fatores interferem para que a eficiência desse processo, que constitui a construção da fertilidade do solo e sua manutenção ao longo do tempo, seja considerada baixa. O principal deles é a elevada capacidade de retenção de P na fase sólida desses solos, devido ao elevado conteúdo de óxidos de ferro e alumínio, capazes de reter íons fosfato em formas de baixa labilidade (Novais et al., 2007). Isso resulta num requerimento de grandes aportes de P na fase de correção, acima das quantidades necessárias para formação da planta, bem como de adições anuais acima da exportação das culturas visando compensar a capacidade dreno do solo que é bem maior do que a da planta (Novais et al., 2007), elevando consideravelmente o custo de produção. Assim, tendo em vista que uma grande parte do P aplicado nos primeiros anos permanece no solo, em formas de maior ou menor disponibilidade às plantas, é necessário avaliar o seu efeito residual nos anos subsequentes, o que só pode ser feito mediante experimentos de longa duração (Syers et al., 2008). No entanto, poucos são os trabalhos dessa natureza realizados no Cerrado.

A partir da década de 1980, a produção agrícola brasileira, que era realizada em sistema de preparo convencional (SPC), passou a gradativamente adotar o sistema plantio direto (SPD) devido aos benefícios nas propriedades químicas (De Maria et al., 1999), físicas (Costa et al., 2003) e biológicas (Mendes et al., 2003) do solo nesse sistema, além do menor custo operacional (Kaneko et al., 2010). Apesar de proporcionar uma maior homogeneidade do P na camada sob influência do equipamento de preparo (Nunes et al., 2011b) e um crescimento radicular mais profundo (Hughes et al., 1992), o SPC também promove a exposição do P a novos sítios de adsorção (Sousa & Volkweiss, 1987a), reduzindo sua labilidade no sistema, principalmente em solos com elevado efeito dreno (Novais et al., 2007). Por outro lado, o SPD proporciona acúmulo gradual de P nas camadas superficiais (Nunes et al., 2011b), devido à aplicação de fertilizantes (De Maria et al., 1999), bem como da ciclagem de nutrientes nos resíduos das culturas (Santos & Tomm, 2003). Isto poderia afetar o seu suprimento às plantas, já que o P apresenta baixa mobilidade no solo (Barber, 1995) e a absorção pelas raízes é dependente do volume de solo adubado (Anghinoni, 1992; Klepker & Anghinoni, 1993). No entanto, a literatura já tem relatado que o SPD permite a

obtenção de maiores produtividades de soja e milho (Santos et al., 2003, 2006), melhor aproveitamento do P (Coelho & Alves, 2004), menor demanda de fertilizantes fosfatados (Resende, 2004) ao longo dos anos, em relação ao SPC.

O manejo preferencial da adubação fosfatada pelos produtores da região do Cerrado constitui de aplicações no sulco de semeadura de fontes solúveis de P. Apesar de ampliar o gradiente de P em profundidade no perfil do solo, principalmente no SPD, aplicações de adubos fosfatados a lanço na superfície constituem uma interessante alternativa em sistemas de produção que se beneficiam com a adubação separada do plantio, principalmente devido a logística operacional. Além disso, acredita-se que com o uso de fontes de menor solubilidade a adsorção específica pela fração argila seria menor em relação às fontes solúveis, devido a solubilização gradual do P, podendo proporcionar uma maior eficiência de uso do fertilizante (Novais et al., 2007). Neste sentido o uso de fosfatos reativos na adubação parece bastante promissor em diversas combinações de culturas e sistemas de manejo do solo (Horowitz & Meurer, 2004; Fontoura et al., 2010; Sousa et al., 2010).

Sempre que a eficiência de uso do P não for igual ou superior a 100%, há acúmulo do nutriente no solo. Isso é o que ocorre com as adubações fosfatadas corretivas total ou gradual (Sousa et al., 2004), em monocultivos de culturas de pouca eficiência como soja, trigo, feijão, arroz (Sousa et al., 2010; Franchini et al., 2011) ou sistemas de rotação com maior proporção dessas culturas em relação aquelas consideradas mais eficientes como o milho (Franchini et al., 2011), bem como em sistemas com adubação fosfatada acima do necessário, realidade frequente nos sistemas produtivos brasileiros (Cunha et al., 2011). Desta forma, esse balanço positivo de P no sistema leva ao acúmulo do nutriente no solo (Nunes et al., 2011b).

Alguns trabalhos tem mostrado que, de modo geral, a eficiência da adubação fosfatada no Brasil é baixa (Sousa et al., 2010; Cunha et al., 2011). Avaliando dados nacionais de consumo de fertilizantes e estimativas de exportação de nutrientes pela colheita de 18 culturas agrícolas, a eficiência do uso do P adicionado na forma de fertilizante fosfatado variou de 41 a 63% entre 1988 e 2010, com média de 52% (Cunha et al., 2011). Mais de uma década antes, Yamada & Lopes (1998) haviam feito levantamento semelhante, mas com número menor de culturas e encontrados valores de 30% de eficiência. No entanto, apesar da eficiência de uso do P historicamente ter sido caracterizada como baixa (Lindsay, 1979), a adoção de adequadas técnicas de manejo podem resultar em eficiência de uso do P muito acima dos valores frequentemente relatados (Syers et al., 2008; Sousa et al., 2010). O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do sistema de manejo do solo e da adubação fosfatada na produtividade de grãos e eficiência de uso do P por soja e milho na região do Cerrado ao longo de 17 anos de cultivos.

### 4.3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na área experimental do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), em Planaltina, DF (latitude 15°36'06''S e longitude 47°42'26''W), com 1.014 m de altitude e clima Cwa (de acordo com a classificação de Köppen). Este corresponde a um típico clima de savana, com precipitação média anual de 1.570 mm e duas estações bem definidas: seca (maio a setembro) e chuvosa (outubro a abril). As médias de temperaturas máxima e mínima são 26,4°C e 15,9°C, respectivamente.

O relevo caracteriza-se como suave ondulado e a fitofisionomia original é o Cerrado sentido restrito. O solo é classificado como um Latossolo Vermelho distrófico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Embrapa, 2013), Rhodic Haplustox, de acordo com a classificação americana (Soil Survey Staff, 2010), ou Rhodic Ferralsol, de acordo com a classificação da FAO (IUSS Working Group WRB, 2006). É um solo bem permeável, muito argiloso (64% de argila), pobre em nutrientes, tendo o metarrilito argiloso como material de origem (Freitas-Silva & Campos, 1999), com predominância de caulinita (634 g kg<sup>-1</sup>), gibsitita (195 g kg<sup>-1</sup>) e hematita (108 g kg<sup>-1</sup>) na fração argila, com ausência de contraste de textura entre os horizontes A e B.

A área experimental foi desmatada em 1976, permanecendo sem uso até 1985, quando se procedeu o preparo do solo, análise química segundo Embrapa (2005) (Tabela 4.1) e aplicação de calcário dolomítico para elevar a 50% a saturação por bases. Cultivou-se mucuna-preta (*Mucuna aterrimum*), guandu (*Cajanus cajan*) e crotalária (*Crotalaria juncea*) nas safras 1985/86, 1986/87, 1987/88, respectivamente, sendo que, após esse período, a área permaneceu com vegetação espontânea até 1994, quando se estabeleceu o experimento. Antes do primeiro cultivo, foi realizada nova análise química de solo segundo Embrapa (2005) (Tabela 2.1), seguida da aplicação a lanço com incorporação de calcário dolomítico, para elevar a 50% a saturação por bases, gesso, potássio, enxofre e micronutrientes, segundo recomendações de Sousa & Lobato (2004), mas sem adubação corretiva com P. Por ocasião da instalação do experimento, em setembro de 1994, o teor de P extraível por Mehlich-1 na camada de 0-20 cm era de 1,0 mg dm<sup>-3</sup>, considerado muito baixo segundo Sousa et al. (2004).

Durante os cultivos foram efetuadas adubações anuais de manutenção, a lanço, com 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na forma de cloreto de potássio, 30 kg ha<sup>-1</sup> de S na forma de gesso, além de, para o milho, 30 kg ha<sup>-1</sup> de N no sulco de semeadura e duas coberturas de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de uréia, segundo Sousa & Lobato (2004). A adubação anual com P foi realizada de acordo com cada tratamento. Foi reaplicado calcário após o 6° e o 15° cultivos, de acordo com análise de solo das amostras tomadas na camada de 0-20 cm de profundidade, visando

elevar a 50% a saturação por bases. A cultura da soja (*Glycine max*), com espaçamento entre linhas de 0,50 m, foi cultivada nos nove primeiros anos, o milho (*Zea mays*), com espaçamento entre linhas de 0,80 m, foi cultivado no 10° e 11° anos e, nos seguintes, houve a rotação entre soja e milho. Os cultivos de soja e milho receberam irrigação suplementar por aspersão em situações de seca durante a estação chuvosa (fenômeno comum na região e denominado “veranico”). A irrigação era definida com base em tensiômetros instalados nas parcelas a 20 cm de profundidade, quando eles apresentavam leitura de tensão maior que 45 kPa. O milheto (*Pennisetum glaucum*), com espaçamento entre linhas de 0,20 m, foi utilizado como cobertura no inverno após o nono cultivo, sendo semeado após a colheita da soja ou milho, recebendo irrigação suplementar para desenvolvimento sem limitação de água, roçado no início da maturação fisiológica e adubado, desde o 14° ano, com 45 kg ha<sup>-1</sup> de N (uréia) visando maior produção de biomassa. A Tabela 4.2 apresenta a sequência de cultivos principais (cultivo de verão) e de cobertura (cultivo de inverno) e a Figura 4.1 apresenta a precipitação mensal acumulada e temperatura mínima, máxima e média mensal durante o período avaliado.

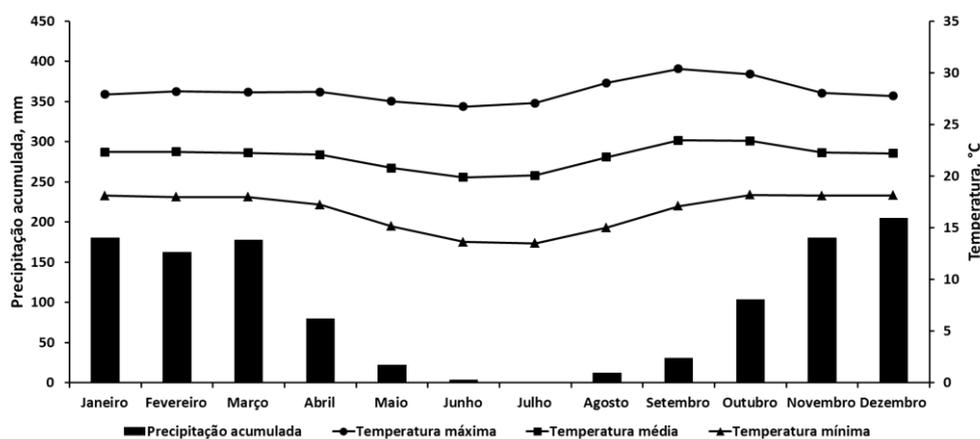
**Tabela 4.1.** Análise química do solo na camada de 0-20 cm em dois momentos antes da implantação do experimento

Ano	pH <sup>(1)</sup>	Ca <sup>2+</sup> <sup>(2)</sup>	Mg <sup>2+</sup> <sup>(2)</sup>	K <sup>+</sup> <sup>(3)</sup>	H+Al <sup>(4)</sup>	Al <sup>3+</sup> <sup>(2)</sup>	CTC	P <sup>(3)</sup>	V	MO
		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----						mg dm <sup>-3</sup>	%	g kg <sup>-1</sup>
1985	4,5	0,82	0,20	0,10	9,13	1,40	10,25	0,9	10,9	17,0
1994	5,4	2,41	2,01	0,11	5,27	0,08	9,80	1,0	46,2	16,2

<sup>(1)</sup> Em água, relação solo:solução de 1:2,5; <sup>(2)</sup> Extração com KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; <sup>(3)</sup> Mehlich-1; <sup>(4)</sup> Extração com acetato de cálcio 1 mol L<sup>-1</sup> em pH 7,0. CTC: Somatório de bases (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>) e H+Al. V: Saturação por bases na CTC. MO: Matéria orgânica facilmente oxidável obtida por oxidação úmida na presença de dicromato de potássio.

**Tabela 4.2.** Sequência de cultivos principais e de cobertura no experimento em estudo

Safra (cultivo)	Cultivo principal	Cultivo de cobertura	Safra (cultivo)	Cultivo principal	Cultivo de cobertura
1994/95 (1°)	Soja	Espontânea	2003/04 (10°)	Milho	Milheto
1995/96 (2°)	Soja	Espontânea	2004/05 (11°)	Milho	Milheto
1996/97 (3°)	Soja	Espontânea	2005/06 (12°)	Soja	Milheto
1997/98 (4°)	Soja	Espontânea	2006/07 (13°)	Milho	Milheto
1998/99 (5°)	Soja	Espontânea	2007/08 (14°)	Soja	Milheto
1999/00 (6°)	Soja	Espontânea	2008/09 (15°)	Milho	Milheto
2000/01 (7°)	Soja	Espontânea	2009/10 (16°)	Soja	Milheto
2001/02 (8°)	Soja	Espontânea	2010/11 (17°)	Milho	Milheto
2002/03 (9°)	Soja	Milheto			



**Figura 4.1.** Precipitação acumulada mensal, temperatura máxima, média e mínima mensal na área experimental, na média do período de 1994 a 2011. Fonte: Estação Meteorológica da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF.

Do experimento com 20 tratamentos foram utilizados no presente estudo oito tratamentos envolvendo manejo do solo e da adubação fosfatada: cultivo no SPC, constituído de uma aração até 20 cm de profundidade com arado de discos e uma grade niveladora antes do plantio da cultura de verão, ou SPD, adubados com fosfato natural reativo de Gafsa (FNR) ou superfosfato triplo (SFT), aplicados no sulco de semeadura (S) ou a lanço na superfície (L), na dose de  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . O FNR continha 28,2% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total, dos quais 44% eram solúveis em solução de ácido cítrico a 2%. O SFT continha 47,6% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total, dos quais 92% eram solúveis em solução de ácido cítrico a 2%.

Anualmente, para aplicação dos fertilizantes fosfatados, eram abertos sulcos no solo utilizando-se a plantadeira, mas retirando-se os carrinhos que cobrem os sulcos. Os fertilizantes fosfatados dos tratamentos com aplicação no sulco de semeadura eram distribuídos em cada linha com máquinas portáteis de alta precisão. Em seguida, os sulcos eram cobertos com terra e todo o experimento semeado com plantadeira. Após a semeadura, distribuíam-se então os fertilizantes fosfatados nos tratamentos com aplicação a lanço, processo efetuado manualmente por operários rurais treinados para essa atividade.

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso com parcelas divididas com os sistemas de manejo do solo (SPC e SPD) nas parcelas e nas sub-parcelas as fontes de P (FNR e SFT) e os modos de aplicação (S e L), distribuídos aleatoriamente dentro de cada uma delas, com três repetições. As dimensões das parcelas eram de 16 m x 8 m e das sub-parcelas eram de 8 m x 4 m ( $32 \text{ m}^2$  de área). A área útil de colheita consistiu de  $15 \text{ m}^2$  para a soja e  $12 \text{ m}^2$  para o milho, localizados na porção central das sub-parcelas.

A colheita de soja e milho foi feita manualmente e os resíduos vegetais picados e devolvidos a cada parcela. Os dados de produtividade de cada parcela foram corrigidos para a umidade de 13%, expressos por hectare ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e os teores de P nos grãos foram analisados

anualmente, de acordo com Embrapa (2005), permitindo calcular a quantidade de P removido pelos grãos (PE). Os teores médios de P (média  $\pm$  desvio padrão da média) nos grãos de soja e milho ao longo dos 17 anos de cultivos e independentemente do sistema de manejo do solo e adubação foram  $9,0 \pm 1,0$  g kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e  $7,1 \pm 0,7$  g kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, respectivamente. A eficiência de uso do P foi determinada pelo método do balanço (Syers et al., 2008), através da razão percentual entre P extraído pelos grãos e o P adicionado pelo fertilizante [ERP = (PE/80) x 100]. Este índice de eficiência foi calculado para vários períodos do estudo. Pela diferença entre a quantidade de P aplicada ao solo e aquela removida pelos grãos, anualmente foi calculada a quantidade de P residual no solo, permitindo calcular a quantidade acumulada ao longo do período do estudo.

Para interpretar o efeito dos tratamentos na produtividade de grãos e na eficiência de uso do P foram realizadas análises de C e P no solo, bem como um balanço do P no solo.

A amostragem de solo foi realizada após o 8º, 10º, 14º, e 17º cultivos nas camadas de 0-2,5 cm, 2,5-5 cm e 5-10 cm, com trado para amostra indeformada de 5 cm de diâmetro, e nas camadas de 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm de profundidade, com trado holandês com 5 cm de diâmetro, sendo uma amostra composta por cada parcela do experimento. Para os tratamentos de adubação a lanço foram tomadas 20 sub-amostras para cada amostra composta coletadas aleatoriamente na área útil das parcelas. Para os tratamentos de adubação no sulco, cada amostra composta foi formada por sub-amostras dirigidas, seguindo a proposta apresentada por Nicolodi et al. (2002) e CQFS-RS/SC (2004), que utilizam tradagem em substituição a pá de corte. Deste modo, escolheram-se seis locais ao acaso dentro de cada parcela com adubação no sulco e, em cada local, coletaram-se sete sub-amostras perpendiculares a linha da cultura e equidistantes, compreendidas entre os centros das duas entre-linhas, sendo uma das sub-amostras na linha. Foi realizada amostragem em área de cerrado nativo distante 50 m do experimento nas mesmas camadas, coletando-se três amostras compostas formadas por 20 sub-amostras cada, coletadas aleatoriamente. Depois de coletadas, as amostras foram secas ao ar, maceradas e passadas em peneira de 1 mm.

O C orgânico foi avaliado após o 8º, 10º, 14º, e 17º cultivos e determinado por digestão úmida na presença de dicromato de potássio sem fonte externa de calor (Embrapa, 2005); o P total por digestão ácida (P<sub>tdig</sub>) foi avaliado após o 17º cultivo e obtido pela digestão com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + MgCl<sub>2</sub> (Brookes & Powlson, 1981; Hedley et al., 1982); o P orgânico (Po) do solo foi avaliado após o 10º e 17º cultivos e obtido após extração com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,0 mol L<sup>-1</sup> (relação solo:extrator de 1:8) por 16 horas, tendo uma sub-amostra sido submetida à ignição a 550º C por 1,5 hora (P<sub>tign</sub>) e outra sub-amostra não, sendo o Po obtido pela diferença entre os teores das duas sub-amostras (Hance & Anderson, 1962; Olsen &

Sommers, 1982). O P dos extratos ácidos foi analisado por espectrofotometria a 820 nm (Murphy & Riley, 1962).

Para o cálculo do balanço de P no solo, a quantidade de P aplicada ao longo dos 17 anos, constituída pelo P do fertilizante (17 anos x 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 1360 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) somado ao P proveniente do gesso agrícola [3.000 kg + (17 anos x 200 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de gesso, a 0,5% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Mg<sup>-1</sup> de gesso)] foi relacionada com a quantidade de P exportada nos grãos e a variação no estoque de P na camada de 0-40 cm nos tratamentos em relação ao cerrado.

Para realização dos cálculos de estoque de P foi determinada após o 17º cultivo a densidade do solo pelo método do anel volumétrico (Embrapa, 2005) nos oito tratamentos nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm e 20-30 cm e 30 a 40 cm, utilizando 3 pontos por parcela, sendo os dados de cada parcela uma média aritmética entre eles e de cada tratamento uma média entre as parcelas (Tabela 4.3). Os estoques de P foram calculados utilizando a metodologia de equivalência de massa, que consiste em comparar a massa de solo de cada tratamento à massa de solo de um tratamento referência (Ellert & Bettany, 1995), que neste trabalho foi a área de vegetação nativa de cerrado.

**Tabela 4.3.** Densidade do solo em seis camadas de Latossolo Vermelho argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação e em área nativa de Cerrado localizada ao próxima ao experimento

Camadas	SPC	SPC	SPC	SPC	SPD	SPD	SPD	SPD	Cerrado
	SFT	SFT	FNR	FNR	SFT	SFT	FNR	FNR	
	L	S	L	S	L	S	L	S	
cm	g cm <sup>-3</sup>								
<b>0 - 5</b>	1,02	1,00	1,07	1,05	1,04	1,05	1,05	1,07	0,85
<b>5 - 10</b>	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,02	0,99	0,99	0,89
<b>10 - 15</b>	1,00	0,94	0,97	0,96	0,95	0,95	1,02	0,96	0,91
<b>15 - 20</b>	1,06	1,03	0,98	1,03	1,01	1,01	1,03	1,01	0,94
<b>20 - 30</b>	1,00	0,98	0,94	0,97	0,93	1,00	1,00	0,96	0,94
<b>30 - 40</b>	1,05	1,00	1,00	1,02	1,02	1,05	1,05	1,05	0,98

Para a análise de variância da produtividade de grãos, eficiência de uso do P, e recuperação do P, foi utilizado o seguinte modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + S_j + \text{erro} (ij) + F_k + M_l + FM_{kl} + SF_{jk} + SM_{jl} + SFM_{jkl} + \text{erro} (ijkl),$$

Para a análise de variância dos teores de C e P em profundidade no solo foi utilizado o seguinte modelo:

$$Y_{ijklm} = \mu + B_i + S_j + \text{erro} (ij) + F_k + M_l + FM_{kl} + SF_{jk} + SM_{jl} + SFM_{jkl} + \text{erro} (ijkl) + P_m + SC_{jm} + FC_{km} + MC_{lm} + FMC_{klm} + SFC_{jkm} + SMC_{jlm} + SFMC_{jklm} + \text{erro} (ijklm),$$

onde:  $\mu$  = média geral dos dados; B = bloco ( $i = 1,2,3$ ); S = Sistema de preparo ( $j = 1,2$ ); F = Fonte de fósforo ( $k = 1,2$ ); M = Modo de aplicação ( $l = 1,2$ ); C = camada ( $m = 1,2,3,4,5,6$ ); erro = erro experimental.

Análise de variância foi realizada com o PROC MIXED do SAS e quando esta apresentou significância o teste de Student (t) ( $p < 0,05$ ) foi utilizado para distinção das médias.

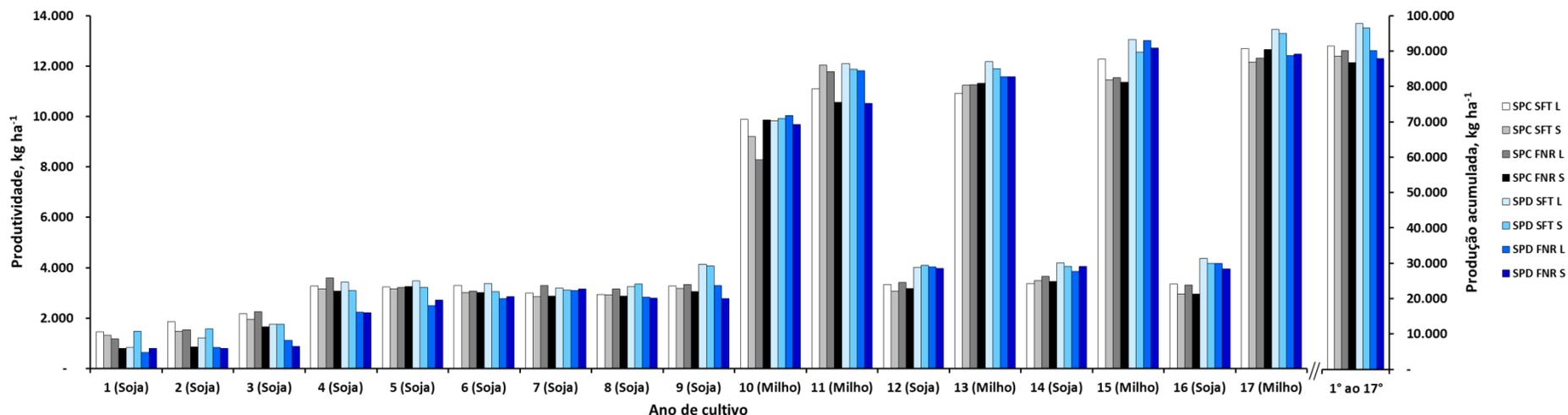
## **4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.4.1 Produtividade de soja e milho**

Uma vez que, por ocasião do primeiro cultivo, o solo apresentava teor de P extraível por Mehlich-1 na camada de 0-20 cm de  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  (Tabela 4.1), considerado muito baixo segundo Sousa et al. (2004), as diferentes respostas das culturas em função do manejo da adubação fosfatada já eram esperadas (Figura 4.2 e Tabela 4.4).

Durante os primeiros anos de condução do experimento houve diversos efeitos ( $p < 0,05$ ), envolvendo sistema de manejo de solo, fonte de P e modo de aplicação (Tabela 4.4). A partir do 5º e 6º ano, o modo de aplicação e o sistema de cultivo, respectivamente, passaram a não mais influenciar (exceção para o 9º ano), enquanto a fonte de P continuou influenciando até o 9º ano (exceção para o 7º), seja pelo efeito simples ou pela sua interação com sistema. Por fim, a partir do 12º ano, o sistema voltou a influenciar na produção das culturas, permanecendo como o único efeito consistente até o fim do período analisado.

Isso se justifica pelos baixos teores iniciais de P na área, associados à não correção com P antes do primeiro cultivo, de modo que o solo foi sendo corrigido gradativamente pelo P aplicado que não era removido pelos grãos das culturas, processo conhecido como correção gradual (Sousa et al., 2004). Para o solo do presente estudo, com 64% de argila, teor de P de  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  (Mehlich-1) e almejando um nível crítico de P de  $6 \text{ mg dm}^{-3}$ , o que corresponde a 90% de produção potencial (Sousa et al., 2004), a dose de correção foi de cerca de  $253 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , segundo o método do poder tampão proposto por Sousa et al. (2010). À medida que a quantidade de P acumulada no solo se aproximava daquela recomendada para a correção (Figura 4.3), as diferenças de produtividade dos tratamentos diminuía (Figura 4.2). Para todos os tratamentos, o solo atingiu a dose de correção total após o 4º cultivo (Figura 4.3).

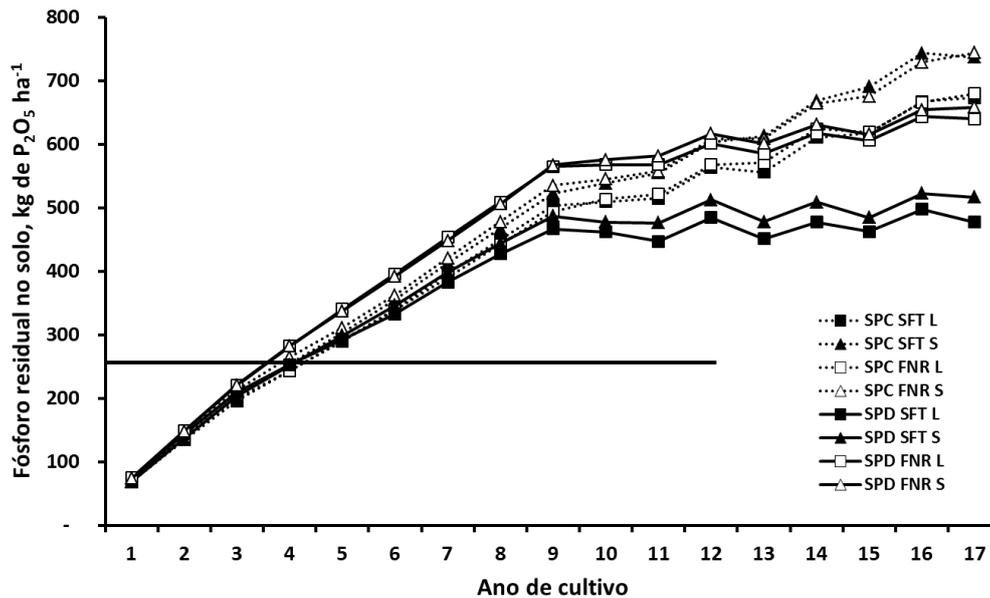


**Figura 4.2.** Produtividade anual e acumulada de soja e milho em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), aplicados a lanço (L) ou no sulco de semeadura (S). A produtividade de grãos anual e acumulada obtidas no tratamento sem adubação fosfatada em SPC foi de 199 kg ha<sup>-1</sup> e 3.385 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Tabela 4.4.** Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações, como resultado da análise de variância, e coeficiente de variação (CV) para a produtividade anual e acumulada de soja e milho ao longo dos 17 anos de cultivo do experimento

Efeito	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2007	2008	Acumulado 1° ao 17°
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	
	Soja	Milho	Milho	Soja	Milho	Soja	Milho	Soja	Milho									
<b>Significância de F</b>																		
<b>Sist</b>	***	***	***	***	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	***	*	***	**	*	*	**
<b>Fonte</b>	***	***	***	***	**	**	ns	**	***	ns	*	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	***
<b>Modo</b>	ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	*	ns	*
<b>Fonte x Modo</b>	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	**	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>Sist x Fonte</b>	ns	ns	**	***	**	ns	ns	***	***	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	*	**
<b>Sist x Modo</b>	***	***	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns							
<b>Sist x Fonte x Modo</b>	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns									
<b>CV (%)</b>	11,5	13,4	13,4	9,9	8,5	6,7	5,8	5,0	6,5	8,9	6,0	13,8	5,9	6,5	4,4	9,6	4,3	3,2

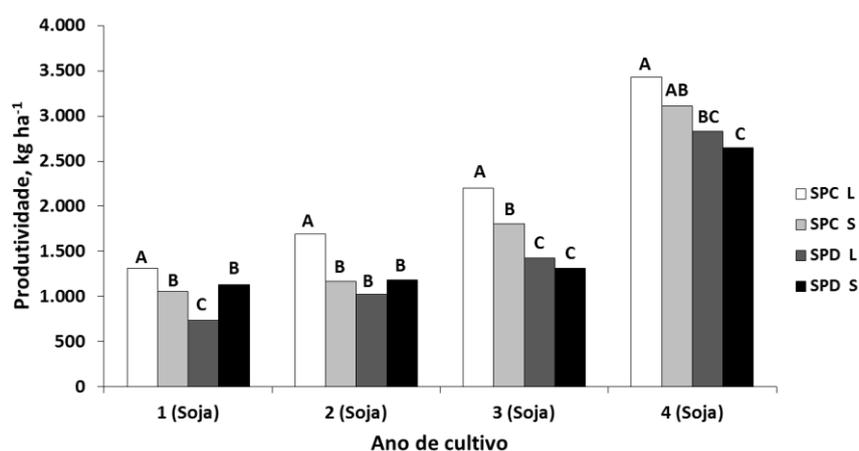
ns, não significativo; \*, \*\* e \*\*\*, significativos a P < 0,05, 0,01 e 0,001 respectivamente.



**Figura 4.3.** Evolução do acúmulo de P no solo em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), aplicados a lanço (L) ou no sulco de semeadura (S). Barra horizontal indica a dose de P necessária para correção do solo segundo o método do poder tampão proposto por Sousa et al. (2010).

Durante a fase de correção gradual acredita-se que as maiores produtividades são obtidas nas condições que proporcionem melhor acesso das raízes ao P do fertilizante, como consequência do balanço entre volume de solo fertilizado, concentração de P e densidade de raízes. Apesar de ser bem conhecido que, em condições de baixa disponibilidade, a aplicação localizada de doses pequenas de P resulta em maior produtividade (Fox & Kang, 1978; Yost et al., 1979), pela maximização da concentração de P no solo (Model & Anghinoni, 1992), no presente estudo, no primeiro ano de cultivo em SPC, a aplicação de P a lanço incorporado proporcionou maior produtividade de soja em relação à aplicação no sulco de semeadura (Figura 4.4). Isso indica que mesmo para esta dose relativamente baixa (32% da dose de correção total), o maior volume adubado é mais vantajoso, sendo que este efeito se repetiu até o terceiro cultivo. Por outro lado, no primeiro ano no SPD, a aplicação no sulco proporcionou maior produtividade em relação à aplicação a lanço. Uma vez que, nesse sistema, o fertilizante aplicado a lanço não é incorporado, sua manutenção na superfície de um solo com baixa disponibilidade limitou drasticamente seu acesso pelas raízes da planta, justificando a menor produtividade obtida. No entanto, nos anos seguintes o modo de aplicação não influenciou a produtividade de soja no SPD (Figura 4.4), possivelmente devido à plasticidade do sistema radicular (Robinson, 1996; Hodge et al., 2009; Mulia et al., 2010), com

mecanismos morfológicos (Anghinoni & Barber, 1980) e fisiológicos (Edwards & Barber, 1976; Jungk & Barber, 1974) de compensação à localização do P, com maior desenvolvimento superficial de raízes, permitindo absorver a quantidade necessária ao satisfatório desenvolvimento vegetativo e produção de grãos. Com o passar do tempo a própria redistribuição do P no solo (Franchini et al., 2004; Pavinato et al., 2008) pode ter contribuído para a ausência de efeito do modo de aplicação.



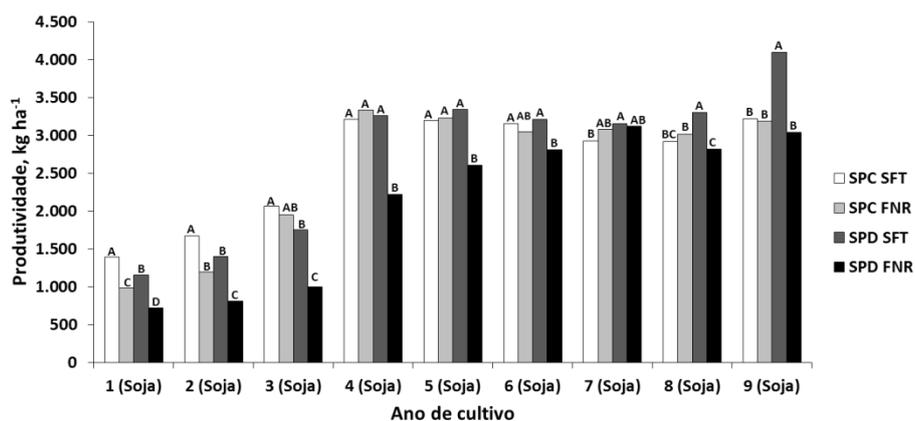
**Figura 4.4.** Produtividade de grãos de soja durante a fase de correção gradual (4 primeiros anos) do experimento em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD) recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicados a lanço (L) ou no sulco de semeadura (S). Valores correspondem à média das fontes de P (n = 6). Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%.

A partir do 5<sup>o</sup> cultivo, momento em que o solo encontrou-se corrigido com P (Figura 4.3), o modo de aplicação não influenciou as produtividades das culturas (com exceção do 9<sup>o</sup> e 16<sup>o</sup> cultivos), permanecendo tal efeito até o final do período estudado (Tabela 4.4). Em sistemas já estabelecidos, com fertilidade adequada, não se observam diferenças de produtividade de soja e milho com o P aplicado a lanço ou no sulco (Pavinato & Cereta, 2004; Bergamin et al., 2008; Guareschi et al., 2008; Sousa et al., 2010; Nunes et al., 2011b) de modo que a escolha da melhor estratégia pode ser baseada em outros fatores como o custo operacional (Matos et al., 2006). Uma vez que a aplicação do potássio a lanço já é uma realidade na região do Cerrado, conforme recomendam Vilela et al. (2004), a aplicação do P a lanço, em operação separada, permitiria a semeadura da soja isoladamente, nos casos em que isto representa uma vantagem operacional. Esta cultura não responde à adubação nitrogenada nas condições do Brasil, conforme demonstraram Mendes et al. (2008). Em sistemas agrícolas com pequenos períodos ideais de semeadura da soja vislumbra-se um grande benefício da adubação com P a lanço. Vale ressaltar que o sucesso da adubação fosfatada a lanço está condicionada a um bom manejo da fertilidade do solo como um todo, sem deficiências de

qualquer natureza, sem impedimentos físicos ou químicos ao desenvolvimento radicular em profundidade, com matéria orgânica e atividade biológica adequados (Sousa et al., 2010).

Diferentemente do que ocorreu para o modo de aplicação, mesmo após haver no solo P residual equivalente à dose corretiva (Figura 4.3), a fonte do fertilizante fosfatado continuou influenciando até o 9º cultivo (Tabela 4.4). Após este momento, já havia no solo cerca de 515 e 560 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para o SPC e SPD adubados com FNR, respectivamente (Figura 4.3). Isso ocorreu porque o conceito de correção gradual considera que a dose corretiva tenha sido disponibilizada no solo. No caso do FNR essa informação seria válida apenas para o SPC que, devido ao revolvimento anual, promove maior contato entre o solo e o fertilizante e, conseqüentemente, solubilização mais intensa do P. Essa é a razão pela qual a partir do 3º cultivo as produtividades do FNR se igualaram ao SFT nesse sistema (Figura 4.5). No entanto, no SPD, como não há revolvimento, esse efeito não ocorre, de modo que o P passa a ser disponibilizado após um período de tempo mais longo, razão pela qual até o 9º ano as produtividades foram menores para essa fonte nesse sistema (Figura 4.5).

Apesar de a partir do 9º cultivo o FNR igualar-se ao SFT, recomenda-se cautela na utilização desta fonte de P, uma vez que frequentemente as produtividades de soja e milho quando adubadas com FNR no SPD apresentaram valores menores que o SFT, apesar deste efeito ter ocorrido ( $p < 0,05$ ) apenas no 11º e 17º cultivos (Figura 4.2 e Tabela 4.4). Muitos trabalhos relataram menores produtividades no FNR em relação ao SFT (Oliveira Junior et al., 2008; Fontoura et al., 2010; Frandoloso et al., 2010) de modo que a aplicação antecipada dessa fonte, especialmente na planta de cobertura, tem sido recomendada para contornar as limitações de velocidade de solubilização no SPD (Sousa et al., 2010).



**Figura 4.5.** Produtividade de soja durante os 9 primeiros anos do experimento em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD) recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR). Valores correspondem à média dos modos de aplicação (n = 6). Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%.

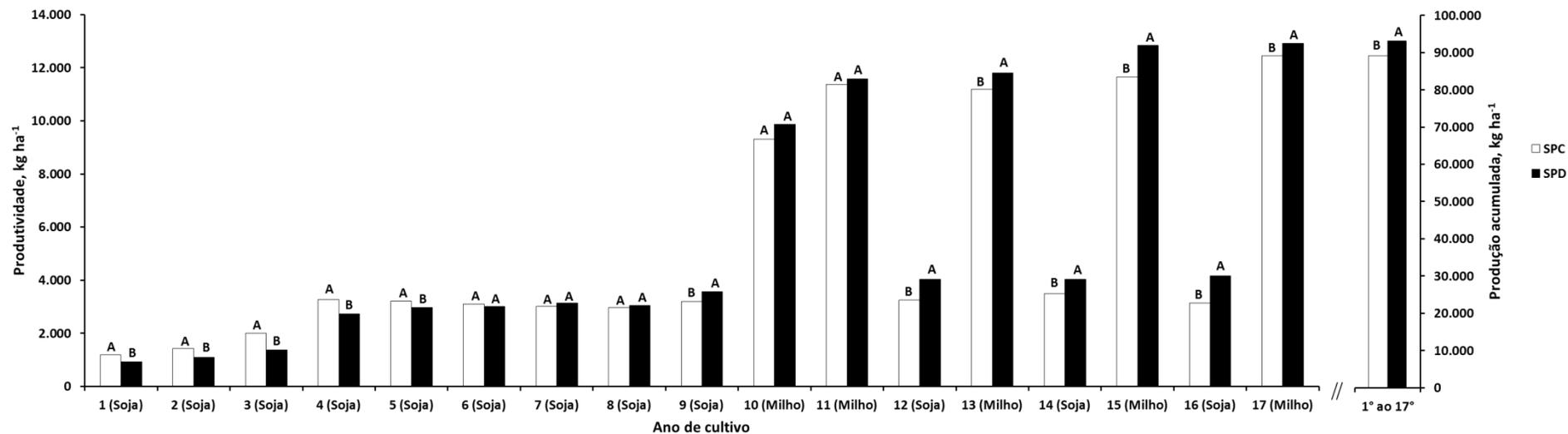
Na média de todos os manejos de adubação o SPC apresentou produtividade de soja maior que o SPD até o 5º ano de cultivo (Figura 4.6), conforme também relataram Schwab et al. (2006) e McGregor et al. (2006) para os primeiros anos de comparação dos dois manejos de solo. Na média dos 5 anos, os ganhos em favor do SPC foram de 22%. No entanto, observa-se que esse efeito foi fortemente influenciado pelos tratamentos adubados com FNR (Figura 4.5), que conforme já foi relatado, são favorecidos pelo maior contato com o solo. No caso do SFT, uma fonte solúvel de P [de acordo com Lopes et al. (2004) as fontes solúveis correspondem a cerca de 95% do total de P utilizado na agricultura brasileira], o SPC foi superior ao SPD apenas nos três primeiros anos (média de 19% em favor do SPC para esse período), igualando-se nos anos seguintes (Figura 4.5). As maiores produtividades no SPC em relação ao SPD nos anos iniciais ocorreram principalmente devido ao maior volume de solo fertilizado com P, proporcionando maior acesso das raízes ao nutriente e favorecendo a dissolução no caso do FNR, uma vez que outros fatores que frequentemente justificariam esse efeito, como adensamento do solo no SPD, não ocorreriam em tempo tão curto.

Após esse período inicial, por vários anos não se observou diferenças de produtividade entre os dois sistemas de manejo do solo (Figura 4.6). No entanto, a partir do 12º cultivo observou-se que o SPD passou a apresentar maiores produtividades de grãos que o SPC, para média dos diferentes manejos de adubação. As diferenças em favor do SPD foram de cerca de 778 kg ha<sup>-1</sup> para a soja e 754 kg ha<sup>-1</sup> para o milho, numa média de três cultivos de cada cultura, no período entre o 12º e 17º cultivos. Esses valores representaram ganhos de cerca de 24% para a soja e 6,5% para o milho no SPD em relação ao SPC. Vale ressaltar que, para aplicação com SFT, o SPD apresentou ganhos de produtividade em relação ao SPC já a partir do 8º cultivo (Figura 4.5), mas que não se repetiu nos dois cultivos de milho subsequentes (10º e 11º cultivos). Diversos trabalhos também apresentam ganhos de produtividade de soja e milho no SPD em relação ao SPC, sendo que a magnitude é bastante variável. Para a soja foram relatados ganhos desde 6% (Pedersen & Lauer, 2003; Santos et al., 2006), 15% (Nunes et al., 2011b) até 42% (Ciotta et al., 2002), este último numa média de 18 cultivos. Para o milho foram relatados ganhos de 12% (Kaneko et al., 2010), 21% (Ruedell, 1995), 22% (Ciotta et al., 2002), 26% (Santos et al., 2003) e 28% (Pereira et al., 2009).

Ao final dos 17 anos de cultivos o SPD produziu 3.892 kg ha<sup>-1</sup> de grãos (4%) a mais que o SPC, para a média dos diferentes manejos de adubação (Figura 4.6). Para o SFT os ganhos foram de 7.200 kg ha<sup>-1</sup> de grãos (8%) em favor do SPD, enquanto para o FNR foram de 584 kg ha<sup>-1</sup> de grãos (menos de 1%), na média dos dois modos de aplicação, a despeito dos menores rendimentos obtidos no SPD nos 3 primeiros anos com SFT e nos 9 primeiros anos com FNR (Figura 4.5). Para a cultura da soja, os ganhos em favor do SPD foram de 3%

(média dos diferentes manejos de adubação em 12 cultivos) enquanto o milho foram de 5% (média dos diferentes manejos de adubação em 5 cultivos). Esses resultados se assemelham, apesar de em menor magnitude, àqueles obtidos por McGregor et al. (2006), que observaram que apesar do SPD proporcionar produtividade de soja 11% menor em relação ao SPC nos 4 primeiros anos, ao final de 17 anos de cultivos o sistema conservacionista resultou numa produtividade de soja 30% superior ao SPC.

Observa-se que os efeitos do manejo do solo e da adubação fosfatada na produtividade das culturas são complexos e dinâmicos (Figura 4.2 e Tabela 4.4), demonstrando a importância de experimento de longa duração para este tipo de avaliação.

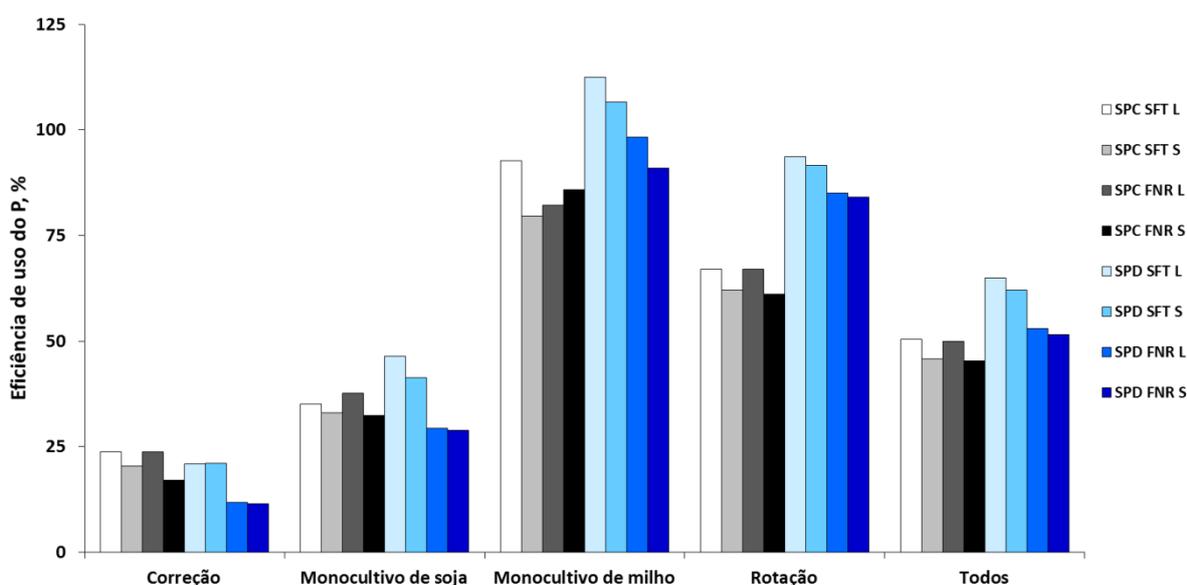


**Figura 4.6.** Produtividade anual e acumulada de soja e milho em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD). Valores para cada sistema de manejo de solo correspondem à média dos manejos de adubação fosfatada (n = 12). Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%.

#### 4.4.2 Eficiência de uso do fósforo

Vários conceitos de eficiência de uso de nutrientes têm sido elaborados (Baligar & Fageria, 1999), sendo que no caso do P uma forma de avaliação consiste no método do balanço, proposto inicialmente por Johnston & Poulton (1977) e desenvolvido por Syers et al. (2008). Por este método a eficiência do uso do fertilizante fosfatado é obtida como uma relação percentual entre o P removido pelos cultivos e aquele adicionado no período considerado.

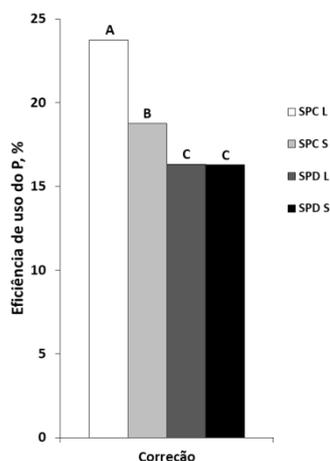
A Figura 4.7 mostra a eficiência de uso do P pelo método do balanço, avaliada em diferentes períodos ao longo dos 17 anos de cultivo do experimento, em função do manejo do solo e da adubação fosfatada. Os anos foram agrupados visando avaliar a eficiência de uso do P nos períodos de correção gradual do P do solo com monocultivo de soja (1° ao 4° cultivo) e após a área estar corrigida com P, em monocultivo de soja (5° ao 9° cultivo), em monocultivo de milho (10° e 11° cultivos) e em rotação soja-milho, com três cultivos de cada cultura (12° ao 17° cultivo), bem como ao longo de todos os 17 anos.



**Figura 4.7.** Eficiência de uso do fósforo por soja e milho em diferentes períodos de cultivo em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço (L) ou no sulco de semeadura (S). Correção: 1° ao 4° cultivo; Monocultivo de soja: 5° ao 9° cultivo; Monocultivo de milho: 10° e 11° cultivos; Rotação: 12° ao 17° cultivo; Todos: 1° ao 17° cultivo.

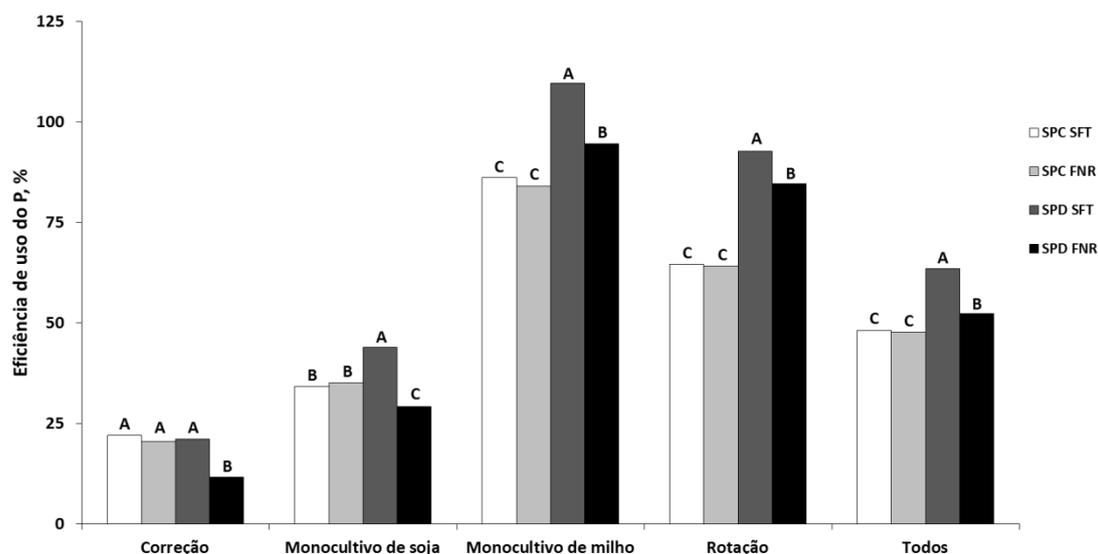
No período de correção gradual do solo com monocultivo de soja (1° ao 4° ano) observou-se comportamento diferente em cada sistema de manejo do solo para o modo de aplicação (Figura 4.8) e para a fonte do P (Figura 4.9). No SPC a aplicação do fertilizante a

lanço proporcionou maior eficiência em relação à aplicação no sulco de semeadura, enquanto no SPD não houve diferenças entre os dois modos de aplicação (Figura 4.8). Por outro lado no SPC não houve diferença entre as duas fontes de P, enquanto no SPD a maior eficiência foi obtida com o SFT em relação ao FNR. Além disso, o SPC apresentou eficiência de uso do P superior ao SPD apenas quando a fonte foi o FNR (Figura 4.9).



**Figura 4.8.** Eficiência de uso do fósforo por soja durante a correção gradual com P (1° ao 4° cultivo) em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicados a lanço (L) ou no sulco de semeadura (S). Valores correspondem à média das fontes de P (n = 6). Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%.

Após a área estar corrigida com P, não se observou diferenças entre os modos de aplicação em nenhum dos demais períodos considerados, tanto para SPC como SPD. Por outro lado, a fonte de P continuou influenciando a eficiência de uso do P no SPD em todos os demais períodos, com o SFT sempre superior ao FNR. Além disso, durante o monocultivo com soja, entre o 5° e 9° cultivos, o SPD apresentou eficiência de uso do P superior ao SPC apenas para o SFT enquanto a baixa reatividade do FNR no SPD fez com que a eficiência de uso do P fosse menor em relação ao SPC. No período com monocultivo de milho (10° e 11° cultivos) e na rotação soja-milho a partir do 12° cultivo, o SPD foi superior para as duas fontes de P (Figura 4.9).



**Figura 4.9.** Eficiência de uso do fósforo por soja e milho em diferentes períodos de cultivo em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 15 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR). Valores correspondem à média dos modos de aplicação ( $n = 6$ ). Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%. Correção: 1° ao 4° cultivo; Monocultivo de soja: 5° ao 9° cultivo; Monocultivo de milho: 10° e 11° cultivos; Rotação: 12° ao 17° cultivo; Todos: 1° ao 17° cultivo.

A maior eficiência com aplicação a lanço no SPC durante a fase de correção se justifica pelo maior volume fertilizado obtido nesta forma de adubação, proporcionando melhor aproveitamento pelas raízes das plantas e maior produtividade (Figura 4.4). Por outro lado no SPD, as produtividades semelhantes para os dois modos de aplicação já a partir do 2° cultivo (Figura 4.4) justificam a eficiência semelhante. Após a fase de correção, há ausência de efeito do modo de aplicação na produtividade das culturas (Tabela 4.4) e, conseqüentemente, na eficiência do uso do P.

Com relação à comparação entre as duas fontes, o revolvimento anual do solo permite que haja solubilização e uso satisfatório do P do FNR no SPC, enquanto que no SPD o não revolvimento do solo limita a reação do FNR e disponibilização para as plantas, conforme comentado anteriormente.

Observa-se que mesmo após a fase de correção gradual com P, além do elevado aporte tecnológico empregado, suprimindo todas as demandas nutricionais ou fitossanitárias, o monocultivo com a cultura da soja proporcionou eficiência de uso de P bastante limitada, sendo que na melhor condição observada no experimento (SFT a lanço no SPD), o valor foi de 46% (Figura 4.7).

Sempre que a eficiência de uso do P não for igual ou superior a 100%, há acúmulo do nutriente no solo. Isso é o que ocorre com as adubações fosfatadas corretivas total ou gradual (Sousa et al., 2004), em monocultivos de culturas de pouca eficiência como soja, trigo, feijão

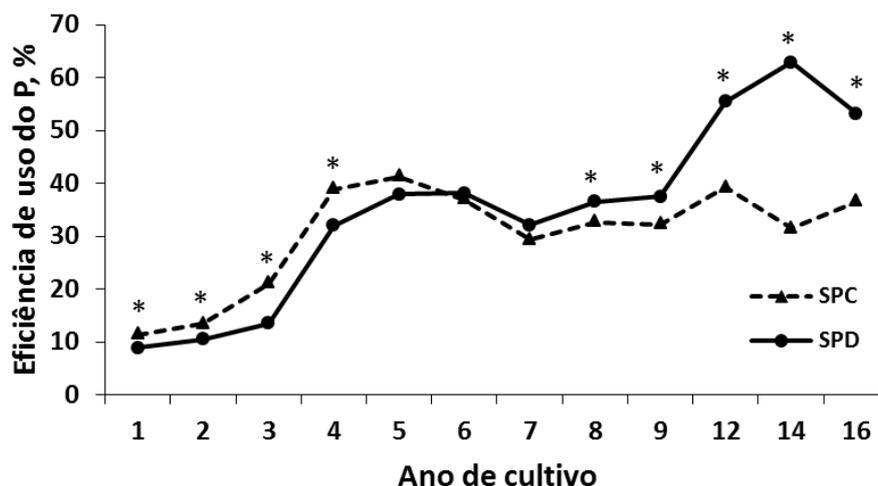
e arroz (Sousa et al., 2010; Franchini et al., 2011) ou sistemas de rotação com maior proporção dessas culturas em relação aquelas consideradas mais eficientes como o milho (Franchini et al., 2011), bem como em sistemas com adubação fosfatada acima do necessário, realidade frequente nos sistemas produtivos brasileiros (Cunha et al., 2011). Isso foi o que ocorreu neste estudo, conforme apresentado na Figura 4.3, onde a baixa eficiência de uso do P na fase de correção gradual (Figura 4.7) permitiu o acúmulo de P, o que era desejável para elevar o nível de fertilidade do solo, mas o monocultivo de soja após a correção continuou produzindo acúmulo de P no solo. Desta forma, esse balanço positivo de P no sistema leva ao acúmulo do nutriente no solo (Nunes et al., 2011b), que reagindo com a fase sólida passa a compor diversas formas químicas com diferentes níveis de disponibilidade às plantas (Blake et al., 2003; Gatiboni et al., 2007), fato que será melhor abordado no Capítulo 2.

O uso eficiente de fertilizantes tem sido buscado nos anos recentes e a Figura 4.7 mostra que a adoção do milho no processo produtivo pode ser uma importante ferramenta nesse sentido, uma vez que na melhor condição observada no experimento (SFT a lanço no SPD) o milho apresentou eficiência de 113%, bem superior à soja, conforme também foi demonstrado por Franchini et al. (2011). Esse valor representa uma extração de P superior à quantidade adicionada no período. Apesar de não ser esta a intenção, uma vez que a manutenção da fertilidade do solo por meio de adições equivalentes ao que foi removido é uma lei básica para a agricultura sustentável no Cerrado, essa cultura é uma opção para áreas com quantidades de P acumulado no solo acima do necessário, onde esse efeito é desejado.

Apesar da soja ser uma cultura de grande importância econômica, respondendo por 52% da área plantada com grãos no Brasil na safra 2012/13 (CONAB, 2014), os monocultivos são indesejáveis, uma vez que provocam desequilíbrios no ambiente. Neste sentido, a composição da rotação soja-milho parece uma adequada forma de respeitar esse requisito da agricultura sustentável nos solos do Cerrado, além de permitir elevada eficiência do uso do fertilizante fosfatado. Isso foi observado no período do 12º ao 17º ano, que correspondem a três ciclos dessa rotação onde, na melhor condição observada no experimento (SFT a lanço em SPD), a eficiência de uso do P foi muito próxima de 100% (Figura 4.7). Franchini et al. (2011), avaliando a eficiência de uso do P em dois sistemas de culturas no SPD por 22 anos, observaram que a introdução da cultura do milho em rotação com a soja no verão, tendo o trigo no inverno apresentou 34% a mais de eficiência de uso do P em relação ao cultivo apenas de soja no verão com trigo no inverno.

A elevada eficiência de uso do P na rotação soja-milho ocorreu não apenas pela elevada capacidade do milho em extrair P do solo (Figura 4.7), mas também porque após o 9º cultivo, com a inserção do milho e do milheto como planta de cobertura no sistema produtivo,

(Tabela 4.2) a soja teve sua eficiência aumentada no SPD (Figura 4.10). No SPC, houve um crescente aumento da eficiência de uso de P pela soja durante a fase de correção gradual com P (1º ao 4º cultivo). No entanto, após esse período, a eficiência permaneceu sem alteração, situando-se em torno de 30% a 40%. No SPD, o fenômeno foi semelhante ao SPC até o 7º cultivo, quando a eficiência voltou a aumentar atingindo ao final do período analisado valores em torno de 50% a 60% (Figura 4.10).

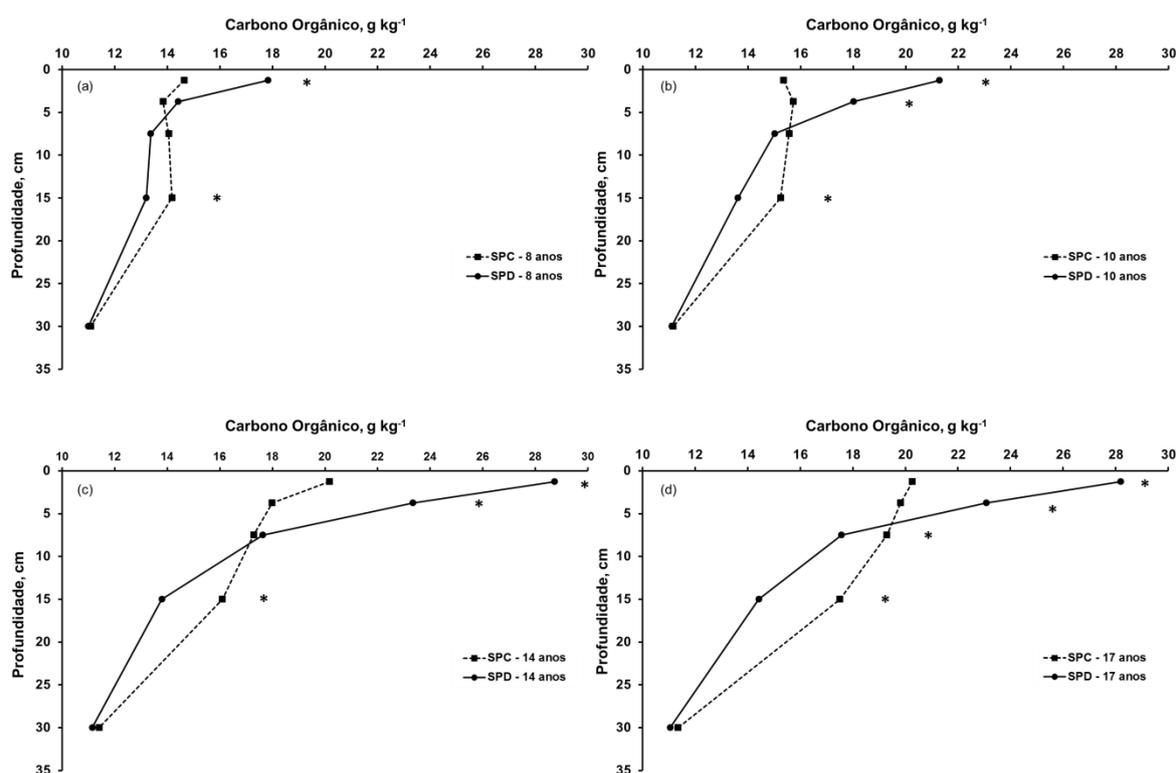


**Figura 4.10.** Evolução da eficiência de uso do fósforo por 12 cultivos de soja em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD). Valores para cada sistema de manejo de solo correspondem à média dos manejo de adubação fosfatada (n = 12). \*, Significativo a 5% pelo teste t.

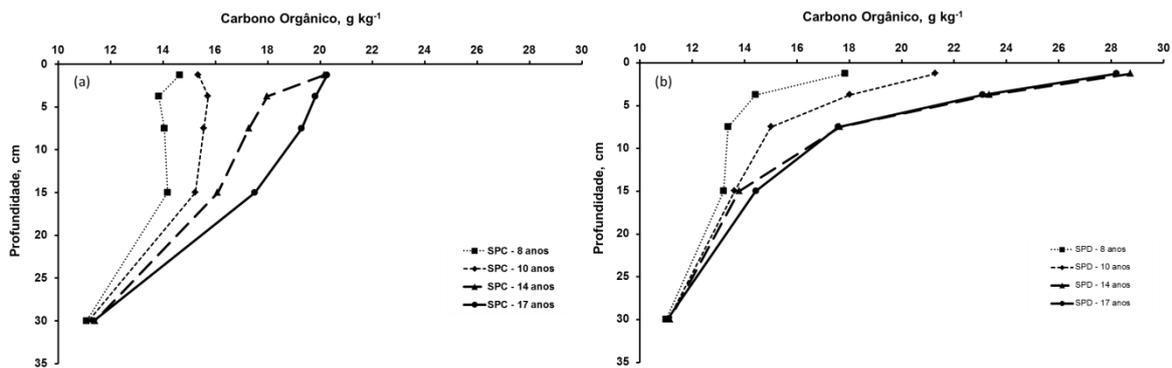
Acredita-se que parte desse efeito tenha ocorrido pelos maiores teores de carbono orgânico do solo (COS) no SPD (Figura 4.11). Enquanto após o 8º cultivo a relação entre o COS no SPD e SPC era de +22%, +4%, -5% e -7% nas camadas de 0-2,5 cm, 2,5-5,0 cm, 5-10 cm e 10-20 cm, respectivamente (com valores positivos e negativos representando ganhos e perdas do SPD relativas ao SPC) aos 17 anos era de +39%, +16%, -9% e -18% respectivamente para as mesmas camadas. Além disso, entre o 8º e 17º cultivos o COS aumentou no SPD em 58%, 60%, 31% e 9% nas camadas de 0-2,5 cm, 2,5-5,0 cm, 5-10 cm e 10-20 cm, respectivamente, enquanto no SPC os valores foram 38%, 43%, 37% e 24% respectivamente para as mesmas camadas (Figura 4.12), evidenciando maior incorporação de COS no SPD nas camadas superficiais, ocorrendo o oposto nas camadas subsuperficiais. O menor teor de COS na camada de 10-20 cm no SPD em relação ao SPC, bastante relatado na literatura (Nunes et al., 2011a), não deve ser encarado como desvantagem comparativa no que se refere a dinâmica do P, uma vez que, conforme também é bem conhecido, no SPD este

elemento encontra-se quase em sua totalidade contido na camada de 0-10 cm (Nunes et al., 2011b).

O aumento de MOS no SPD traz consequentes benefícios relacionados à disponibilidade do P no solo. Dentre eles, pode-se citar a redução do poder tampão (Nunes et al., 2011b), possivelmente pela competição de substâncias húmicas e compostos intermediários da decomposição, como ânions orgânicos, com os sítios de adsorção, reduzindo a retenção de P no solo (Sibanda & Young, 1986; Hue, 1991; Mesquita Filho & Torrent, 1993; Ohno & Erich, 1997; Nziguheba et al., 1998; Fu et al., 2013), o acúmulo de Po, especialmente as frações mais lábeis (Rheinheimer & Anghinoni, 2003; Tiecher et al., 2012a), a maior atividade da enzima fosfatase ácida e o maior número de bactérias e fungos solubilizadores de P (Carneiro et al., 2004). Acredita-se que todos esses fatores contribuam para a redução do nível crítico de P observada em solos com maior teor de MOS (Sousa et al., 2010).



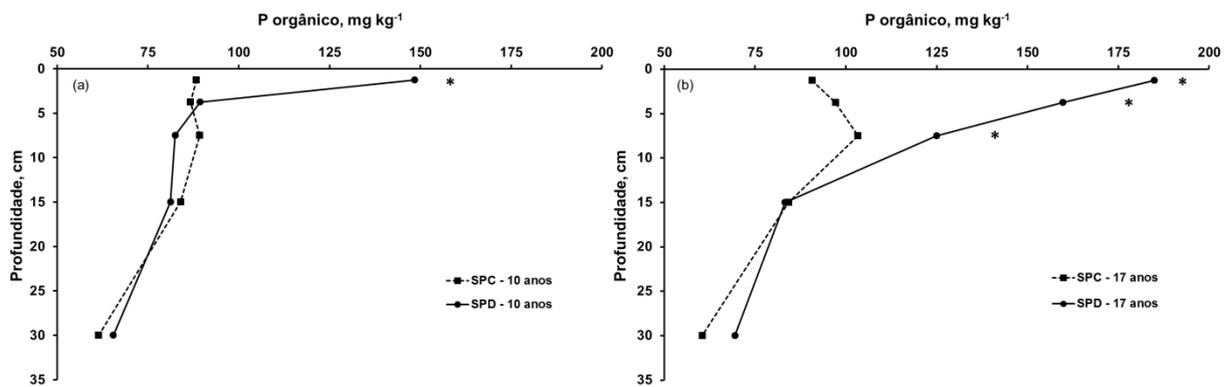
**Figura 4.11.** Distribuição em profundidade do carbono orgânico do solo avaliada aos 8 anos (a), 10 anos (b), 14 anos (c) e 17 anos (d) de cultivo em um Latossolo Vermelho muito argiloso em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD). Valores para cada sistema de manejo de solo correspondem à média dos quatro manejos de adubação fosfatada com três repetições (n = 12). \*, Significativo a 5% pelo teste t.



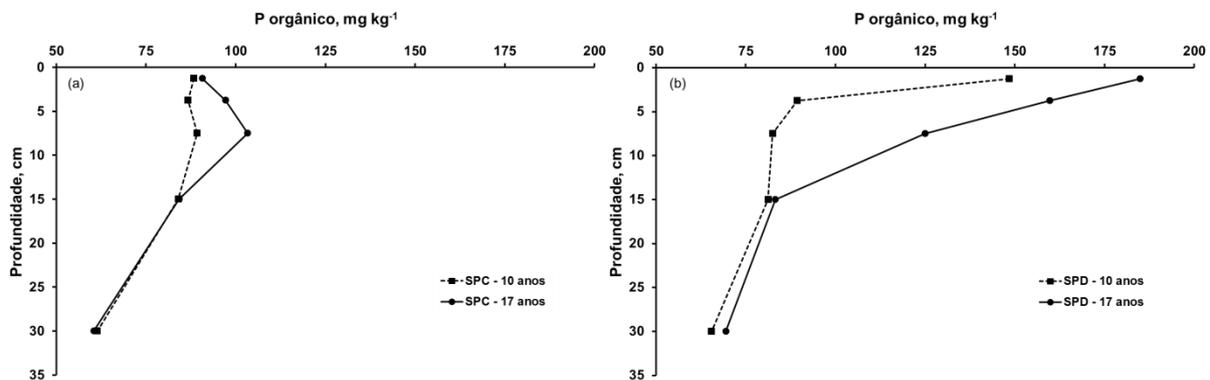
**Figura 4.12.** Evolução da distribuição em profundidade do carbono orgânico do solo em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (a) ou plantio direto (b). Valores para cada sistema de manejo de solo correspondem à média dos quatro manejos de adubação fosfatada com três repetições (n = 12).

Conforme comentado, um dos grandes benefícios do aumento da MOS no SPD está relacionado ao aumento nos teores de Po no solo (Figura 4.13). Por se tratar de uma forma de proteção do P a adsorção às argilas do solo, acredita-se que tenha sido outro grande responsável pelo aumento da eficiência de uso do P no SPD ao longo do tempo. Enquanto após o 10<sup>o</sup> cultivo a relação entre o Po no SPD e SPC era de +68%, +3%, -8% e -3% nas camadas de 0-2,5 cm, 2,5-5,0 cm, 5-10 cm e 10-20 cm, respectivamente (com valores positivos e negativos representando ganhos e perdas do SPD relativas ao SPC) aos 17 anos era de +104%, +64%, +21% e -1% respectivamente para as mesmas camadas. Além disso, entre o 10<sup>o</sup> e 17<sup>o</sup> cultivos o Po aumentou no SPC em 3%, 12%, 16% e 0,3% nas camadas de 0-2,5 cm, 2,5-5,0 cm, 5-10 cm e 10-20 cm, respectivamente, enquanto no SPD os valores foram 25%, 79%, 52% e 3% respectivamente para as mesmas camadas (Figura 4.14), evidenciando ganhos de Po no SPD com o tempo. Na média ponderada das camadas até 20 cm os teores de Po após o 10<sup>o</sup> cultivo eram 86,2 mg kg<sup>-1</sup> e 90,9 mg kg<sup>-1</sup> no SPC e SPD, respectivamente. Após o 17<sup>o</sup> cultivo esses valores eram de 91,4 mg kg<sup>-1</sup> e 115,9 mg kg<sup>-1</sup>. Rheinheimer & Anghinoni (2003), Zamuner et al. (2008) e Tiecher et al. (2012a) também observaram maiores teores de Po no SPD em relação ao SPC.

Desta forma, percebe-se que a partir da introdução do milho e milheto, como planta de cobertura, após o 9<sup>o</sup> cultivo (Tabela 4.2), o maior aporte de biomassa permitiu ao SPD demonstrar seus benefícios, que estavam limitados pelo baixo aporte, apenas com a deposição de biomassa pela soja e vegetação espontânea.



**Figura 4.13.** Distribuição em profundidade do P orgânico do solo avaliada aos 10 anos (a) e 17 anos (b) de cultivo em um Latossolo Vermelho muito argiloso em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD). Valores para cada sistema de manejo de solo correspondem à média dos quatro manejos de adubação fosfatada com três repetições (n = 12). \*, Significativo a 5% pelo teste t.



**Figura 4.14.** Evolução da distribuição em profundidade do P orgânico do solo em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em sistema de preparo convencional (a) ou plantio direto (b). Valores para cada sistema de manejo de solo correspondem à média dos quatro manejos de adubação fosfatada com três repetições (n = 12).

Ao longo dos 17 anos de cultivos o SPD apresentou 10% e 32% maior eficiência de uso do P em relação ao SPC para o FNR e SFT respectivamente (Figura 4.9), indicando a grande capacidade desse sistema em elevar a eficiência do uso do P. Além disso, esses resultados demonstram que a crença comum de que a eficiência de uso do P pelas plantas é baixa, em torno de 10% a 25% (Lindsay, 1979), depende do manejo adotado. No presente estudo, a baixa eficiência de uso do P ocorre na fase de correção do solo em SPC ou SPD (Figura 4.10) ou após a correção com P com monocultivo de soja em SPC (Figura 4.9). Nesse sistema, a constante mobilização do solo expõe o P a novos sítios de adsorção (Sousa & Volkweiss, 1987a), a diluição do P no perfil do solo e a maior oxidação da matéria orgânica do solo resultam numa menor capacidade de suprimento de P às plantas e consequente baixa

eficiência da adubação fosfatada. Por outro lado, no SPD e com adequada rotação de culturas, eficiência próxima a 100% pode ser obtida.

Se considerar que cerca de 37% da área cultivada com grãos na safra 2011/12 ainda foi feita em SPC (FEBRAPDP, 2013), que a cultura da soja responde por 52% da área plantada com grãos na safra 2012/13 (CONAB, 2014) e que a eficiência de uso do P pelos grãos cultivados é em torno de 46% (Sousa et al., 2010), os resultados do presente trabalho revelam o potencial que o País tem em aumentar a eficiência de uso desse recurso natural não renovável através de boas práticas agrícolas.

#### **4.4.3 Balanço de fósforo no solo**

Sistemas inadequados de manejo do solo favorecem a erosão hídrica, perdas de nutrientes e poluição das águas superficiais, acelerando a degradação ambiental. No caso do P, maior atenção deve ser dada, principalmente porque este elemento está entre os mais frequentemente associados à aceleração da eutrofização (Yoo et al., 1988; Levine & Schindler, 1989). Além disso, a despeito das questões ambientais, as perdas de P do solo representam perdas diretas do investimento feito na construção da fertilidade do solo. No presente estudo o elevado acúmulo de P no solo poderia potencializar este efeito (Figura 4.3).

As perdas de P por erosão hídrica são influenciadas pela sua concentração na água e nos sedimentos e pela perda total de água e de sedimentos por erosão (Schick et al., 2000 a,b). Por sua vez, a concentração de P na água e nos sedimentos, varia com sua concentração no solo (Daniel et al., 1994), a qual é influenciada pelo manejo do solo e da adubação.

Como a concentração superficial de P no solo no SPD, especialmente com adubação fosfatada a lanço, é bem maior do que a observada no SPC (Nunes et al., 2011b), perdas por erosão são potencialmente mais prejudiciais naquela condição de manejo. No entanto, apesar das maiores concentrações de P na água e nos sedimentos ocorrerem no SPD (Bertol et al., 2004b), as perdas totais de P nesse sistema conservacionista são menores, em função da menor perda total de água e sedimentos (Hernani et al., 1999; Schick et al., 2000b).

No presente estudo, as menores produtividades de soja e milho e, conseqüentemente, menor eficiência de uso do P no SPC em relação ao SPD poderiam estar relacionadas à própria perda do nutriente por erosão. No entanto, o balanço do P no solo (Tabela 4.5) revela que este efeito tenha ocorrido possivelmente por alterações na natureza do P no solo e não por sua perda.

A saída de P do solo (além das perdas por erosão) é função da produtividade de grãos e do teor de P nos grãos. Conforme observado anteriormente o manejo do solo e da adubação fosfatada promoveu grandes diferenças na produção de grãos de soja e milho ao longo dos 17

anos de cultivos do experimento (Figura 4.2), resultando em diferentes quantidades de P exportado (Tabela 4.5) e, conseqüentemente, diferentes quantidades de P residual no solo (Figura 4.3).

**Tabela 4.5.** Balanço do P em um Latossolo Vermelho argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada

Sistema	Fonte	Modo	P adicionado ao solo <sup>(1)</sup> (A)	P exportado nos grãos <sup>(2)</sup> (B)	Ganhos de P no solo <sup>(3)</sup>		Recuperação	
				kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pt <sub>ign</sub> (C)	Pt <sub>dig</sub> (D)	Pt <sub>ign</sub> (B+C)/A	Pt <sub>dig</sub> (B+D)/A
			----- kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -----				----- % -----	
SPC	SFT	Lanço	1.392	687	255	622	68 c	94 a
		Sulco	1.392	623	310	726	67 c	97 a
	FNR	Lanço	1.392	680	221	639	65 c	95 a
		Sulco	1.392	615	393	691	73 c	94 a
SPD	SFT	Lanço	1.392	882	454	535	96 ab	102 a
		Sulco	1.392	843	418	557	91 b	101 a
	FNR	Lanço	1.392	720	686	704	101 a	102 a
		Sulco	1.392	701	554	639	90 b	96 a

<sup>(1)</sup> Adubação fosfatada + gesso agrícola (0,5% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Mg<sup>-1</sup>); <sup>(2)</sup> Produção de grãos x teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, para cada ano;

<sup>(3)</sup> Valores correspondem à diferença entre o estoque na camada de 0-40 cm em cada tratamento e área referência de cerrado contigua ao experimento, avaliados por ignição seguida de extração com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2 mol L<sup>-1</sup> a frio (Pt<sub>ign</sub>) e digestão com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + MgCl<sub>2</sub> em bloco (Pt<sub>dig</sub>).

A tentativa de acesso do P residual no solo pela extração ácida após ignição resultou, em média, num balanço de 67% de recuperação do P aplicado no SPC, sem qualquer diferença entre os manejos de adubação. A maior exportação de P nos grãos quando a adubação foi realizada a lanço no SPC, em relação à adubação no sulco neste mesmo sistema (Tabela 4.5) ocorreu devido ao maior volume de solo fertilizado resultando em maior produção de grãos e eficiência de uso do P (Figura 4.7). Isso proporcionou menor quantidade de P no solo, fato que foi percebido pelo Pt<sub>ign</sub>, resultando num balanço semelhante entre os manejos de adubação fosfatada no SPC. Por outro lado, no SPD o balanço de P avaliado pelo Pt<sub>ign</sub> resultou em média 95% de recuperação do P aplicado, com diferenças entre os manejos de adubação fosfatada. Neste sistema, a maior produção de grãos e eficiência de uso do P para o SFT (Figura 4.7) proporcionou menor quantidade de P no solo em relação ao FNR, e que foi percebida pelo Pt<sub>ign</sub>. No entanto, houve subestimação do P no solo quando a aplicação do SFT e FNR foi realizada no sulco, apresentando menor recuperação do P em relação à aplicação a lanço.

Uma vez que o Pt<sub>ign</sub> não promove extração completa do P do solo, o mesmo balanço foi realizado utilizando o Pt<sub>dig</sub>, metodologia capaz de extrair totalmente o P do solo (Hedley et al., 1982). Com este método, o balanço de P resultou em média 95% de recuperação do P

aplicado no SPC e 100% para o SPD, sem qualquer diferença ( $p > 0,05$ ) entre os dois sistemas ou manejos de adubação fosfatada.

Percebe-se que praticamente todo o P aplicado ao solo ao longo dos 17 anos e que não foi exportado nos grãos ainda se encontra no solo, nos dois sistemas, descartando a possibilidade de perdas por erosão, possivelmente pela baixa de declividade na área. Além disso, a semelhança no balanço dos dois métodos para o SPD sugere que o P neste sistema encontra-se em formas químicas capazes de serem absorvidas pelas plantas e o restante acessado pelo  $P_{t_{ign}}$ , enquanto no SPC cerca de 28% do P aplicado ao solo ao longo dos 17 anos de cultivos estava em formas químicas além da capacidade de absorção pelas plantas e extração pelo  $P_{t_{ign}}$ , sendo acessadas somente pelo  $P_{t_{dig}}$ . Isso indica acúmulo de P em formas mais lábeis no sistema conservacionista. Esses fatos serão mais bem estudados no Capítulo 2.

#### 4.5. CONCLUSÕES

1. Em área de disponibilidade muito baixa de fósforo, a produtividade e a eficiência de uso desse nutriente pela soja são afetadas pelo modo de aplicação apenas durante a fase de correção gradual, com maiores produtividades e eficiência de uso do fósforo com aplicação a lanço no sistema de preparo convencional e no sulco no plantio direto. Após o solo estar corrigido com fósforo, não há influência do modo de aplicação.

2. No sistema plantio direto, a produtividade de grãos e a eficiência de uso do fósforo pela soja e milho são maiores com o superfosfato triplo em relação ao fosfato natural reativo. No sistema de preparo convencional o comportamento das duas fontes é semelhante.

3. A produtividade de grãos e a eficiência de uso do fósforo pela soja são maiores no sistema de preparo convencional durante a fase de correção gradual e maiores no plantio direto, para a soja e milho, após o solo estar corrigido com fósforo.

4. No plantio direto, a produtividade e eficiência de uso do fósforo pela soja aumentam ao longo do tempo. Enquanto no preparo convencional a eficiência de uso do fósforo atinge um máximo de 30% a 40%, no SPD chega a 50% a 60%, para a dose de  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

5. Ao longo do tempo, há maior acúmulo de matéria orgânica do solo e fósforo orgânico no sistema plantio direto em relação ao preparo convencional, especialmente em camadas superficiais.

6. A eficiência de uso do fósforo aumenta com a participação do milho no esquema de rotação de culturas.

7. Não houve perdas de fósforo no solo ao longo dos 17 anos de cultivos e o fósforo que não foi extraído por meio dos cultivos encontra-se em formas de maior labilidade no solo no plantio direto em relação ao preparo convencional.

## 5. CAPÍTULO 2

### DISTRIBUIÇÃO DAS FRAÇÕES DO FÓSFORO DO SOLO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO

#### 5.1. RESUMO

Sempre que a eficiência de uso do fósforo for inferior a 100% haverá acúmulo do nutriente no solo. No entanto, as formas de acúmulo dependerão das práticas de manejo adotadas e o melhor entendimento desse processo só pode ser obtido em experimentos de longa duração. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do sistema de manejo do solo e da adubação fosfatada por um longo período nas frações do fósforo no solo. O experimento foi conduzido em Latossolo Vermelho muito argiloso com disponibilidade inicial de P muito baixa, sendo cultivado por 17 anos com as culturas de soja e milho recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  em dois manejos de solo (sistema de preparo convencional ou plantio direto) e em quatro manejos de adubação fosfatada (superfosfato triplo ou fosfato natural reativo, com aplicação no sulco de semeadura ou a lanço na superfície). Após 17 anos de cultivos foi realizada amostragem de solo em profundidade, avaliando-se os teores de fósforo total e frações inorgânicas e orgânicas pelo fracionamento sequencial. Mesmo procedimento foi realizado em área de cerrado localizada próxima ao experimento. Enquanto o revolvimento do solo no sistema de preparo convencional proporcionou distribuição mais homogênea das frações de fósforo inorgânico no perfil, no plantio direto houve acentuado gradiente em profundidade, com acúmulo na zona de aplicação do fertilizante. Isso ocorreu especialmente nas frações cujos teores são originalmente baixos no solo e que estão diretamente relacionadas ao grau de solubilização do fertilizante, como o fósforo inorgânico extraído por  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  e extraído por  $\text{HCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ . O plantio direto promoveu maior acúmulo de fósforo inorgânico no solo em frações mais lábeis e maior acúmulo de fósforo orgânico no solo na fração associada à proteção física por agregados, ambos em relação ao preparo convencional. No plantio direto adubado com fosfato natural reativo houve maior acúmulo de formas de fósforo inorgânico associadas à presença de fertilizante não solubilizado, bem como de formas adsorvidas com menor labilidade, em relação ao superfosfato triplo, especialmente com aplicação a lanço. O manejo do solo em sistema de preparo convencional e plantio direto, com elevado aporte de fósforo e resíduos vegetais, resultaram no acúmulo de fósforo orgânico até 20 cm e até 10 cm de profundidade, respectivamente, em relação ao cerrado.

## 5.2. INTRODUÇÃO

Os solos do Cerrado originalmente apresentam baixa disponibilidade de fósforo (P) para o cultivo agrícola tornando necessária a adição de fertilizantes fosfatados ao solo, primeiramente, para elevar esse nível de disponibilidade a valores aceitáveis antes de iniciar o sistema produtivo e, em seguida, para mantê-la ao longo das safras agrícolas por meio de adições periódicas que reponham o P que foi retirado por ocasião das colheitas.

No entanto, os solos dessa região apresentam alta capacidade de retenção de P na fase sólida, devido ao alto conteúdo de óxidos de ferro e alumínio, capazes de reter íons fosfato em formas de baixa labilidade (Novais et al., 2007). Isso resulta num requerimento de grandes aportes de P, especialmente no estabelecimento do sistema produtivo, visando compensar a capacidade drenagem do solo que é bem maior do que a da planta (Novais et al., 2007) e resultando num acúmulo de P no solo. Esse acúmulo pode se tornar maior ainda quando se adota sistemas de produção com baixa eficiência de uso do P, seja pelo uso de adubações excessivas ou pela ausência de boas práticas agrícolas, como ocorre em sistemas com monocultivo de soja, preparo convencional e ausência de plantas de cobertura (Sousa et al., 2010).

Ao ser aplicado, o fertilizante fosfatado reage liberando P inorgânico (Pi) para a solução do solo, podendo ser adsorvido aos colóides, bem como precipitado em formas de baixa solubilidade em água (Lindsay et al., 1962; Sousa & Volkweiss, 1987b). Além disso, o Pi absorvido pela planta ou microorganismos pode retornar ao solo na forma de P orgânico (Po) através de exsudados radiculares ou microbianos, resíduos vegetais da parte aérea e raízes e restos da microbiota, compondo moléculas de diferentes naturezas químicas (Magid et al., 1996; Bunemann et al., 2008; Noack et al., 2014), sofrendo também processos de adsorção, complexação, precipitação e incorporação nas substâncias húmicas do solo (Celi & Barberis, 2005). Paralelamente, o processo de mineralização da MOS converte Po em Pi.

Todas essas reações de transformação do P são dinâmicas e interdependentes e definem as suas formas de acúmulo no solo, sendo influenciadas por diversos fatores relacionados ao clima, solo e manejo. No que se refere ao clima, os principais fatores são aqueles que afetam a dinâmica de solubilização do fertilizante e mineralização da MOS, como o regime hídrico e a temperatura (Sharpley, 1985). No que se refere ao solo, a mineralogia e a textura definem as formas químicas de reação do P do fertilizante bem como sua intensidade de acúmulo (Sharpley, 1985; Huffman et al., 1996; Rheinheimer & Anghinoni, 2001, 2003; Pavinato et al., 2009). No que depende do manejo, a natureza química e física do fertilizante aplicado, o grau de contato deste com o solo, a dose aplicada e o aporte de biomassa vegetal

apresentam influência preponderante (Zheng et al., 2001; Zhang et al., 2004; Gatiboni et al., 2007; Santos et al., 2008; Tiecher et al., 2012 a,b).

O pouco distúrbio do solo no sistema plantio direto (SPD) provoca acúmulo de nutrientes, especialmente os de baixa mobilidade como o P, resíduos de fertilizantes e corretivos não reagidos bem como MOS nas camadas superficiais (Selles et al., 1997; De Maria et al., 1999; Santos & Tomm, 2003). Esse fenômeno é intensificado quando, nesse sistema, o fertilizante fosfatado é aplicado a lanço e em fontes de solubilização lenta, como os fosfatos naturais reativos (FNR) (Nunes et al., 2011b). Por outro lado, o revolvimento anual no sistema de preparo convencional (SPC) resulta em homogeneização dos teores de P e MOS (Selles et al., 1997; De Maria et al., 1999; Santos & Tomm, 2003), exposição do P a novos sítios de adsorção (Sousa & Volkweiss, 1987a) e acelera a reação de fertilizantes e corretivos (Miranda et al., 2005), bem como a mineralização da MOS (Nunes et al., 2011a).

O estudo das formas químicas inorgânicas e orgânicas de P é possível através do fracionamento químico sequencial (Hedley et al., 1982). Neste procedimento, o P do solo é submetido a extrações sucessivas com soluções de crescente poder de extração. De acordo com a ordem na sequência de extração e natureza química do extrator utilizado, cada fração de P apresenta uma referência a alguma forma química do P do solo (Hedley et al., 1982; Cross & Schlesinger, 1995), resultando em estimativas de labilidade do P extraído. Desta forma, é possível determinar como o manejo adotado influencia nas transformações do P no solo. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do sistema de manejo do solo e da adubação fosfatada por 17 anos nas frações de acúmulo de P no solo e identificar o manejo que favorece a manutenção do P em formas de maior labilidade.

### **5.3. MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi realizado na área experimental do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), em Planaltina, DF (latitude 15°36'06"S e longitude 47°42'26"W), com 1.014 m de altitude e clima Cwa (de acordo com a classificação de Köppen). Este corresponde a um típico clima de savana, com precipitação média anual de 1.570 mm e duas estações bem definidas: seca (maio a setembro) e chuvosa (outubro a abril). As médias de temperaturas máxima e mínima são 26,4°C e 15,9°C, respectivamente.

O relevo caracteriza-se como suave ondulado e a fitofisionomia original é o Cerrado sentido restrito. O solo é classificado como um Latossolo Vermelho distrófico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Embrapa, 2013), Rhodic Haplustox, de acordo com a classificação americana (Soil Survey Staff, 2010), ou Rhodic Ferralsol, de acordo com a classificação da FAO (IUSS Working Group WRB, 2006), tendo o metarritmito argiloso

como material de origem (Freitas-Silva & Campos, 1999) e com textura e mineralogia apresentadas na Tabela 5.1.

A área experimental foi desmatada em 1976, permanecendo sem uso até 1985, quando se procedeu o preparo do solo, análise química segundo Embrapa (2005) (Tabela 5.2) e aplicação de calcário dolomítico para elevar a 50% a saturação por bases. Cultivou-se mucuna-preta (*Mucuna aterrimum*), guandu (*Cajanus cajan*) e crotalária (*Crotalaria juncea*) nas safras 1985/86, 1986/87, 1987/88, respectivamente, sendo que após esse período a área permaneceu com vegetação espontânea até 1994, quando se estabeleceu o experimento.

Antes do primeiro cultivo foi realizada nova análise química de solo segundo Embrapa (2005) (Tabela 5.2), seguida da aplicação a lanço com incorporação de calcário dolomítico, para elevar a 50% a saturação por bases, gesso, potássio, enxofre e micronutrientes, segundo recomendações de Sousa & Lobato (2004), mas sem adubação corretiva com P. Por ocasião da instalação do experimento, em setembro de 1994, o teor de P extraível por Mehlich-1 na camada de 0-20 cm era de 1,0 mg dm<sup>-3</sup>, considerado muito baixo segundo Sousa et al. (2004).

**Tabela 5.1.** Textura e mineralogia do solo na camada de 40-60 cm antes da implantação do experimento

Textura <sup>(1)</sup>			Mineralogia da fração argila <sup>(2)</sup>				
Areia	Silte	Argila	Caulinita	Gibsitita	Goethita	Hematita	Anatase
----- g kg <sup>-1</sup> -----							
270	90	640	634	195	61	108	17

<sup>(1)</sup> Método da pipeta (Embrapa, 2005). <sup>(2)</sup> Calculado a partir dos teores de Si, Al, Fe e Ti após digestão da argila com ácido fluorídrico em microondas (Rein, 2008).

**Tabela 5.2.** Análise química do solo na camada de 0-20 cm em dois momentos antes da implantação do experimento

Ano	pH <sup>(1)</sup>	Ca <sup>2+</sup> <sup>(2)</sup>	Mg <sup>2+</sup> <sup>(2)</sup>	K <sup>+</sup> <sup>(3)</sup>	H+Al <sup>(4)</sup>	Al <sup>3+</sup> <sup>(2)</sup>	CTC	P <sup>(3)</sup>	V	MO
		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----						mg dm <sup>-3</sup>	%	g kg <sup>-1</sup>
1985	4,5	0,82	0,20	0,10	9,13	1,40	10,25	0,9	10,9	17,0
1994	5,4	2,41	2,01	0,11	5,27	0,08	9,80	1,0	46,2	16,2

<sup>(1)</sup> Em água, relação solo:solução de 1:2,5; <sup>(2)</sup> Extração com KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; <sup>(3)</sup> Mehlich-1; <sup>(4)</sup> Extração com acetato de cálcio 1 mol L<sup>-1</sup> em pH 7,0. CTC: Somatório de bases (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>) e H+Al. V: Saturação por bases na CTC. MO: Matéria orgânica facilmente oxidável obtida por oxidação úmida na presença de dicromato de potássio.

Durante os cultivos foram efetuadas adubações anuais de manutenção, a lanço, com 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na forma de cloreto de potássio, 30 kg ha<sup>-1</sup> de S na forma de gesso, além de, para o milho, 30 kg ha<sup>-1</sup> de N no sulco de semeadura e duas coberturas de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N na

forma de uréia, segundo Sousa & Lobato (2004). A adubação anual com P foi realizada de acordo com cada tratamento. Foi reaplicado calcário após o 6° e o 15° cultivos, de acordo com análise de solo, visando elevar a 50% a saturação por bases, com incorporação no SPC e sem incorporação no SPD. A cultura da soja (*Glycine max*), com espaçamento entre linhas de 0,50 m, foi cultivada nos nove primeiros anos, o milho (*Zea mays*), com espaçamento entre linhas de 0,80 m, foi cultivado no 10° e 11° anos e, nos seguintes, houve a rotação entre soja e milho. Os cultivos de soja e milho receberam irrigação suplementar por aspersão em situações de seca durante a estação chuvosa (fenômeno comum na região e denominado “veranico”). A irrigação era definida com base em tensiômetros instalados nas parcelas a 20 cm de profundidade, quando estes apresentavam leitura de tensão maior que 45 kPa. O milheto (*Pennisetum glaucum*), com espaçamento entre linhas de 0,20 m, foi utilizado como cobertura no inverno após o nono cultivo, sendo semeado após a colheita da soja ou milho, recebendo irrigação suplementar para desenvolvimento sem limitação de água, roçado no início da maturação fisiológica e adubado, desde o 14° ano, com 45 kg ha<sup>-1</sup> de N (uréia) visando maior produção de biomassa.

Do experimento com 20 tratamentos foram utilizados no presente estudo oito tratamentos envolvendo manejo do solo e da adubação fosfatada: cultivo no SPC, constituído de uma aração até 20 cm de profundidade com arado de discos e uma grade niveladora antes do plantio da cultura de verão, ou SPD, adubados com fosfato natural reativo de Gafsa (FNR) ou superfosfato triplo (SFT), aplicados no sulco de semeadura (S) ou a lanço na superfície (L), na dose de 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. A Tabela 5.3 apresenta as características dos fertilizantes utilizados no experimento.

**Tabela 5.3.** Características dos fertilizantes fosfatados utilizados no experimento

Fonte de fósforo	Característica <sup>(1)</sup>				
	Granulometria	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	Solubilidade em relação ao P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	
				Ac. cítrico 2% (1:100)	Ac. fórmico 2% (1:100)
				% -----	
SFT	Granulado	13	47,6	92	88
FNR	Farelado	37	28,2	44	74

<sup>(1)</sup> Análises efetuadas com amostras moídas (< 0,063 mm).

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso com parcelas divididas com os sistemas de manejo do solo (SPC e SPD) nas parcelas e nas sub-parcelas as fontes de P (FNR e SFT) e os modos de aplicação (S e L), distribuídos aleatoriamente dentro de cada uma delas, com três repetições. As dimensões das parcelas eram de 16 m x 8 m e das sub-

parcelas experimentais eram de 8 m x 4 m (32 m<sup>2</sup> de área). A área útil de colheita consistiu de 15 m<sup>2</sup> para a soja e 12 m<sup>2</sup> para o milho, localizados na porção central das sub-parcelas. A colheita de soja e milho foi feita manualmente e os resíduos vegetais picados e devolvidos a cada parcela.

A amostragem de solo foi realizada após o 17º cultivo (milho) nas camadas de 0-2,5 cm, 2,5-5 cm e 5-10 cm, com trado para amostra indeformada de 5 cm de diâmetro, e nas camadas de 10-20 cm e 20-30 cm, com trado holandês com 5 cm de diâmetro, sendo uma amostra composta por cada parcela do experimento. Para os tratamentos de adubação a lanço foram tomadas 20 sub-amostras para cada amostra composta coletadas aleatoriamente na área útil das parcelas. Para os tratamentos de adubação no sulco, cada amostra composta foi formada por sub-amostras dirigidas, seguindo a proposta apresentada por Nicolodi et al. (2002) e CQFS-RS/SC (2004), que utilizam tradagem em substituição a pá de corte. Deste modo, escolheram-se 6 locais dentro de cada parcela e em cada local coletaram-se 7 sub-amostras perpendiculares a linha da cultura e equidistantes, compreendidas entre duas entre-linhas sendo uma na linha. Foi realizada amostragem em área de cerrado nativo distante 50 m do experimento nas mesmas camadas, coletando-se 3 amostras compostas formadas por 20 sub-amostras cada, coletadas aleatoriamente. Depois de coletadas, as amostras foram secas ao ar, maceradas e passadas em peneira de 1 mm.

O P total por digestão ácida ( $P_{t_{dig}}$ ) foi obtido pela digestão com  $H_2SO_4 + H_2O_2 + MgCl_2$  (Brookes & Powlson, 1981; Hedley et al., 1982).

O fracionamento químico do P foi realizado a partir de modificação ao procedimento originalmente proposto por Hedley et al., (1982), descrito a seguir. Amostras de 1,5 g de solo foram submetidas à extração, sequencialmente, com  $NaHCO_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup>, NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>. Após essas extrações, o solo remanescente foi seco em estufa (40° C), sendo uma parte submetida à digestão com  $H_2SO_4 + H_2O_2 + MgCl_2$  (Brookes & Powlson, 1981; Hedley et al., 1982), para obtenção do Pt residual ( $P_{t_{res}}$ ). Para a obtenção do Po residual ( $P_{o_{res}}$ ) o solo remanescente do fracionamento foi submetido a uma extração com  $H_2SO_4$  2,0 mol L<sup>-1</sup> (relação solo:extrator de 1:8) por 16 horas, tendo uma sub-amostra sido ignificada a 550° C por 1,5 hora e outra sub-amostra não ignificada, sendo o  $P_{o_{res}}$  obtido pela diferença entre os teores da amostra ignificada e não ignificada (Hance & Anderson, 1962; Olsen & Sommers, 1982). O Pi residual ( $P_{i_{res}}$ ) foi obtido pela diferença entre  $P_{t_{res}}$  e  $P_{o_{res}}$ .

Nos extratos alcalinos do fracionamento, o Pi foi obtido por acidificação do extrato e centrifugação, visando à precipitação de compostos orgânicos (Tiessen & Moir, 2008) e determinados por espectrofotometria a 820 nm (Murphy & Riley, 1962), enquanto o P total

foi obtido por digestão do extrato com  $\text{H}_2\text{SO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  em autoclave (103,4 kPa, 121° C, 2 h) (USEPA, 1971) e determinação por espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP/AES). O  $P_o$  desses extratos foi calculado pela diferença entre  $P$  total e  $P_i$ . O  $P_i$  dos extratos ácidos foi obtido por espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP/AES).

Neste estudo, as frações de  $P$  foram classificadas em três grupos: (1)  $P$  lábil, composto pelo  $P_i$  e  $P_o$  extraído por  $\text{NaHCO}_3$  mol  $\text{L}^{-1}$ ; (2)  $P$  moderadamente lábil, composto pelo  $P_i$  e  $P_o$  extraído por  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  e 0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  e  $P_i$  extraído por  $\text{HCl}$  1,0 mol  $\text{L}^{-1}$ ; e (3)  $P$  pouco lábil, composto pelo  $P_i$  e  $P_o$  residuais. Além disso, as frações de  $P$  determinadas no fracionamento foram agrupadas em  $P$  geoquímico ( $P_{\text{geo}}$ ) e biológico ( $P_{\text{bio}}$ ), de acordo com o proposto por Cross & Schlesinger (1995), sendo o primeiro obtido pela soma de todas as frações de  $P_i$  e o segundo pela soma de todas as frações de  $P_o$ . A soma de todas as frações de  $P_i$  e  $P_o$  foi denominada  $P_{\Sigma\text{frac}}$ .

Para a análise de variância dos teores de  $P$  em profundidade no solo foi utilizado o seguinte modelo:

$$Y_{ijklm} = \mu + B_i + S_j + \text{erro}(ij) + F_k + M_l + FM_{kl} + SF_{jk} + SM_{jl} + SFM_{jkl} + \text{erro}(ijkl) + C_m + SC_{jm} + FC_{km} + MC_{lm} + FMC_{klm} + SFC_{jkm} + SMC_{jlm} + SFMC_{jklm} + \text{erro}(ijklm),$$

onde:  $\mu$  = média geral dos dados;  $B$  = bloco ( $i = 1,2,3$ );  $S$  = Sistema de preparo ( $j = 1,2$ );  $F$  = Fonte de fósforo ( $k = 1,2$ );  $M$  = Modo de aplicação ( $l = 1,2$ );  $C$  = camada ( $m = 1,2,3,4,5$ ); Erro = erro experimental.

Análise de variância foi realizada com o PROC MIXED do SAS e quando esta apresentou significância o teste de Student (t) ( $p < 0,05$ ) foi utilizado para distinção das médias.

## 5.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.4.1 Análise de variância

Análise de variância (Tabela 5.4) demonstrou que as frações inorgânicas foram mais influenciadas pelos tratamentos e suas interações do que as frações orgânicas enquanto as frações de  $P$  residual foram menos influenciadas que as demais. Além disso, interagindo com a camada, observou-se o sistema de manejo do solo, a fonte do fertilizante fosfatado e o modo de aplicação influenciando as frações de  $P$  nesta sequência de importância.

**Tabela 5.4.** Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações, como resultado da análise de variância, para as diversas frações de P

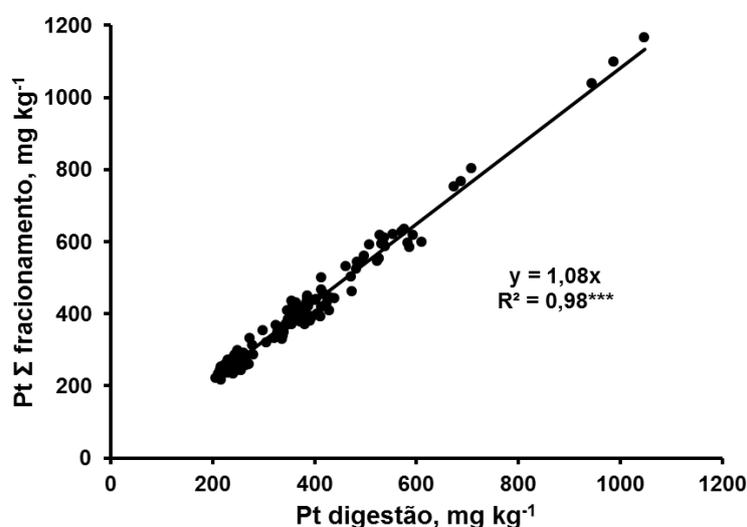
Efeito	NaHCO <sub>3</sub> 0,5 mol L <sup>-1</sup>		NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup>		HCl 1 mol L <sup>-1</sup>	NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup>		Residual		P <sub>geo</sub>	P <sub>bio</sub>	Pt <sub>Σfrac</sub>
	Pi	Po	Pi	Po		Pi	Po	Pi	Po			
	<b>Significância de F</b>											
<b>Sist</b>	***	***	***	**	*	***	***	ns	***	***	*	***
<b>Fonte</b>	***	*	***	***	***	***	***	ns	*	**	*	ns
<b>Modo</b>	ns	ns	**	ns	***	ns	ns	ns	ns	***	ns	***
<b>Fonte vs Modo</b>	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns	**	ns	*
<b>Sist vs Fonte</b>	***	ns	***	**	***	***	***	**	**	***	*	*
<b>Sist vs Modo</b>	***	ns	***	ns	***	***	**	ns	ns	***	*	***
<b>Sist vs Fonte vs Modo</b>	***	ns	***	ns	***	***	ns	ns	ns	***	ns	*
<b>Camada</b>	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
<b>Sist vs Camada</b>	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
<b>Fonte vs Camada</b>	***	*	***	**	***	***	***	ns	*	***	ns	***
<b>Modo vs Camada</b>	***	*	***	ns	***	***	ns	**	ns	***	ns	***
<b>Fonte vs Modo vs Camada</b>	***	ns	***	ns	***	***	ns	ns	***	***	ns	**
<b>Sist vs Fonte vs Camada</b>	***	ns	***	*	***	***	***	*	*	***	ns	***
<b>Sist vs Modo vs Camada</b>	***	ns	***	ns	***	***	ns	**	ns	***	ns	***
<b>Sist vs Fonte vs Modo vs Camada</b>	**	ns	***	ns	***	***	ns	ns	ns	***	*	***

ns, não significativo; \*, \*\* e \*\*\*, significativos a P < 0,05, 0,01 e 0,001 respectivamente. P<sub>geo</sub>, P<sub>bio</sub> e Pt<sub>Σfrac</sub>: Somatório das frações de P inorgânico, orgânico e inorgânico + orgânico, respectivamente.

A interação dos manejos de adubação fosfatada com o sistema de manejo do solo se justifica uma vez que SPC e SPD proporcionam diferentes graus de contato do fertilizante com o solo, modificando a dinâmica de solubilização do fertilizante, especialmente os de solubilização lenta, como FNR, que necessita de maior tempo e superfície de contato com o solo para reagir (Novais et al., 2007). Além disso, a localização do fertilizante promovida pelo modo de aplicação, como ocorre com a aplicação no sulco, pode ser mantida ou não, de acordo com o manejo do solo.

#### 5.4.2 Recuperação do fósforo total pelo fracionamento sequencial

Durante as diversas extrações de P no fracionamento sequencial pode haver perdas de solo, resultando num menor poder de recuperação do P total. No entanto, neste trabalho com a técnica de fracionamento químico do P empregada, o somatório de todas as frações recuperou entre 95% e 122% do  $P_{t\text{digest}}$ , com uma média de 108% (Figura 5.1), valores que podem ser considerados satisfatórios.



**Figura 5.1.** Relação entre o somatório das frações de P ( $P_t \Sigma$  fracionamento) e o P total obtido por digestão do solo ( $P_t$  digestão) para um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo (SPD e SPC) e adubação fosfatada (SFT, FNR, Lanço, Sulco) e no cerrado nativo, em 5 camadas, com três repetições ( $n = 135$ ). \*\*\* significativo a 0,1% pelo teste F.

#### 5.4.3 Distribuição das frações de fósforo no solo

As reações de transformação do P no solo são dinâmicas e complexas e, nesse processo, existe grande interdependência entre as diferentes frações. O aporte de P numa determinada camada do solo, pela aplicação de fertilizante ou pela deposição de resíduos

vegetais, num primeiro momento provoca incremento em alguma fração específica, dependendo da natureza do material, mas com o passar do tempo novas reações ocorrem, com impacto em outras frações do P do solo. Da mesma forma, a absorção de P provoca redução, numa determinada fração do Pi num primeiro momento, mas que é repostada por outras frações tanto inorgânicas como orgânicas.

Em virtude disso, neste trabalho, os resultados do fracionamento do P no solo serão apresentados na sequência de extração (Tabelas 5.5 a 5.9 e Figuras 5.2 a 5.6), cada extrator separadamente e sem discussões específicas para cada um. Ao final da apresentação desses resultados, todas as frações em conjunto serão apresentadas (Figura 5.7) e então serão feitas discussões referentes à influência do manejo do solo e da adubação fosfatada na dinâmica e distribuição das frações de P no solo. Desta forma, espera-se que a compreensão dos fenômenos que influenciam cada fração fique mais clara.

#### **5.4.3.1 Frações de P lábil**

As primeiras frações de P foram extraídas por  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , tanto na forma inorgânica ( $\text{Pi}_{\text{bic}}$ ) como orgânica ( $\text{Po}_{\text{bic}}$ ) e são consideradas biodisponíveis no solo (Cross & Schlesinger, 1995), compondo o P lábil em todas as propostas de classificação por labilidade do fracionamento químico do P. Enquanto o  $\text{Pi}_{\text{bic}}$  está relacionado com Pi fracamente adsorvido a óxidos de Fe e Al e argilominerais, possivelmente formando complexos de esfera externa e complexos de esfera interna mais fracamente adsorvidos, como as ligações monodentadas (Parfitt, 1978; Meurer et al., 2004), o  $\text{Po}_{\text{bic}}$  está relacionado com Po de fácil degradação no solo, como ácidos ribonucleicos e glicerolfosfatos (Bowman & Cole, 1978). Além disso, esse extrator é utilizado em muitos países na estimativa da disponibilidade de P no solo (Olsen & Sommers, 1982), tal como Mehlich-1 e Resina são no Brasil. Os efeitos do manejo do solo e da adubação nas frações  $\text{Pi}_{\text{bic}}$  e  $\text{Po}_{\text{bic}}$  são apresentados na Tabela 5.5.

No SPC, na maioria das camadas avaliadas os teores de  $\text{Pi}_{\text{bic}}$  foram semelhantes para os diferentes manejos da adubação fosfatada. A exceção ocorreu nas camadas de 2,5-5 cm e 5-10 cm com o SFT aplicado no sulco, cujos teores foram maiores que os demais tratamentos. Por sua vez, no SPD a aplicação de SFT a lanço proporcionou maiores teores de  $\text{Pi}_{\text{bic}}$  na camada de 0-2,5 cm em relação a aplicação no sulco, enquanto a aplicação do SFT no sulco proporcionou maiores teores na camada de 5-10 cm em relação ao SFT aplicado a lanço. Quando a fonte utilizada foi o FNR não se observou diferenças nos modos de aplicação. Além disso, nas camadas até 5 cm de profundidade para os dois modos de aplicação e na camada de 5-10 cm para a aplicação no sulco, o SFT apresentou maiores teores de  $\text{Pi}_{\text{bic}}$  em relação ao FNR.

**Tabela 5.5.** P inorgânico e orgânico da fração  $\text{NaHCO}_3$  em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação

Camada	Manejo do solo	Manejo da adubação fosfatada			
		SFT Lanço	SFT Sulco	FNR Lanço	FNR Sulco
cm		----- Pi $\text{NaHCO}_3$ , mg $\text{kg}^{-1}$ -----			
0-2,5	SPC	7,5 Ba	8,8 Ba	7,1 Ba	7,1 Aa
	SPD	35,9 Aa	14,5 Ab	13,7 Abc	10,5 Ac
2,5-5	SPC	6,6 Bb	13,3 Aa	6,2 Ab	5,8 Ab
	SPD	13,2 Aa	12,9 Aa	7,9 Ab	5,6 Ab
5-10	SPC	6,9 Ab	12,5 Aa	5,4 Ab	6,6 Ab
	SPD	5,0 Ab	10,3 Aa	3,2 Ab	2,4 Bb
10-20	SPC	4,0 Aa	4,6 Aa	4,4 Aa	3,0 Ab
	SPD	1,2 Ba	2,4 Ba	0,9 Ba	1,0 Ba
20-30	SPC	0,5 Aa	1,5 Aa	1,0 Aa	1,6 Aa
	SPD	1,2 Aa	0,6 Aa	0,3 Aa	0,6 Aa
		----- Po $\text{NaHCO}_3$ , mg $\text{kg}^{-1}$ -----			
0-2,5	SPC	10,6 Ba	10,3 Ba	9,8 Ba	10,5 Ba
	SPD	13,2 Aa	13,3 Aa	14,1 Aa	13,5 Aa
2,5-5	SPC	10,7 Ba	9,9 Ba	9,8 Ba	9,4 Ba
	SPD	15,3 Aa	12,2 Ab	12,2 Ab	12,3 Ab
5-10	SPC	10,4 Aa	9,3 Ba	9,9 Aa	9,1 Ba
	SPD	11,5 Aa	11,3 Aa	9,3 Ab	10,5 Aab
10-20	SPC	9,1 Aa	9,5 Aa	9,2 Aa	9,7 Aa
	SPD	7,1 Ba	7,3 Ba	7,0 Aa	7,1 Ba
20-30	SPC	6,4 Aa	6,5 Aa	5,8 Aa	5,3 Aa
	SPD	5,3 Aa	6,1 Aa	5,5 Aa	5,4 Aa

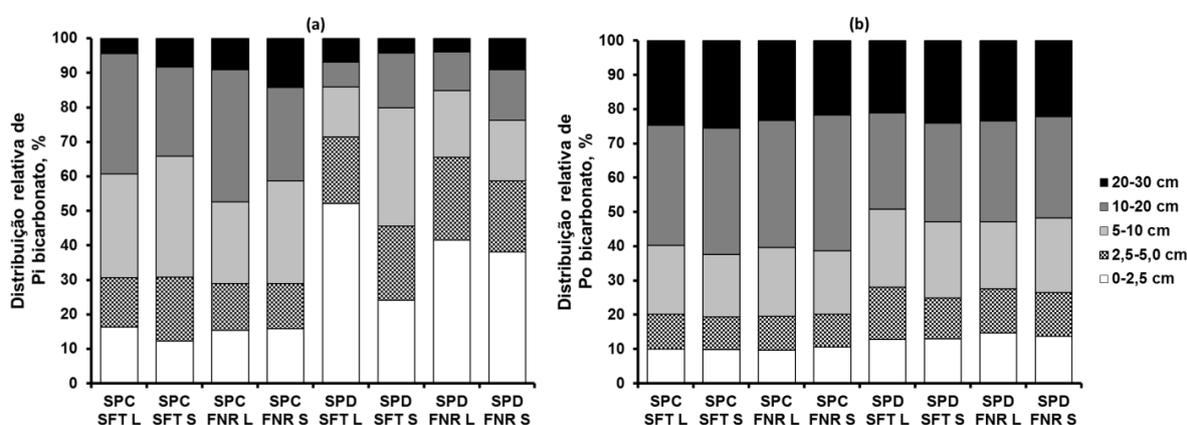
Médias seguidas de letras iguais maiúsculas na coluna, para cada camada, comparando os sistemas de manejo de solo dentro de cada manejo da adubação fosfatada e médias seguidas de letras iguais minúsculas na linha, para cada camada, comparando manejo da adubação fosfatada dentro de cada sistema de manejo de solo, não diferem entre si pelo teste t ( $p > 0,05$ ).

O SPD proporcionou maiores teores de  $\text{Pi}_{\text{bic}}$  em relação ao SPC na camada de 0-2,5 cm em quase todos os manejos de adubação, com exceção para o FNR aplicado no sulco. Por sua vez a aplicação de SFT a lanço resultou em maiores teores de  $\text{Pi}_{\text{bic}}$  também na camada de 2,5-5 cm. Por outro lado, o SPC proporcionou maiores teores de  $\text{Pi}_{\text{bic}}$  em relação ao SPD no FNR aplicado no sulco na camada de 5-10 cm e em todos os manejos de adubação na camada de 10-20 cm.

Com relação à fração  $\text{Po}_{\text{bic}}$ , as diferenças entre os manejos da adubação fosfatada foram menos expressivas. Enquanto no SPC não houve diferenças em nenhuma camada, no SPD o SFT lanço apresentou maior teor de  $\text{Po}_{\text{bic}}$  que os demais manejos de adubação na camada de 2,5-5 cm e que o FNR a lanço na camada de 5-10 cm. Por outro lado, esta fração

do P lábil do solo apresentou grande distinção entre os sistemas de manejo do solo, uma vez que até 5 cm de profundidade, para todos os manejos de adubação, e na camada de 5-10 cm para as duas fontes de P aplicadas no sulco, o SPD apresentou maior teor de  $P_{o_{bic}}$  em relação ao SPC, ocorrendo o oposto na camada de 10-20 cm, exceto para o FNR aplicado a lanço.

A distribuição em profundidade do  $P_{i_{bic}}$  foi bastante contrastante entre os diferentes sistemas de manejo do solo e da adubação fosfatada, com elevado acúmulo superficial no SPD (Figura 5.2). Enquanto no SPC apenas cerca de 30% do  $P_{i_{bic}}$  encontra-se até 5 cm de profundidade, no SPD este valor foi de 46% para SFT aplicado no sulco até 71% com aplicação do SFT a lanço, com grande contribuição já da primeira camada. Por outro lado, a distribuição do  $P_{o_{bic}}$  não apresenta diferenças nas mesmas magnitudes. Enquanto no SPC cerca de 20% do  $P_{o_{bic}}$  encontra-se até 5 cm de profundidade no SPD este valor é de 25% a 28%.



**Figura 5.2.** Distribuição relativa do P inorgânico (a) e orgânico (b) da fração bicarbonato em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.

#### 5.4.3.2 Frações de P moderadamente lábil

As primeiras frações do P moderadamente lábil são extraídas por  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , na forma inorgânica ( $P_{i_{\text{NaOH}0,1}}$ ) e orgânica ( $P_{o_{\text{NaOH}0,1}}$ ). Enquanto o  $P_{i_{\text{NaOH}0,1}}$  está relacionado à formas de Pi adsorvidas aos óxidos de Fe e Al e argilominerais (Hedley et al., 1982), possivelmente formando complexos de esfera interna moderadamente adsorvidos (Meurer et al., 2004), bem como formas precipitadas com Fe e Al com diferentes graus de cristalização, o  $P_{o_{\text{NaOH}0,1}}$  está relacionado com Po adsorvido a esses minerais secundários ou compondo a estrutura de substâncias húmicas, principalmente associado a ácidos fúlvicos e húmicos (Linguist et al., 1997). Estas frações são consideradas por muitos autores como o grande reservatório de Pi e Po (Rheinheimer & Anghinoni, 2001, 2003; Pavinato et al., 2009), sendo o maior dreno do Pi dos fertilizantes (Redel et al., 2007; Tiecher et al., 2012 a,b), mas constituindo a principal fonte na ausência deles, repondo o P lábil (Sharpley, 1985; Gatiboni

et al., 2007). Os efeitos do manejo do solo e da adubação nas frações  $Pi_{NaOH,0,1}$  e  $PO_{NaOH,0,1}$  são apresentados na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6.** P inorgânico e orgânico da fração NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação

Camada	Manejo do solo	Manejo da adubação fosfatada			
		SFT Lanço	SFT Sulco	FNR Lanço	FNR Sulco
Cm		----- Pi NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup> , mg kg <sup>-1</sup> -----			
0-2,5	SPC	93,6 Ba	93,9 Ba	78,2 Bab	74,1 Bb
	SPD	246,5 Aa	136,4 Ab	123,1 Ab	102,8 Ac
2,5-5	SPC	95,6 Bb	111,7 Ba	68,6 Bc	64,3 Bc
	SPD	172,0 Aa	146,0 Ab	103,1 Ac	90,0 Ac
5-10	SPC	90,9 Ab	110,2 Ba	69,3 Ac	66,5 Ac
	SPD	89,5 Ab	124,7 Aa	58,1 Ac	55,7 Ac
10-20	SPC	60,0 Aa	60,6 Aa	55,6 Aab	50,9 Ab
	SPD	37,2 Bb	48,8 Ba	32,7 Bb	34,7 Bb
20-30	SPC	29,4 Aa	33,7 Aa	28,1 Aa	28,1 Aa
	SPD	28,1 Aa	30,4 Aa	25,3 Aa	26,7 Aa
		----- Po NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup> , mg kg <sup>-1</sup> -----			
0-2,5	SPC	76,3 Aa	80,0 Aa	71,9 Aa	79,7 Aa
	SPD	85,9 Aa	79,7 Aa	58,7 Bb	55,6 Bb
2,5-5	SPC	84,8 Aa	82,2 Aa	75,6 Aa	77,2 Aa
	SPD	94,7 Aa	85,6 Aa	63,2 Ab	63,8 Ab
5-10	SPC	73,1 Aa	84,7 Aa	71,1 Aa	73,6 Aa
	SPD	73,3 Aa	62,4 Bab	49,7 Bc	56,0 Bbc
10-20	SPC	64,9 Aa	72,8 Aa	69,4 Aa	68,5 Aa
	SPD	48,1 Ba	36,7 Bb	35,2 Bb	32,0 Bb
20-30	SPC	43,7 Aa	44,1 Aa	48,8 Aa	47,3 Aa
	SPD	38,8 Aa	36,3 Aab	29,5 Bb	28,5 Bb

Médias seguidas de letras iguais maiúsculas na coluna, para cada camada, comparando os sistemas de manejo de solo dentro de cada manejo da adubação fosfatada e médias seguidas de letras iguais minúsculas na linha, para cada camada, comparando manejo da adubação fosfatada dentro de cada sistema de manejo de solo, não diferem entre si pelo teste t ( $p > 0,05$ ).

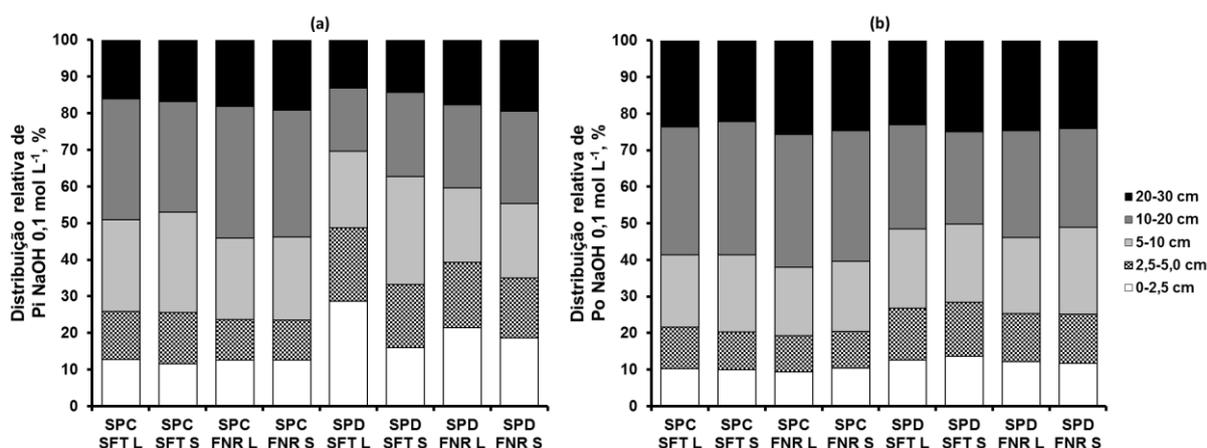
Os teores de  $Pi_{NaOH,0,1}$  no SPC foram maiores até 20 cm de profundidade com a aplicação do fertilizante na forma solúvel em relação ao FNR, para o mesmo modo de aplicação, com exceção para as camadas de 0-2,5 cm e 10-20 cm, onde a aplicação a lanço resultou em teor semelhante para as duas fontes. Já para a mesma fonte de P, observou-se maiores teores de  $Pi_{NaOH,0,1}$  nas camadas de 2,5-5 cm e 5-10 cm com a aplicação do SFT no sulco de plantio em relação a aplicação a lanço, não havendo efeito do modo de aplicação quando a fonte foi o FNR.

No SPD houve maiores teores de  $Pi_{NaOH0,1}$  com aplicação de SFT em relação ao FNR até 10 cm de profundidade para os dois modos de aplicação e na camada de 10-20 cm para a aplicação no sulco. Por sua vez, observou-se os maiores teores de  $Pi_{NaOH0,1}$  com o SFT aplicado a lanço em relação ao sulco até 5 cm de profundidade, ocorrendo o oposto nas camadas entre 5 e 20 cm. No caso do FNR em SPD apenas a camada de 0-2,5 cm apresentou resposta ao modo de aplicação, com o lanço maior que o sulco.

Foram observados maiores teores de  $Pi_{NaOH0,1}$  no SPD em relação ao SPC até 5 cm de profundidade para todos os manejos de adubação e na camada de 5-10 cm com o SFT aplicado no sulco. Por sua vez, houve os maiores teores na camada de 10-20 cm no SPC em todos os manejos da adubação.

Com relação à fração  $PO_{NaOH0,1}$ , não se observou diferenças entre os manejos da adubação fosfatada no SPC. Por sua vez, no SPD a adubação com SFT proporcionou maiores teores em relação ao FNR até 5 cm com aplicação no sulco e em todo o perfil analisado com aplicação a lanço. Apenas na camada de 10-20 cm houve efeito do modo de aplicação no SPD, com a aplicação do SFT a lanço resultando em maiores teores de  $PO_{NaOH0,1}$ . Além disso, a adubação com SFT a lanço foi a única condição em que não se observou perdas de  $PO_{NaOH0,1}$  no SPD em relação ao SPC até 10 cm de profundidade e mesmo na camada de 10-20 cm foram observados elevados teores em relação aos demais manejo de adubação no SPD.

A distribuição em profundidade de  $Pi_{NaOH0,1}$  variou em função do manejo do solo e da adubação fosfatada (Figura 5.3), apesar de em menor proporção do que ocorreu para o  $Pi_{bic}$  (Figura 5.2). Enquanto no SPC cerca de 25% do  $Pi_{NaOH0,1}$  encontra-se até 5 cm de profundidade, no SPD este valor foi de 33% para SFT aplicado no sulco até 49% com aplicação do SFT a lanço. Por outro lado a distribuição do  $PO_{NaOH0,1}$  foi muito semelhante ao que ocorreu com o  $PO_{bic}$ , com pouca diferença entre os dois sistemas de manejo de solo.



**Figura 5.3.** Distribuição relativa do P inorgânico (a) e orgânico (b) da fração NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.

Seguindo a sequência do fracionamento químico a outra fração do P moderadamente lábil é o  $P_i$  extraído por HCl ( $P_{iHCl}$ ). Esta fração está relacionada com o  $P_i$  associado a cargas positivas na superfície dos óxidos do solo, formas insolúveis em água de fosfatos de cálcio, como apatitas e parte do P ocluso, sendo considerada por muitos autores uma fração não lábil de P em solos ácidos (Hedley et al., 1994; Cross & Schlesinger, 1995; Liu et al., 2004), possivelmente pelos baixíssimos teores encontrados (Lilienfein et al., 2000; Pavinato et al., 2009). No entanto, conforme exposto anteriormente, será adotada neste trabalho a classificação moderadamente lábil para esta fração, em concordância com alguns autores (Bowman & Cole, 1978; Tiessen et al., 1984) e principalmente devido a presença entre os tratamentos de um fosfato de cálcio de baixa solubilidade (FNR) mas com conhecido efeito residual, com capacidade de suprir as plantas por vários anos após a aplicação (Sousa et al., 2010). Nesta fração, as diferenças entre os sistemas de manejo do solo e da adubação fosfatada foram mais pontuais com teores muito baixos nas demais camadas (Tabela 5.7).

**Tabela 5.7.** P inorgânico da fração HCl em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação

Camada	Manejo do solo	Manejo da adubação fosfatada			
		SFT Lanço	SFT Sulco	FNR Lanço	FNR Sulco
----- Pi HCl, mg kg <sup>-1</sup> -----					
0-2,5	SPC	1,0 Aa	1,3 Aa	1,6 Ba	2,6 Aa
	SPD	10,4 Ab	4,4 Ab	300,3 Aa	25,2 Ab
2,5-5	SPC	0,9 Ba	1,3 Ba	1,6 Ba	3,1 Ba
	SPD	3,3 Ab	4,0 Ab	21,6 Aa	21,8 Aa
5-10	SPC	1,0 Ab	1,3 Ab	1,6 Ab	27,1 Aa
	SPD	1,3 Aa	1,5 Aa	1,5 Aa	2,0 Ba
10-20	SPC	0,7 Aa	0,8 Aa	1,4 Aa	1,1 Aa
	SPD	0,4 Aa	0,5 Aa	0,4 Aa	0,5 Aa
20-30	SPC	0,4 Aa	0,4 Aa	0,3 Aa	0,4 Aa
	SPD	0,4 Aa	0,4 Aa	0,3 Aa	0,8 Aa

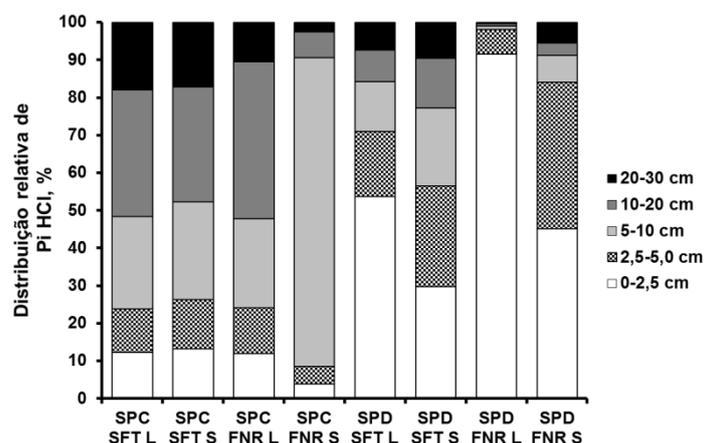
Médias seguidas de letras iguais maiúsculas na coluna, para cada camada, comparando os sistemas de manejo de solo dentro de cada manejo da adubação fosfatada e médias seguidas de letras iguais minúsculas na linha, para cada camada, comparando manejo da adubação fosfatada dentro de cada sistema de manejo de solo, não diferem entre si pelo teste t ( $p > 0,05$ ).

No SPC houve maiores teores de  $P_{iHCl}$  na camada de 5-10 cm com o FNR aplicado no sulco em relação aos demais manejos de adubação. No SPD, o FNR resultou em teores de  $P_{iHCl}$  até 5 cm de profundidade maiores em relação ao SFT, ambos aplicados a lanço. Esse mesmo efeito ocorreu para a aplicação no sulco, apesar de não ter sido significativo na camada de 0-2,5 cm. Por sua vez, a aplicação a lanço resultou em maiores teores de  $P_{iHCl}$  na

camada de 0-2,5 cm em relação a aplicação no sulco para as duas fontes, apesar de significativo apenas para o FNR.

Os teores de  $P_{iHCl}$  foram maiores no SPD em relação ao SPC em todos os manejos de adubação fosfatada até 5 cm de profundidade, apesar de na camada de 0-2,5 cm ser significativo apenas para o FNR a lanço.

A distribuição em profundidade de  $P_{iHCl}$  foi bastante contrastante em função do manejo do solo e da adubação fosfatada (Figura 5.4). Observou-se elevada concentração na camada de 5-10 cm para o FNR aplicado no sulco no SPC e distribuição semelhante nos demais manejos de adubação nesse sistema. Por sua vez, no SPD houve extrema concentração superficial, com cerca de 57% (SFT aplicado no sulco) até 98% (FNR aplicado a lanço) do  $P_{iHCl}$  localizado nos primeiros 5 cm de profundidade, sendo que no caso das aplicações a lanço, já na camada de 0-2,5 cm encontra-se 54% e 92%, para SFT e FNR, respectivamente.



**Figura 5.4.** Distribuição relativa do P inorgânico da fração HCl em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.

As últimas frações que compõem o P moderadamente lábil são aquelas extraídas pelo NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> na forma inorgânica ( $P_{iNaOH0,5}$ ) e orgânica ( $P_{oNaOH0,5}$ ). Elas estão relacionadas às mesmas formas de Pi e Po extraídas pelo NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> mas com maior grau de estabilidade, devido a uma proteção química, através de ligações mais específicas e estáveis com óxidos de Fe e Al e argilominerais, possivelmente as bidentadas (Parfitt, 1978), ou física, por estarem presentes dentro de agregados do solo (Condrón et al., 1985; Cross & Schlesinger, 1995). Uma vez que a proteção física dos agregados pode ser desfeita, expondo essas formas de P à novas reações no solo e seguindo as interpretações de Bowman & Cole (1978) e Tiessen et al. (1984), neste trabalho, conforme exposto anteriormente, as frações  $P_{iNaOH0,5}$  e  $P_{oNaOH0,5}$  serão classificadas como moderadamente lábeis. O efeito do manejo do solo e da adubação nas frações  $P_{iNaOH0,5}$  e  $P_{oNaOH0,5}$  é apresentado na Tabela 5.8.

No SPC, mais uma vez observaram-se pequenas diferenças entre os manejos de adubação. O FNR aplicado no sulco proporcionou maiores teores de  $Pi_{NaOH0,5}$  nas camadas entre 2,5 e 10 cm de profundidade em relação a aplicação do FNR a lanço bem como em relação ao SFT aplicado no sulco, enquanto o FNR a lanço proporcionou maiores teores de  $Pi_{NaOH0,5}$  na camada de 5-10 cm de profundidade em relação a aplicação do SFT a lanço.

**Tabela 5.8.** P inorgânico e orgânico da fração NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação

Camada	Manejo do solo	Manejo da adubação fosfatada			
		SFT Lanço	SFT Sulco	FNR Lanço	FNR Sulco
cm		----- Pi NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup> , mg kg <sup>-1</sup> -----			
0-2,5	SPC	53,8 Ba	56,3 Ba	63,0 Ba	65,4 Ba
	SPD	126,6 Ac	95,0 Ad	300,9 Aa	158,6 Ab
2,5-5	SPC	51,9 Bb	57,8 Bb	59,6 Bb	85,6 Ba
	SPD	88,2 Ab	81,9 Ab	153,7 Aa	156,8 Aa
5-10	SPC	49,3 Ac	57,5 Bbc	67,2 Ab	178,6 Aa
	SPD	59,4 Ab	75,1 Aa	58,7 Ab	70,8 Bab
10-20	SPC	46,7 Aa	45,9 Aa	47,6 Aa	50,2 Aa
	SPD	31,9 Ba	33,2 Ba	33,3 Ba	33,3 Ba
20-30	SPC	29,5 Aa	31,2 Aa	29,4 Aa	31,0 Aa
	SPD	27,1 Aa	29,6 Aa	25,8 Aa	27,4 Aa
		----- Po NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup> , mg kg <sup>-1</sup> -----			
0-2,5	SPC	18,8 Ba	26,4 Ba	19,7 Ba	19,6 Ba
	SPD	58,4 Ab	58,6 Ab	88,6 Aa	63,3 Ab
2,5-5	SPC	18,7 Ba	21,5 Aa	24,8 Ba	30,9 Ba
	SPD	37,7 Ab	33,3 Ab	65,7 Aa	59,0 Aa
5-10	SPC	16,2 Aa	24,5 Aa	17,1 Ba	16,1 Ba
	SPD	23,9 Aab	14,2 Ab	30,1 Aa	31,3 Aa
10-20	SPC	17,9 Aa	18,3 Aa	20,9 Aa	18,7 Aa
	SPD	16,9 Aa	16,5 Aa	17,5 Aa	19,1 Aa
20-30	SPC	12,2 Aa	12,8 Aa	13,3 Aa	12,8 Aa
	SPD	15,0 Aa	14,6 Aa	14,9 Aa	15,0 Aa

Médias seguidas de letras iguais maiúsculas na coluna, para cada camada, comparando os sistemas de manejo de solo dentro de cada manejo da adubação fosfatada e médias seguidas de letras iguais minúsculas na linha, para cada camada, comparando manejo da adubação fosfatada dentro de cada sistema de manejo de solo, não diferem entre si pelo teste t (p > 0,05).

No SPD ocorreram maiores teores de  $Pi_{NaOH0,5}$  até 5 cm de profundidade com aplicação de FNR em relação ao SFT, avaliados no mesmo modo de aplicação. Por sua vez, nas duas fontes de P a aplicação a lanço resultou em maiores teores de  $Pi_{NaOH0,5}$  na camada de

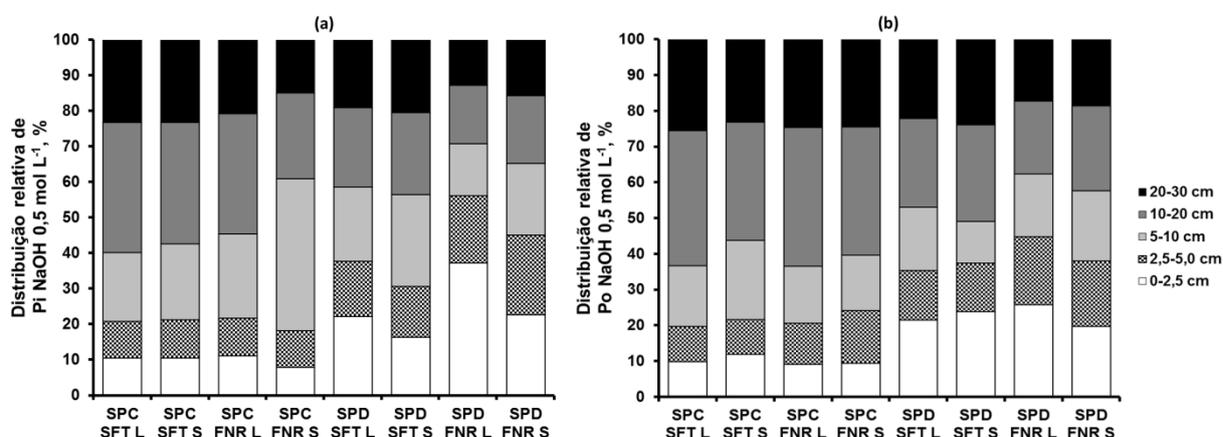
0-2,5 cm em relação a aplicação no sulco, ocorrendo o oposto na camada de 5-10 cm com SFT.

Foram observados maiores teores de  $P_{iNaOH0,5}$  no SPD em relação ao SPC até 5 cm de profundidade para todos os manejos de adubação e na camada de 5-10 cm com o SFT aplicado no sulco. Por sua vez, houve os maiores teores no SPC na camada de 5-10 cm com FNR aplicado no sulco e na camada de 10-20 cm em todos os manejos da adubação.

Com relação à fração  $P_{oNaOH0,5}$ , não se observou diferenças entre os manejos da adubação fosfatada no SPC. Por outro lado, no SPD a adubação com FNR proporcionou maiores teores em relação ao SFT na camada de 0-2,5 cm quando a aplicação foi a lanço, na camada de 2,5-5 nos dois modos de aplicação e na camada de 5-10 cm com aplicação no sulco. Além disso, a adubação com FNR a lanço resultou em maiores teores de  $P_{oNaOH0,5}$  na camada de 0-2,5 cm em relação a mesma fonte aplicada no sulco, não havendo diferenças entre os modos de aplicação quando a fonte de P foi o SFT.

Os teores de  $P_{oNaOH0,5}$  foram maiores no SPD em relação ao SPC até 10 cm de profundidade quando a fonte foi o FNR, nos dois modos de aplicação, até 5 cm de profundidade com o SFT aplicado a lanço e apenas na camada de 0-2,5 cm com o SFT aplicado no sulco. Abaixo de 10 cm não houve diferenças entre os sistemas de manejo do solo.

A distribuição em profundidade de  $P_{iNaOH0,5}$  foi bastante contrastante em função do manejo do solo e da adubação fosfatada (Figura 5.5). Observou-se elevada concentração na camada de 5-10 cm para o FNR aplicado no sulco no SPC e distribuição semelhante nos demais manejos de adubação nesse sistema. Por sua vez, no SPD cerca de 31% (SFT aplicado no sulco) até 56% (FNR aplicado a lanço) do  $P_{iNaOH0,5}$  estão localizados nos primeiros 5 cm de profundidade.



**Figura 5.5.** Distribuição relativa do P inorgânico (a) e orgânico (b) da fração NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.

Diferentemente do que ocorreu para as demais frações do  $P_o$ , a distribuição do  $P_{NaOH0,5}$  foi consideravelmente afetada pelo sistemas de manejo de solo. Nesta fração, uma maior concentração superficial foi observada no SPD em relação ao SPC, bem como no FNR em relação ao SFT, quando em SPD.

#### 5.4.3.3 Frações de P pouco lábil

As frações de maior estabilidade no solo são aquelas obtidas a partir do resíduo do solo do fracionamento, na forma inorgânica ( $P_{i_{res}}$ ) e orgânica ( $P_{o_{res}}$ ). Apesar de praticamente todas as interpretações classificarem o P residual como não lábil no solo, muitos trabalhos demonstraram a possibilidade de sua conversão a formas mais lábeis e uso pelas plantas em condições de exaustão do P do solo (Gatiboni et al., 2007; Guo & Yost., 1998; Guo et al., 2000), enfatizando-se que esse processo se dá em velocidades insuficientes para satisfazer a demanda das plantas e manutenção de elevadas produtividades. Assim, por se tratar de uma interpretação conceitual, pareceu mais correto classificar, neste trabalho, essa fração como pouco lábil, assim como o fez Souza (2008), inclusive para ajudar a desmistificar a ideia de que exista alguma fração de P essencialmente “não lábil”, concordando com o pensamento de Gatiboni (2003, p.69). Os efeitos do manejo do solo e da adubação nas frações  $P_{i_{res}}$  e  $P_{o_{res}}$  são apresentados na Tabela 5.9.

No SPC, não houve qualquer efeito da adubação tanto na fração  $P_{i_{res}}$  como na  $P_{o_{res}}$ . No SPD a adubação com FNR proporcionou maior teor de  $P_{i_{res}}$  em relação ao SFT na camada de 0-2,5 cm para os dois modos de aplicação e na camada de 2,5-5 cm para a aplicação no sulco. Na camada de 0-2,5 cm a aplicação a lanço resultou em maior teor de  $P_{i_{res}}$  em relação à aplicação no sulco, para as duas fontes. Também foi nessa camada superficial que o SPD apresentou maiores teores de  $P_{i_{res}}$  em relação ao SPC, com exceção para o SFT no sulco. No caso do FNR aplicado no sulco esse efeito ocorreu também na camada de 2,5-5 cm para todos os manejos de adubação na camada de 10-20 cm.

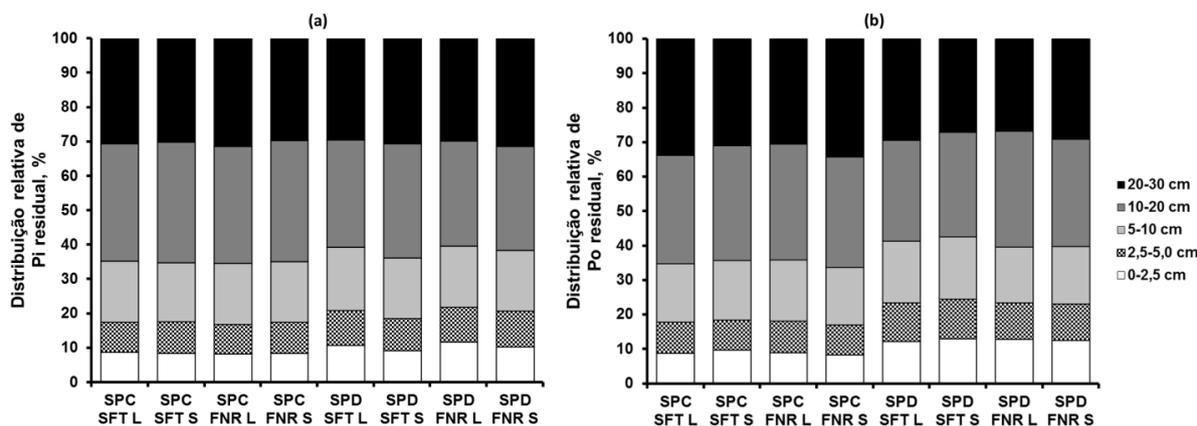
No SPD a adubação com SFT proporcionou maior teor de  $P_{o_{res}}$  em relação ao FNR até 10 cm de profundidade para os dois modos de aplicação. Neste sistema, não houve qualquer efeito do modo de aplicação. Quando a fonte foi o SFT, para os dois modos de aplicação, o SPD proporcionou maior teor de  $P_{o_{res}}$  em relação ao SPC até 10 cm de profundidade. Com o FNR aplicado no sulco esse efeito ocorreu até 5 cm de profundidade e com o FNR aplicado a lanço apenas na camada de 0-2,5 cm.

**Tabela 5.9.** P inorgânico e orgânico da fração residual em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação

Camada	Manejo do solo	Manejo da adubação fosfatada			
		SFT Lanço	SFT Sulco	FNR Lanço	FNR Sulco
cm		----- Pi residual, mg kg <sup>-1</sup> -----			
0-2,5	SPC	111,0 Ba	110,1 Aa	103,2 Ba	102,1 Ba
	SPD	126,7 Ab	107,0 Ac	140,3 Aa	124,2 Ab
2,5-5	SPC	111,3 Aa	117,7 Aa	106,7 Aa	107,1 Ba
	SPD	117,9 Aab	106,8 Ab	118,8 Aab	125,5 Aa
5-10	SPC	112,5 Aa	110,3 Aa	110,0 Aa	104,2 Aa
	SPD	107,1 Aa	101,0 Aa	105,2 Aa	104,6 Aa
10-20	SPC	107,4 Aa	112,5 Aa	105,0 Aa	104,8 Aa
	SPD	91,2 Ba	94,7 Ba	90,8 Ba	90,4 Ba
20-30	SPC	96,6 Aa	96,5 Aa	97,2 Aa	88,1 Aa
	SPD	85,8 Aa	87,4 Aa	88,0 Aa	93,4 Aa
		----- Po residual, mg kg <sup>-1</sup> -----			
0-2,5	SPC	42,9 Ba	46,4 Ba	44,2 Ba	42,5 Ba
	SPD	70,4 Aa	71,8 Aa	61,2 Ab	62,9 Ab
2,5-5	SPC	43,2 Ba	42,0 Ba	45,5 Aa	44,0 Ba
	SPD	64,0 Aa	63,2 Aa	50,7 Ab	53,6 Ab
5-10	SPC	41,3 Ba	41,7 Ba	43,8 Aa	42,4 Aa
	SPD	51,5 Aa	49,8 Aa	38,6 Ab	42,3 Ab
10-20	SPC	38,0 Aa	40,0 Aa	41,5 Aa	40,9 Aa
	SPD	41,8 Aa	41,6 Aa	40,4 Aa	39,1 Aa
20-30	SPC	40,8 Aa	37,2 Aa	37,7 Aa	43,6 Aa
	SPD	42,3 Aa	37,3 Aa	31,9 Aa	36,8 Aa

Médias seguidas de letras iguais maiúsculas na coluna, para cada camada, comparando os sistemas de manejo de solo dentro de cada manejo da adubação fosfatada e médias seguidas de letras iguais minúsculas na linha, para cada camada, comparando manejo da adubação fosfatada dentro de cada sistema de manejo de solo, não diferem entre si pelo teste t ( $p > 0,05$ ).

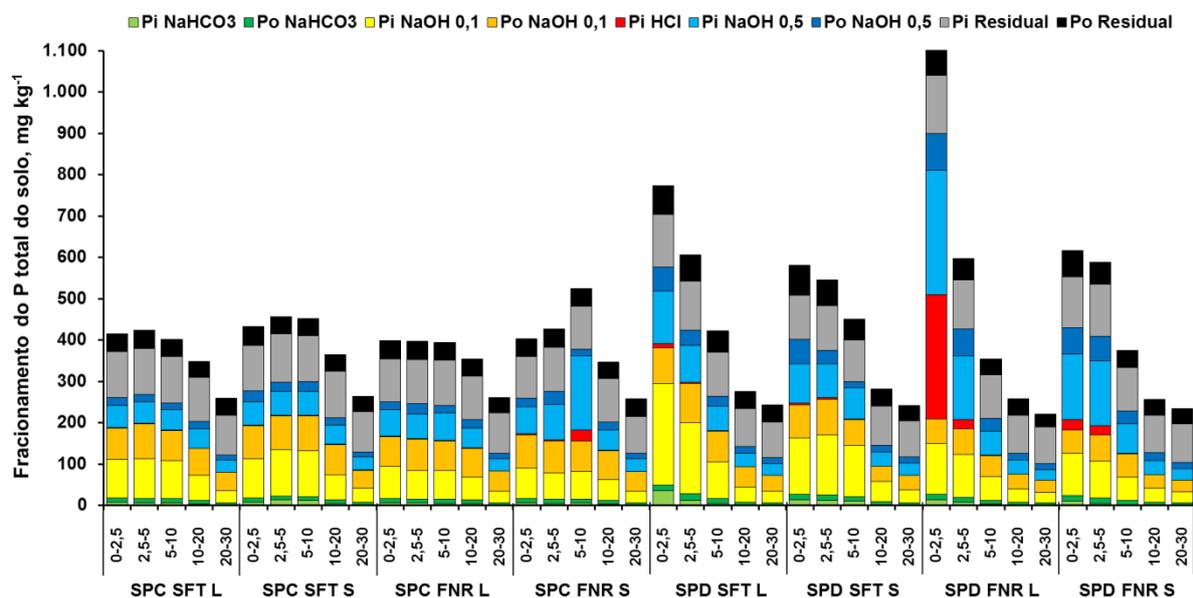
A distribuição em profundidade tanto de  $Pi_{res}$  como de  $Po_{res}$  foi muito semelhante nos diferentes manejos de solo e da adubação fosfatada (Figura 5.6). Observou-se apenas no  $Po_{res}$  uma tendência de maior participação das camadas até 5 cm de profundidade no SPD, com redução da participação da camada de 20-30 cm.



**Figura 5.6.** Distribuição relativa do P inorgânico (a) e orgânico (b) da fração residual em camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 17 anos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.

#### 5.4.3.4 Interpretação conjunta de todas as frações de P no solo

A Figura 5.7 apresenta o teor acumulado de todas as frações de Pi e Po sob efeito do manejo do solo e da adubação nas 5 camadas, resumindo o que foi apresentado nas Tabelas 5.5 a 5.9.



**Figura 5.7.** Fracionamento do P total do solo em 5 camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso após 17 anos de cultivos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.

No SPC, o fertilizante aplicado a lanço é incorporado antes do cultivo resultando numa distribuição das frações de Pi diferente daquela que ocorre com a adubação no sulco, realizada no momento do plantio. Como com a aplicação a lanço, há intensa mistura do fertilizante com o solo, as diferenças de velocidade de solubilização entre SFT e FNR são minimizadas,

resultando em completa solubilização do FNR nessa condição, evidenciada pela similaridade entre essas duas fontes nas frações de  $Pi_{bic}$  (Tabela 5.5) e  $Pi_{HCl}$  (Tabela 5.7). No entanto, apesar de terem solubilizado completamente, a solubilização do SFT resultou em formas de P ligadas ao Fe e Al com menor energia de ligação em relação ao FNR, evidenciado pelas diferenças observadas nas frações  $Pi_{NaOH0,1}$  (Tabela 5.6) e  $Pi_{NaOH0,5}$  (Tabela 5.8). Por outro lado a localização do fertilizante promovida pela aplicação no sulco resultou em acúmulo de Pi na região de aplicação do fertilizante (entre 2,5 e 10 cm) em relação a aplicação a lanço. Quando a fonte utilizada foi o SFT, mesmo nesta condição de localização, houve completa solubilização do fertilizante, evidenciado pelos baixos teores de  $Pi_{HCl}$  (Tabela 5.7). Esse Pi solubilizado ficou retido na fase sólida essencialmente na forma lábil ( $Pi_{bic}$ ) (Tabela 5.5) e moderadamente lábil ( $Pi_{NaOH0,1}$ ) (Tabela 5.6). Por sua vez, a localização promovida pela aplicação no sulco limitou a solubilização do FNR, de modo que parte do fertilizante não reagiu, evidenciado pelos elevados teores de  $Pi_{HCl}$  na camada de aplicação do fertilizante (Tabela 5.7) e a parte que reagiu resultou em formas de P ligadas ao Fe e Al com maior energia de ligação em relação ao SFT, uma vez que os ganhos de Pi foram observados apenas na fração  $Pi_{NaOH0,5}$  (Tabelas 5.5, 5.6 e 5.8).

No SPD, como não há revolvimento, as diferenças entre os manejos da adubação ocorrem de forma mais intensa nas camadas de aplicação do fertilizante (0-5 cm para aplicação à lanço e 5-10 para aplicação no sulco) e são mais evidentes do que no SPC. Nestas camadas, formas novas de P são anualmente adicionadas ao solo e juntamente com as formas antigas resultam numa presença concomitante de formas de P com diferentes tempos de reação no solo e conseqüentemente, diferentes labilidades.

Desta forma, mesmo o SFT resultando em maior solubilização do fertilizante em relação ao FNR (baixos teores de  $Pi_{HCl}$  nas camadas de aplicação do SFT – Tabela 5.7) e grande incremento nas frações de Pi de maior labilidade (elevados teores de  $Pi_{bic}$  e  $Pi_{NaOH0,1}$  nas camadas de aplicação no SFT – Tabelas 5.5 e 5.6), o uso dessa fonte também provocou ganhos nas frações de Pi de menor labilidade ( $Pi_{NaOH0,5}$  e  $Pi_{res}$ ). De modo semelhante, apesar da maior presença de partículas de fertilizante não reagido (elevados teores de  $Pi_{HCl}$  nas camadas de aplicação do FNR – Tabela 5.7) e do P que reagiu ter resultado em formas de P ligadas ao Fe e Al com menor labilidade ( $Pi_{NaOH0,5}$  e  $Pi_{res}$ ) (Tabela 5.8) em relação ao SFT, o FNR também provocou ganhos nas frações de Pi de maior labilidade ( $Pi_{NaOH0,1}$ ). Vale ressaltar que os maiores teores de  $Pi_{HCl}$  na camada de 0-2,5 cm do SFT aplicado a lanço em relação ao sulco (Tabela 5.7) sugerem a presença de formas de fosfato de cálcio, seja através de partículas de apatita não dissolvida no processo de produção do SFT, resultando na presença de partículas de fertilizante não reagido no solo, conforme já haviam observado Kunishi et al.

(1982) e Sousa & Volkweiss (1987b), ou pela neoformação de fosfatos de cálcio secundários de diferentes níveis de solubilidade (Magid, 1993), dentre eles o fosfato dicálcico dihidratado (Sousa & Volkweiss, 1987b). Nesta condição de manejo a neoformação de fosfatos de cálcio pode ser potencializada devido aos elevados teores de Ca e pH por efeito da calagem superficial, conforme também relataram Guo et al. (2000), Rheinheimer & Anghinoni (2001) e Tiecher et al. (2012b).

A ausência de revolvimento no SPD resulta no maior acúmulo superficial de praticamente todas as formas de Pi em relação ao SPC, não apenas pela manutenção da camada fertilizada, mas também pela ciclagem do P pelas culturas ao longo dos anos (Santos & Tomm, 2003), através da decomposição de resíduos vegetais de parte aérea depositados sobre a superfície do solo, bem como do P absorvido pelas raízes, que se concentram nessa camada (Costa et al., 2010). Por sua vez, no SPC o revolvimento do solo até 20 cm de profundidade, reduz o acúmulo de P em camadas específicas, mas promove distribuição em camadas mais profundas, em relação ao SPD.

Uma vez que anualmente há completa homogeneização do solo, juntamente com os resíduos vegetais de parte aérea e raízes, qualquer diferença que possa haver na dinâmica das frações de Po no SPC é efêmera, fruto do ano em questão e não foi percebida nas avaliações realizadas (Tabelas 5.5 a 5.8). Diferentemente, no SPD o manejo da adubação fosfatada alterou as frações de Po. Neste sistema, em diversas camadas a adubação com SFT proporcionou maiores teores das frações  $P_{bic}$ ,  $P_{NaOH0,1}$  e  $P_{res}$  em relação ao FNR, possivelmente devido a maior solubilização de P e absorção pelas raízes e microrganismos, convertendo Pi em Po. Além disso, o maior acúmulo superficial de MOS no SPD refletiu em diversas frações do Po, com teores maiores em relação ao SPC, conforme também observaram Rheinheimer & Anghinoni (2003), Zamuner et al. (2008) e Tiecher et al. (2012a).

O Pt obtido pelo somatório das frações ( $P_{t\Sigma frac}$ ) variou de 222 a 1100 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 5.7). Os menores teores foram observados na camada de 20-30 cm, com valores próximos para todos os tratamentos e os maiores teores ocorreram na camada de 0-2,5 cm, com aplicação do FNR a lanço no SPD. No SPC observou-se grande homogeneidade em profundidade no  $P_{t\Sigma frac}$  enquanto no SPD houve acentuado gradiente em profundidade, com as camadas até 5 cm apresentando valores maiores, a camada de 5-10 cm valores próximos, e a camada de 10-20 cm valores menores em relação ao SPC.

Essa distribuição diferenciada do  $P_{t\Sigma frac}$  em profundidade é fruto do que ocorreu individualmente em cada fração (Figuras 5.2 a 5.6). No entanto, o acúmulo superficial no SPD é mais evidente nas frações com baixos teores naturais no solo e que estão diretamente relacionadas ao grau de solubilização do fertilizante, como o  $P_{bic}$  e  $P_{NaOH0,1}$  para o SFT e

$Pi_{HCl}$  e  $Pi_{NaOH0,5}$  para o FNR, de modo que incrementos resultantes da adubação têm maior impacto relativo.

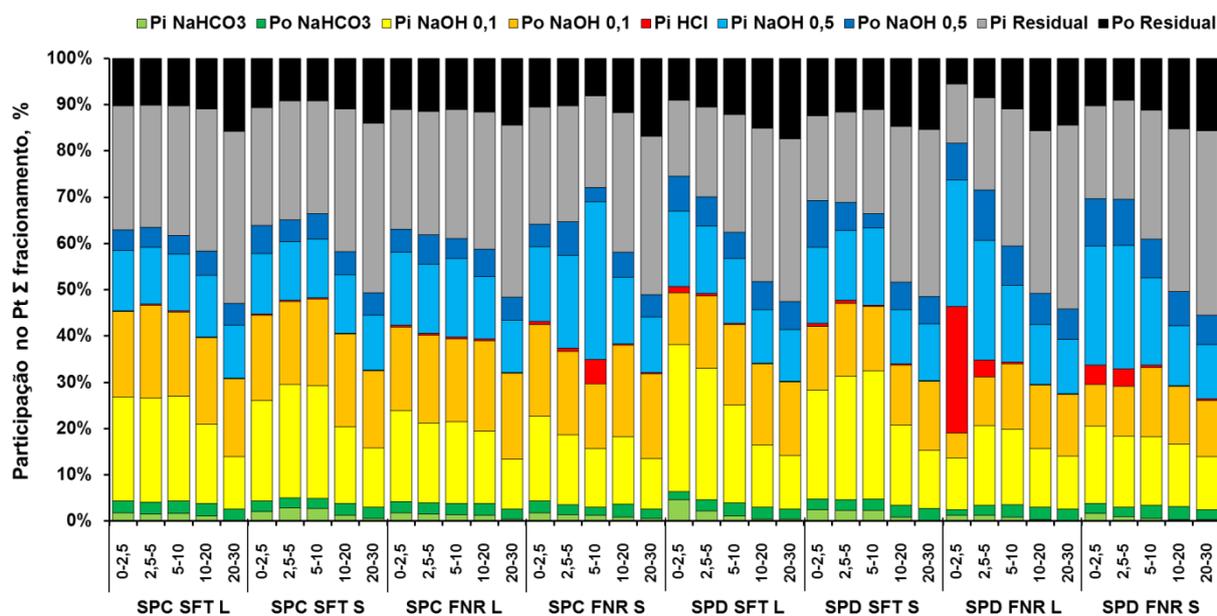
#### 5.4.4 Frações de acúmulo de fósforo

As reações de transformação do P definem as suas formas de acúmulo no solo e são influenciadas por diversos fatores relacionados ao manejo do solo e da adubação fosfatada. Enquanto no SPC o solo previamente fertilizado, partículas de fertilizantes não reagidos e resíduos culturais são anualmente revolvidos, resultando numa maior superfície de contato com o solo e favorecendo reações de solubilização, adsorção e mineralização de P, no SPD esses materiais são mantidos na zona de aplicação/deposição, promovendo uma dinâmica de transformações mais lentas. Outro grande contraste entre esses dois manejos do solo, com impacto nas formas de acúmulo de P, está relacionado à dinâmica de agregação e ciclagem da MOS, uma vez que tanto a proteção física dos agregados como as transformações da MOS favorecem o acúmulo de determinadas formas de P.

Os teores observados em cada fração são influenciados pela quantidade de Pt acumulada em cada camada, de modo que nem sempre um maior teor representa uma tendência de dinâmica diferenciada de transformação em função do manejo de solo ou adubação. Avaliando o valor por si não é possível saber se o maior teor de uma fração é resultado do maior acúmulo de Pt, com ganhos relativos iguais para todas as frações ou se determinado manejo favorece o acúmulo naquela fração específica, em detrimento de outras. Para isso é necessário avaliar as frações na forma de percentagem do  $Pt_{\Sigma frac}$  (Figura 5.8).

As frações inorgânicas representaram, para a média ponderada das camadas até 30 cm de profundidade nos oito tratamentos, cerca de 64% e as frações orgânicas 36% do  $Pt_{\Sigma frac}$  do solo, cuja média foi de  $348 \text{ mg kg}^{-1}$ , com valores muito semelhantes para os diferentes manejos de solo e da adubação fosfatada. No entanto alguma variação ocorreu em condições pontuais, como por exemplo o SPD adubado com FNR a lanço, onde na camada de 0-2,5 cm a participação das frações inorgânicas foi de 80% do  $Pt_{\Sigma frac}$ . No solo de cerrado, para a média ponderada das camadas até 30 cm de profundidade, esses valores foram 53% e 47% para a participação do Pi e Po no  $Pt_{\Sigma frac}$ , respectivamente, cuja média foi de  $268 \text{ mg kg}^{-1}$  (Tabela 5.10). Tiecher et al. (2012a) encontraram após 23 anos de cultivos redução na participação do Pi (57% para 49%) e consequentemente aumento na participação do Po (43% para 51%) no  $Pt_{\Sigma frac}$ . Para esses autores, os ganhos de Po estão relacionados à adubação equilibrada com P, sem excessos, e adoção de sistemas de manejo com elevado potencial de incremento da MOS, como o uso de plantas de cobertura e SPD. No entanto, diferentemente desse trabalho onde o aumento da MOS e dos teores absolutos de Po sugeriram que com o aumento do Pt há uma

maior transformação de Pi para Po no SPD (Tiecher et al., 2012a), no presente estudo, os 9 cultivos iniciais com soja e sem planta de cobertura resultaram num elevado acúmulo de P no solo (Capítulo 1, Figura 4.3) mas baixo aporte de biomassa vegetal e baixo incremento na MOS (Capítulo 1, Figuras 4.11 e 4.12), condição que favoreceu a manutenção do P do fertilizante em frações inorgânicas.

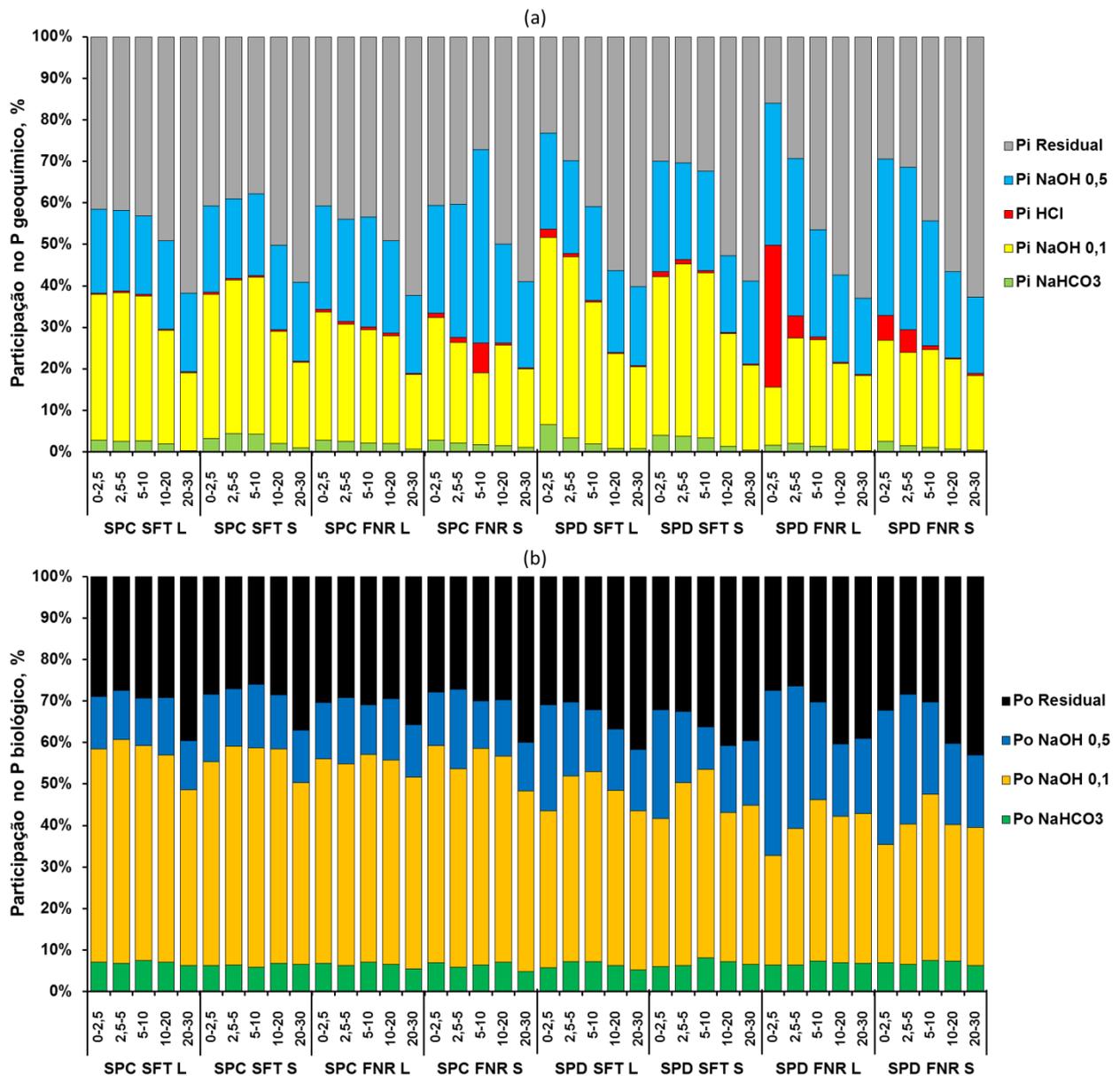


**Figura 5.8.** Participação de cada fração de P em relação ao total do solo em 5 camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso após 17 anos de cultivos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.

O manejo do solo no SPD resultou em acúmulo de P em formas mais lábeis do que no SPC (Figura 5.8). Enquanto no SPC as frações lábeis e moderadamente lábeis somadas representam, na média ponderada para a camada de maior influência da adubação nesse sistema (0-20 cm), cerca de 62% do  $P_{t_{\Sigma frac}}$ , cuja média foi de  $393 \text{ mg kg}^{-1}$ , e com pouca variação entre as camadas, no SPD, na média ponderada para a camada de maior influência da adubação nesse sistema (0-10 cm) esse valor é de 69% do  $P_{t_{\Sigma frac}}$  (cuja média foi  $539 \text{ mg kg}^{-1}$ ), chegando a 75% na camada de 0-2,5 cm com SFT a lanço e 82% na mesma camada com FNR a lanço.

No entanto, apesar de muitos trabalhos justificarem o aumento de labilidade do P no SPD pelos ganhos de frações mais lábeis de Po (Rheinheimer e Anghinoni, 2003; Tiecher et al., 2012a), no presente estudo, essa maior participação das frações lábeis e moderadamente lábeis no  $P_{t_{\Sigma frac}}$  avaliado no SPD é consequência da dinâmica que ocorre com as frações de Pi e não no Po. Isso pode ser observado na Figura 5.9a, onde os teores de Pi de cada fração são apresentados como participação relativa ao Pi total obtido no fracionamento, denominado P

geoquímico ( $P_{geo}$ ) e na Figura 5.9b, onde os teores de Po de cada fração são apresentados como participação relativa ao Po total obtido no fracionamento, denominado P biológico ( $P_{bio}$ ). Enquanto no Pi observou-se o mesmo efeito que ocorreu no Pt, com o SPD apresentando maior participação da soma das frações de Pi lábeis e moderadamente lábeis no  $P_{geo}$  (Figura 5.9a), no Po a participação da soma das frações de Po lábeis e moderadamente lábeis no  $P_{bio}$  foi semelhante para os diferentes manejos de solo e adubação (Figura 5.9b).



**Figura 5.9.** Participação de cada fração de Pi em relação ao P geoquímico (a) e de Po em relação ao P biológico (b) em 5 camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso após 17 anos de cultivos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.

Quando adubado com SFT, no SPD houve maior participação de todas as frações de Pi lábeis e moderadamente lábeis no  $P_{geo}$ , com redução da participação do  $P_{i_{res}}$ , em relação ao SPC. Por outro lado, quando adubado com FNR, apenas as frações  $P_{i_{HCl}}$  e  $P_{i_{NaOH0,5}}$

apresentaram maior participação no  $P_{geo}$ , com redução da participação do  $P_{res}$ , em relação ao SPC (Figura 5.9a).

A adubação com SFT resultou em acúmulo de P preferencialmente na fração  $Pi_{NaOH0,1}$  enquanto o uso de FNR resultou em maior acúmulo na fração  $Pi_{NaOH0,5}$  e, em alguns casos específicos,  $Pi_{HCl}$  (Figura 5.9a). Com SFT a participação do  $Pi_{NaOH0,1}$  no  $P_{geo}$  das camadas de maior influência da adubação dos dois sistemas (0-20 cm no SPC e 0-10 cm no SPD) é entre 1,3 a 1,9 vezes maior do que a participação do  $Pi_{NaOH0,5}$ , além de haver pouquíssima participação do  $Pi_{HCl}$ . Por outro lado, quando a adubação foi realizada com o FNR, no SPC a participação do  $Pi_{NaOH0,1}$  e  $Pi_{NaOH0,5}$  no  $P_{geo}$  se torna equivalente (com exceção do FNR aplicado no sulco, onde na camada de 5-10 cm a participação do  $Pi_{NaOH0,5}$  é cerca de 2,7 vezes maior que a do  $Pi_{NaOH0,1}$ ) e no SPD a participação do  $Pi_{NaOH0,5}$  no  $P_{geo}$  é cerca de 1,3 a 2,4 vezes maior que a do  $Pi_{NaOH0,1}$ . Além disso, com FNR, o  $Pi_{HCl}$  apresenta participação considerável no  $P_{geo}$ , principalmente na camada de 5-10 cm com aplicação no sulco em SPC e na camada de 0-5 cm nos dois modos de aplicação em SPD.

Conforme já discutido, o SPC promove uma exposição do Pi a novos sítios de adsorção (Sousa & Volkweiss, 1987a), favorecendo a transformação do Pi de formas de adsorção de maior labilidade como o  $Pi_{bic}$  e  $Pi_{NaOH0,1}$ , para as de menor labilidade ( $Pi_{res}$ ) reduzindo sua labilidade no sistema, principalmente em solos com elevado efeito dreno (Novais et al., 2007). Por sua vez, o SPD promove acúmulo superficial do Pi, com maior labilidade nestas camadas em relação as camadas subsuperficiais deste mesmo sistema ou em relação ao SPC. Isso ocorreu possivelmente devido ao maior acúmulo de MOS em superfície no SPD (Capítulo 1, Figura 4.11 e 4.12), reduzindo a retenção de Pi no solo pela competição dos ânions orgânicos com os sítios de adsorção (Sibanda & Young, 1986; Hue, 1991; Mesquita Filho & Torrent, 1993; Ohno & Erich, 1997; Nziguheba et al., 1998), bem como devido ao próprio acúmulo de P nessas camadas (Figura 5.7), provocando maior saturação dos sítios de adsorção (Guertal et al., 1991), de modo que o Pi remanescente é adsorvido com menor energia de ligação, facilitando sua posterior dessorção, conforme observaram Barrow et al. (1998) e Tiecher et al. (2012b).

No SPD não apenas o Pi adsorvido aos colóides do solo permanece em formas de maior labilidade, mas a reação mais lenta do próprio fertilizante (Kunishi et al. 1982), resultando em acúmulo de formas não reagidas de fosfatos de cálcio (Sousa & Volkweiss, 1987b), bem como a formação de fosfatos de cálcio secundários (Magid, 1993), observados pelo  $Pi_{HCl}$ , podem ser consideradas formas de proteção do P nesse sistema que contribuem para a manutenção do P em formas de maior labilidade. No entanto, apesar do FNR resultar no acúmulo de grande quantidade desses fosfatos de cálcio com elevado efeito residual

(Sousa et al., 2010), as formas de P solubilizadas e adsorvidas a óxidos de Fe e Al e argilominerais encontra-se em formas de menor labilidade em relação ao SFT, evidenciado pelos maiores teores de  $P_{iNaOH0,5}$ . Isto pode ser explicado de duas maneiras. Na primeira, enquanto durante a reação do SFT a formação da frente de solubilização extremamente ácida resulta na dissolução dos constituintes do solo, especialmente óxidos de Fe e Al, e culmina com predomínio de reações de precipitação do P com Ca, Fe e Al (Lindsay et al., 1962), que posteriormente serão solubilizados e adsorvidos no solo, o FNR, com uma solubilização lenta e consumidora de acidez (Novais et al., 2007), desfavorece essas reações de precipitação (que podem ser encaradas como formas de proteção à adsorção), resultando em favorecimento da adsorção específica pelas argilas, denominadas complexo de esfera interna (Meurer et al., 2004), com o P sendo então acessado em maior quantidade apenas pelo  $P_{iNaOH0,5}$ . Uma segunda explicação, que carece de estudos futuros para comprová-la, seria a dissolução pelo HCl do FNR não reagido seguido de readsorção parcial do P e posterior recuperação pelo NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>.

Com relação ao  $P_o$  do solo (Figura 5.9b), não se observou influência do manejo do solo e da adubação na participação da fração  $P_{o_{res}}$  no  $P_{bio}$ , cujos valores ficaram em torno de 30% do  $P_{bio}$ . Além disso, também não se observou influência do manejo do solo e da adubação na participação da fração  $P_{o_{bic}}$ , cujos valores ficaram em torno de 8% do  $P_{bio}$ . No entanto, houve influência nas frações moderadamente lábeis, extraídas por NaOH 0,1 e 0,5 mol L<sup>-1</sup>.

Enquanto o revolvimento do solo no SPC estimula a reação do fertilizante com os colóides do solo e acelera a decomposição de MOS, favorecendo o acúmulo de  $P_{i_{res}}$ , no caso do  $P_{o_{res}}$  não há acúmulo nesse sistema pelos mesmos motivos. Por outro lado, mesmo a fração de  $P_o$  de maior labilidade não apresenta acúmulo preferencial no SPD, possivelmente devido ao caráter lábil dessa fração que, de acordo com Bowman & Cole (1978), pode ser considerada uma fração ativa do  $P_o$  do solo, uma vez que representa compostos como glicerolfosfato e ácidos ribonucleicos, que são prontamente solúveis e de fácil degradação no solo.

No SPC, a fração de acúmulo do  $P_o$  foi o  $P_{oNaOH0,1}$ , com participação em cerca de 50% do  $P_{bio}$  e sem influência do manejo da adubação. No SPD, quando adubado com SFT, a participação do  $P_{oNaOH0,1}$  no  $P_{bio}$  é menor do que a observada no SPC, com aumento da participação do  $P_{oNaOH0,5}$ . Esse efeito se torna ainda mais evidente quando a fonte foi o FNR, com o  $P_{oNaOH0,5}$  chegando a apresentar valores maiores do que os do  $P_{oNaOH0,1}$ , como por exemplo na camada de 0-2,5 cm com aplicação a lanço.

Num primeiro momento, a ideia de que no SPD existe um favorecimento de acúmulo de Po em frações menos lábeis que no SPC parece estranha. No entanto, quando se observa que no SPD há maior atividade microbiana (Mendes et al., 2003), responsável por reações de estabilização química da MOS, e há melhor estruturação do solo (Bertol et al., 2004a) resultando na proteção física e acúmulo de MOS (Nunes et al., 2011a; Figueiredo et al., 2013), fica mais fácil perceber que esse sistema conservacionista promove maior estabilidade do Po no solo, evidenciada pela fração  $P_{NaOH0,5}$ , e que conseqüentemente resulta no seu acúmulo.

Por outro lado, o FNR promovendo o acúmulo de Po em formas de maior estabilidade não apresenta razões de tão fácil compreensão. Uma hipótese levantada por Santos et al. (2008) é de que, com a liberação lenta de P pelas fontes de baixa solubilidade, como o FNR, o próprio fertilizante atua como fonte de reposição das frações lábeis que vão sendo consumidas pela absorção pelas plantas, de modo que as frações menos lábeis orgânicas, permanecem com pouca alteração, resultando em maiores teores.

O efeito de determinado tratamento no acúmulo de P no solo é melhor observado quando contrastado com a situação original do solo. Desta forma, a Tabela 5.10 apresenta o resultado do fracionamento químico do P para o solo com vegetação natural do cerrado, facilitando a compreensão das Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, que representa os ganhos ou perdas dos diferentes manejos de solo e adubação fosfatada em relação a essa área de referência.

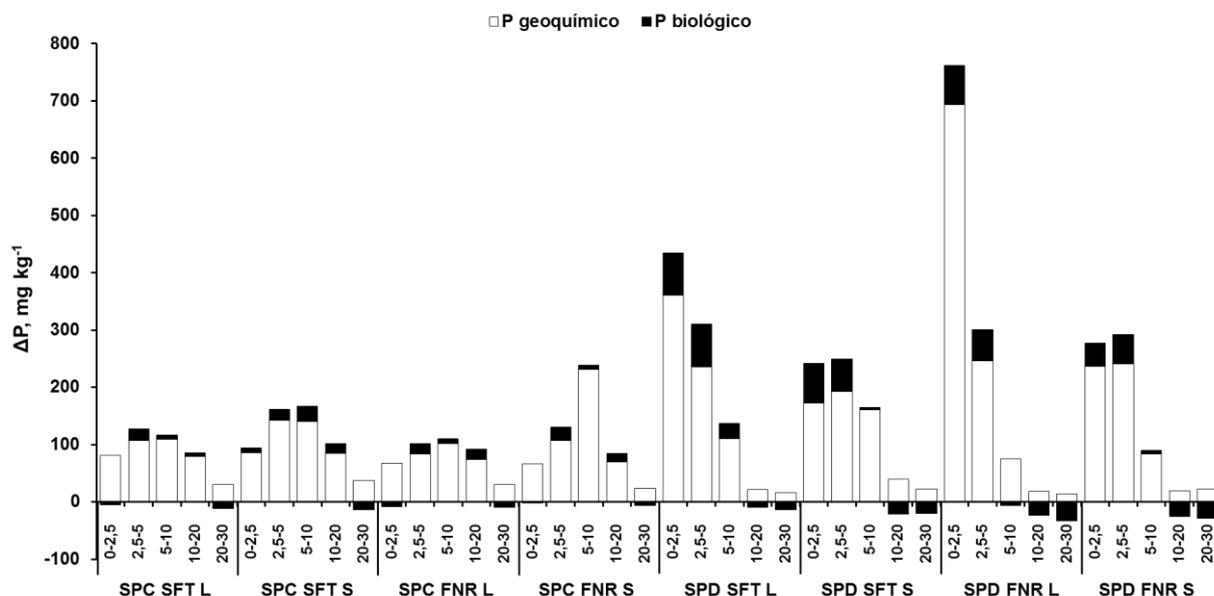
**Tabela 5.10.** Frações de P em diferentes camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso com vegetação natural do cerrado

Camada	NaHCO <sub>3</sub>		NaOH 0,1		HCl	NaOH 0,5		Residual		P <sub>geo</sub>	P <sub>bio</sub>	P <sub>tΣfrac</sub>
	Pi	Po	Pi	Po		Pi	Po	Pi	Po			
Cm	mg kg <sup>-1</sup>											
<b>0-2,5</b>	2,1	9,4	57,7	70,0	0,7	39,3	26,1	85,3	48,5	185,1	154,1	339,2
<b>2,5-5</b>	1,6	9,0	38,9	57,5	0,6	34,3	24,0	83,5	46,9	158,9	137,4	296,2
<b>5-10</b>	0,9	7,8	33,6	53,7	0,5	32,7	24,5	84,1	47,5	151,8	133,5	285,4
<b>10-20</b>	0,5	6,5	27,3	48,1	0,4	30,0	19,3	81,7	49,1	139,9	122,9	262,9
<b>20-30</b>	0,4	5,9	22,2	43,0	0,3	27,2	16,8	75,7	49,1	125,8	114,7	240,5
<b>0-10</b>	1,4	8,5	41,0	58,7	0,6	34,7	24,8	84,3	47,6	161,9	139,6	301,5
<b>0-20</b>	0,9	7,5	34,1	53,4	0,5	32,4	22,1	83,0	48,3	150,9	131,3	282,2
<b>0-30</b>	0,7	7,0	30,2	49,9	0,4	30,6	20,3	80,6	48,6	142,6	125,8	268,3

P<sub>geo</sub>, P<sub>bio</sub> e P<sub>tΣfrac</sub>: Somatório das frações de P inorgânico, orgânico e inorgânico + orgânico, respectivamente.

Em comparação com o solo da vegetação natural de cerrado, observou-se em todo o perfil ganhos de P<sub>geo</sub>, independentemente do sistema de manejo de solo e de adubação fosfatada, variando de 14 mg kg<sup>-1</sup> a 700 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 5.10). Por outro lado, os ganhos de P<sub>bio</sub> não ocorreram em todas as camadas de solo e foram bem menores do que os de P<sub>geo</sub>.

Apesar disso, os ganhos de  $P_{bio}$  em algumas camadas são bastante expressivos, chegando até  $75 \text{ mg kg}^{-1}$ .



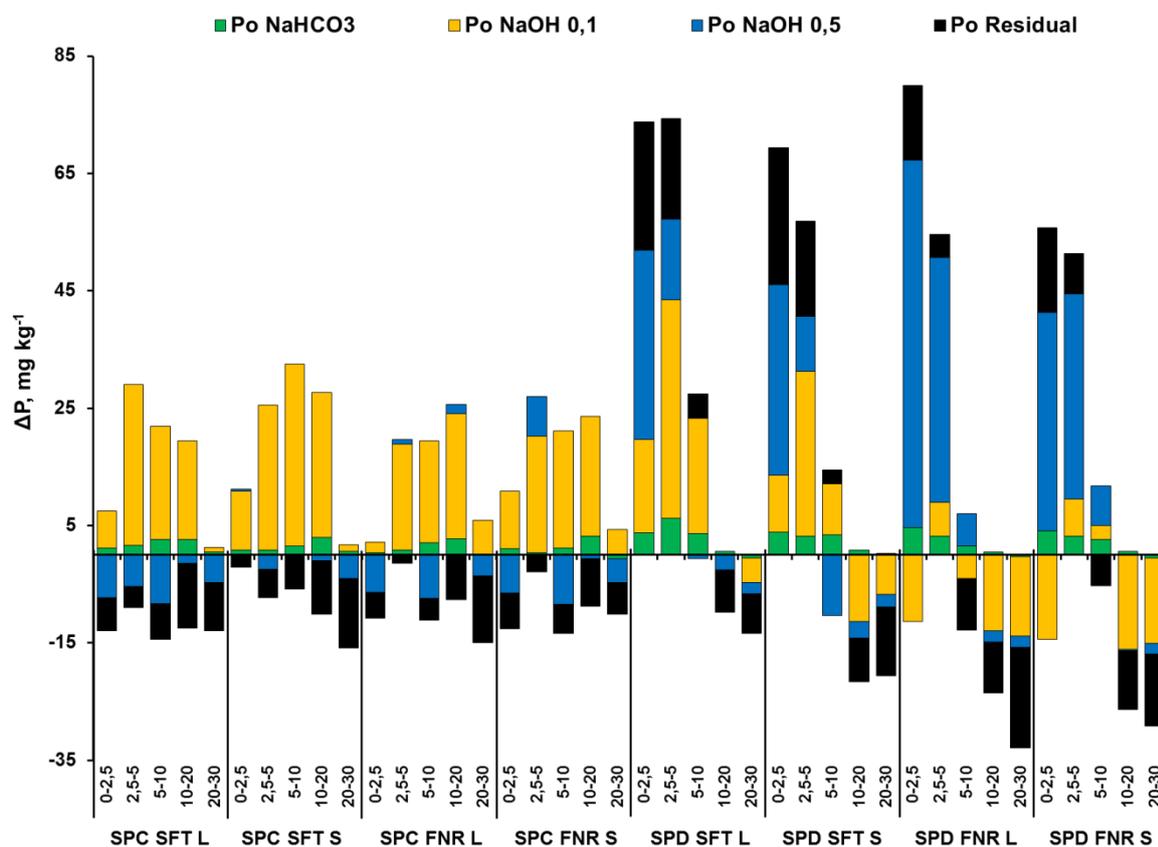
**Figura 5.10.** Variação no P geoquímico e P biológico em relação ao cerrado natural, em 5 camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso após 17 anos de cultivos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.

No SPC, de modo geral, as camadas de 0-2,5 cm e 20-30 cm apresentaram perdas de  $P_{bio}$  em relação ao cerrado enquanto as camadas intermediárias (2,5-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm) apresentaram ganhos. No SPD até 10 cm de profundidade houve ganhos de  $P_{bio}$  em relação ao cerrado em todos os manejos de adubação, com exceção para a camada de 5-10 cm do FNR a lanço. Abaixo de 10 cm de profundidade houve perdas de  $P_{bio}$  no SPD em relação ao cerrado. As perdas de  $P_o$  abaixo de 20 cm no SPC e abaixo de 10 cm no SPD, ambos em relação ao cerrado, são resultado da ausência de influência do manejo nessas camadas, enquanto no cerrado o sistema radicular profundo das diversas espécies mantém aporte constante de  $P_o$  em profundidade.

Enquanto os ganhos no  $P_i$  ocorreram em todas as frações do  $P_i$  do solo (dados não apresentados), seguindo as proporções de participação de cada uma no  $P_{geo}$  (Figura 5.9a), os ganhos ou perdas de  $P_{bio}$  (Figura 5.10) são resultado de dinâmica que ocorre dentro deste compartimento do P do solo conforme apresentado na Figura 5.11.

No SPC em quase todas as condições, as frações  $P_{bic}$  e, principalmente,  $P_{NaOH0,1}$  apresentaram ganhos em relação ao cerrado, enquanto as frações  $P_{NaOH0,5}$  e  $P_{res}$  apresentaram perdas. Em alguns casos, como nas camadas de 0-2,5 cm e 20-30 cm a resultante final foi perda de  $P_{bio}$  em relação ao cerrado. Por outro lado, no SPD a variação em relação ao cerrado dependeu do manejo da adubação fosfatada. Quando adubado com SFT,

até 10 cm de profundidade houve ganhos em praticamente todas as frações do Po, com destaque para o  $Po_{NaOH0,5}$  na camada de 0-2,5 cm e para o  $Po_{NaOH0,1}$  nas demais camadas. Quando adubado com FNR, até 10 cm de profundidade houve ganhos nas frações  $Po_{bic}$ ,  $Po_{NaOH0,5}$  e  $Po_{res}$ . Abaixo de 10 cm de profundidade as perdas de Po no SPD ocorreram especialmente nas frações  $Po_{NaOH0,1}$  e  $Po_{res}$ .



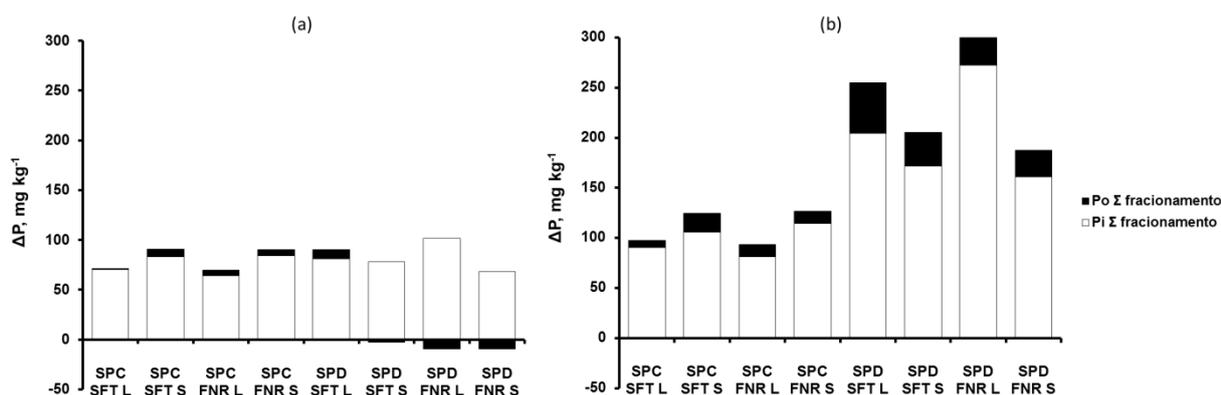
**Figura 5.11.** Variação nas frações do Po em relação ao cerrado natural, em 5 camadas de Latossolo Vermelho muito argiloso após 17 anos de cultivos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.

Esses resultados são contrastam com a ideia de que as frações de Po não são alteradas pela adubação fosfatada em solos argilosos altamente intemperizados, conforme observaram Conte et al. (2003), em SPD com 5 anos de cultivos, e Pavinato et al. (2009), em SPC e SPD com 13 anos de cultivos. Possivelmente o tempo de adoção do manejo represente papel fundamental na observação desse efeito no Po, uma vez que Costa et al. (2010) observaram efeito do modo de aplicação do fertilizante fosfatado no Po em Argissolo cultivado por 18 anos em SPC e SPD.

Ao se considerar a média do perfil (0-30 cm) os ganhos no SPC em relação à condição natural foram pequenos e no SPD apenas houve ganhos de  $P_{bio}$  no SFT a lanço, com perda nos demais manejos de adubação (Figura 5.12a). No entanto, ao se considerar apenas as camadas

de influência do manejo do solo (0-20 cm no SPC e 0-10 cm no SPD) os ganhos de  $P_{bio}$  no SPC foram maiores e no SPD se tornaram bastante expressivos (Figura 5.12b).

Considerando-se que, na camada superficial, especialmente no SPD, há o maior acúmulo de nutrientes (De Maria et al., 1999), raízes (Costa et al., 2010) e atividade microbiana (Mendes et al., 2003), percebe-se que o efeito do manejo do solo e da adubação no Po passa a apresentar grande potencial de influência na dinâmica de nutrição de P para as plantas, concordando com Redel et al. (2007).



**Figura 5.12.** Variação no P geoquímico e P biológico em relação ao cerrado natural, na camada de 0-30 cm para SPC e SPD (a) e na camada de 0-20 cm para SPC e 0-10 cm para SPD em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 17 anos de cultivos em diferentes sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada.

## 5.5. CONCLUSÕES

1. Enquanto no sistema de preparo convencional o revolvimento do solo proporciona distribuição mais homogênea das frações de fósforo inorgânico no perfil, no plantio direto há acentuado gradiente em profundidade, com acúmulo na zona de aplicação do fertilizante (0-5 cm para aplicação a lanço e 5-10 cm para aplicação no sulco), especialmente das frações com baixo teor natural no solo e que estão diretamente relacionadas ao grau de solubilização do fertilizante.

2. O sistema plantio direto promove acúmulo de fósforo inorgânico no solo em frações mais lábeis e acúmulo de fósforo orgânico no solo em frações menos lábeis em relação ao preparo convencional.

3. No sistema plantio direto adubado com fosfato natural reativo há maior acúmulo de formas de fósforo inorgânico associadas à presença de fertilizante não solubilizado, bem como de formas adsorvidas com menor labilidade, em relação ao superfosfato triplo, especialmente com aplicação a lanço.

4. O manejo do solo em sistema de preparo convencional e plantio direto, com elevado aporte de fósforo e resíduos vegetais, resultam no acúmulo de fósforo orgânico até 20 cm e até 10 cm de profundidade, respectivamente, em relação ao cerrado.

## 6. CAPÍTULO 3

### DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO E RAÍZES NO SOLO E PRODUTIVIDADE DE SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE MANEJO DO SOLO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA POR UM LONGO PERÍODO

#### 6.1. RESUMO

A adequada absorção do fósforo, crescimento e produtividade das culturas dependem da adoção de sistemas de manejo que favoreçam a disponibilidade do nutriente no solo e seu acesso pelas raízes das plantas. Investigou-se a distribuição do fósforo e das raízes no perfil do solo e seu efeito na absorção do nutriente e produtividade de soja e milho em diferentes manejos do solo e da adubação fosfatada. O experimento foi conduzido em Latossolo Vermelho muito argiloso com disponibilidade inicial de fósforo muito baixa, sendo cultivado por 17 anos com as culturas de soja e milho recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  em dois manejos de solo (sistema de preparo convencional ou plantio direto) e em quatro manejos de adubação fosfatada (superfosfato triplo ou fosfato natural reativo, com aplicação no sulco de semeadura ou a lanço na superfície). Foi avaliada a distribuição do fósforo disponível (Bray 1) e raízes em profundidade e a produção de biomassa e absorção de fósforo por soja (16° cultivo) e milho (17° cultivo) no florescimento das culturas, bem como a produtividade de grãos. O revolvimento do solo no sistema de preparo convencional proporcionou distribuição mais homogênea de fósforo enquanto no plantio direto houve acentuado gradiente em profundidade, com acúmulo do nutriente na zona de aplicação do fertilizante. Apesar das diferenças na distribuição em profundidade, o teor médio de fósforo disponível no perfil foi semelhante para os dois manejos de solo e para os dois modos de aplicação, porém maior para o superfosfato triplo em relação ao fosfato natural reativo. A distribuição de raízes de soja e milho apresentou elevada relação com a distribuição de fósforo, com exceção para a soja cultivada em sistema de preparo convencional. A produção de biomassa, absorção de fósforo e produção de grãos de soja no preparo convencional, além de influenciados pelo manejo da adubação fosfatada, apresentou desempenho inferior ao plantio direto, fato que não ocorreu para o milho, que apresentou maior eficiência de absorção de fósforo em relação à soja. A maior estratificação de fósforo e raízes de soja e milho no solo em plantio direto não representou qualquer limitação à absorção do nutriente e produtividade dessas culturas.

## 6.2. INTRODUÇÃO

Apesar do sistema plantio direto (SPD) ter sido adotado na produção de grãos brasileira principalmente em função da redução dos custos com o preparo do solo e redução da erosão (Bolliger et al., 2006), diversos benefícios têm sido atribuídos a esse sistema de manejo em relação ao preparo convencional (SPC). Alguns exemplos são o acúmulo de matéria orgânica (Nunes et al., 2011a; Figueiredo et al., 2013), menor temperatura e maior umidade volumétrica de camadas superficiais (Costa et al., 2003), menor perda de umidade do solo após estiagem (Martorano et al., 2009), melhor estruturação do solo (Bertol et al., 2004a), maior atividade (Mendes et al., 2003) e diversidade (Souza et al., 2012) microbianas e melhor dinâmica de nutrientes (Santos & Tomm, 2003), resultando numa nova dinâmica de fertilidade do solo (Nicolodi et al., 2008). Desta forma, sua adoção tem crescido gradativamente, alcançando cerca de 32 milhões de ha na safra 2011/12 (FEBRAPDP, 2013), ou seja 63% da área cultivada com grãos no país (CONAB, 2014).

A manutenção dos fertilizantes e corretivos nas camadas superficiais associada à ciclagem dos nutrientes pelas culturas proporciona um gradiente de concentração de nutrientes no perfil do solo em SPD (De Maria et al., 1999; Santos & Tomm, 2003), especialmente o fósforo (P) que, além de apresentar baixa mobilidade no solo (Barber, 1995), ocorre com baixíssima disponibilidade natural nos solos oxídicos do Cerrado (Sousa & Lobato, 2004). A intensidade desse efeito depende do manejo da adubação fosfatada. A aplicação do fertilizante fosfatado no sulco de semeadura reduz o seu contato com o solo, resultando numa área fertilizada menor, porém com maior disponibilidade em relação a aplicação a lanço na superfície, além de um gradiente em profundidade menos intenso (Nunes et al., 2011b). Por sua vez, o uso de fontes de P de elevada solubilidade em solos tropicais ácidos com alta capacidade de adsorção de P, permite rápida conversão à formas menos disponíveis às plantas, podendo ter sua eficiência diminuída ao longo do tempo (Prochnow et al., 2004). O contrário ocorre com o uso de fontes de menor solubilidade, que promovem solubilização gradual do P, limitando a adsorção específica pelas argilas (Novais et al., 2007) e podendo proporcionar uma maior eficiência do fertilizante (Sousa et al., 2010).

Para que ocorra adequada absorção do P do solo, crescimento e produtividade das culturas no longo prazo, a disponibilidade do nutriente deve estar associada à presença de raízes capazes de absorvê-lo, uma vez que o contato entre os dois ocorre por difusão (Barber, 1995). Apesar das raízes apresentarem elevada plasticidade (Hodge et al., 2009; Mulia et al., 2010), respondendo tanto fisiologicamente quanto morfológicamente à distribuição e disponibilidade de nutrientes no solo (Robinson, 1996), deve-se evitar elevada concentração do P num pequeno volume, em função dos possíveis efeitos deletérios no meristema apical

das raízes (Barber, 1995) e da absorção ser dependente, além dos teores de P, do volume de solo adubado (Anghinoni, 1992; Klepker & Anghinoni, 1993).

Em sistemas com fertilidade adequada no solo, não se observa diferenças de produtividades das culturas adubadas a lanço ou no sulco de semeadura (Pavinato & Cereta, 2004; Guareschi et al., 2008; Nunes et al., 2011b) de modo que a escolha da melhor estratégia pode ser baseada em outros fatores como o custo operacional (Matos et al., 2006). Por outro lado o uso de fontes naturais reativas proporciona menor produtividade em relação a fontes solúveis (Oliveira Junior et al., 2008; Frandoloso et al., 2010) de modo que a aplicação antecipada desta fonte tem sido recomendada para contornar as limitações de velocidade de solubilização no SPD (Sousa et al., 2010). Por sua vez, maiores produtividades das culturas no SPD em relação ao SPC (McGregor et al., 2006; Nunes et al., 2011a), podem estar associadas a uma melhor nutrição com P (Nunes et al., 2011b).

Desta forma, espera-se que os distintos sistemas de manejo do solo e da adubação fosfatada influenciem no acesso do P pela planta e, por fim, na absorção do nutriente e produção das culturas, uma vez que o P é um importante modulador da produção. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do sistema de manejo do solo e da adubação fosfatada por 17 anos na distribuição vertical de P e raízes de soja e milho e como essa distribuição afeta a absorção do nutriente e a produtividade dessas culturas.

### **6.3. MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi realizado na área experimental do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), em Planaltina, DF (latitude 15°36'06"S e longitude 47°42'26"W), com 1.014 m de altitude e clima Cwa (de acordo com a classificação de Köppen). Este corresponde a um típico clima de savana, com precipitação média anual de 1.570 mm e duas estações bem definidas: seca (maio a setembro) e chuvosa (outubro a abril). As médias de temperaturas máxima e mínima são 26,4°C e 15,9°C, respectivamente.

A fitofisionomia original é o Cerrado sentido restrito. O solo é classificado como um Latossolo Vermelho distrófico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Embrapa, 2013), Rhodic Haplustox, de acordo com a classificação americana (Soil Survey Staff, 2010), ou Rhodic Ferralsol, de acordo com a classificação da FAO (IUSS Working Group WRB, 2006). É um solo bem permeável, muito argiloso (64% de argila), pobre em nutrientes, tendo o metarritmito argiloso como material de origem (Freitas-Silva & Campos, 1999), com predominância de caulinita (634 g kg<sup>-1</sup>), gibsitita (195 g kg<sup>-1</sup>) e hematita (108 g kg<sup>-1</sup>) na fração argila, com ausência de contraste de textura entre os horizontes A e B. Por ocasião da instalação do experimento, em setembro de 1994, o teor de P extraível por Bray-1

na camada de 0-20 cm era de  $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$ , considerado muito baixo segundo a calibração deste extrator para a região (Sousa, D.M.G., dados não publicados).

Antes do primeiro cultivo, foram aplicados a lanço e incorporados calcário dolomítico, para elevar a 50% a saturação por bases, gesso, potássio, enxofre e micronutrientes, segundo recomendações de Sousa & Lobato (2004), mas sem adubação corretiva com P. Durante os cultivos, foram efetuadas adubações anuais de manutenção, a lanço, com  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  na forma de cloreto de potássio,  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  de S na forma de gesso, além de, para o milho,  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  de N no sulco de semeadura e duas coberturas de  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de N na forma de uréia, segundo Sousa & Lobato (2004). A adubação anual com P foi feita na dose de  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , sendo que a fonte e modo de aplicação de P variaram de acordo com cada tratamento. A cultura da soja (*Glycine max*), com espaçamento entre linhas de 0,50 m, foi cultivada nos nove primeiros anos, o milho (*Zea mays*), com espaçamento entre linhas de 0,80 m, foi cultivado no 10° e 11° anos e, nos seguintes, houve a rotação entre soja e milho. Os cultivos de soja e milho receberam irrigação suplementar por aspersão em situações de seca durante a estação chuvosa (fenômeno comum na região e denominado “veranico”). A irrigação era definida com base em tensiômetros instalados nas parcelas a 20 cm de profundidade, quando apresentavam leitura de tensão maior que 45 kPa. O milheto (*Pennisetum glaucum*), com espaçamento entre linhas de 0,20 m, foi utilizado como cobertura no inverno após o nono cultivo, sendo semeado após a colheita da soja ou milho, recebendo irrigação suplementar para desenvolvimento sem limitação de água, roçado no início da maturação fisiológica e adubado, desde o 14° ano, com  $45 \text{ kg ha}^{-1}$  de N (uréia) visando maior produção de biomassa.

Do experimento com 20 tratamentos foram utilizados no presente estudo oito tratamentos envolvendo manejo do solo e da adubação fosfatada: cultivo em SPC, constituído de uma aração até 20 cm de profundidade com arado de discos e uma grade niveladora antes do plantio da cultura de verão, ou SPD, adubados com fosfato natural reativo de Gafsa (FNR) ou superfosfato triplo (SFT), aplicados no sulco de semeadura (S) ou a lanço na superfície (L), na dose de  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . O FNR continha 28,2% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total, dos quais 44% eram solúveis em solução de ácido cítrico a 2%. O SFT continha 47,6% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total, dos quais 92% eram solúveis em solução de ácido cítrico a 2%.

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso com parcelas divididas com os sistemas de manejo do solo (SPC e SPD) nas parcelas e nas sub-parcelas as fontes de P (FNR e SFT) e os modos de aplicação (S e L), distribuídos aleatoriamente dentro de cada uma delas, com três repetições. As dimensões das parcelas eram de 16 m x 8 m e das sub-parcelas experimentais eram de 8 m x 4 m ( $32 \text{ m}^2$  de área). A área útil de colheita consistiu de  $15 \text{ m}^2$  para a soja e  $12 \text{ m}^2$  para o milho, localizados na porção central das sub-parcelas.

A amostragem de solo foi realizada em dois momentos, sendo o primeiro após o 14º ano com soja e o segundo após o 17º ano com milho. Nos dois momentos as amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-2,5 cm, 2,5-5 cm e 5-10 cm, com trado para amostra indeformada de 5 cm de diâmetro, e na camada de 10-20 cm de profundidade, com trado holandês com 5 cm de diâmetro, sendo uma amostra composta por cada parcela do experimento.

Para os tratamentos de adubação a lanço foram tomadas 20 sub-amostras para cada amostra composta coletadas aleatoriamente na área útil das parcelas. Para os tratamentos de adubação no sulco, cada amostra composta foi formada por sub-amostras dirigidas, seguindo a proposta apresentada por Nicolodi et al. (2002) e CQFS-RS/SC (2004), que utilizam tradagem em substituição a pá de corte. Deste modo, escolheram-se 6 locais dentro de cada parcela e em cada local coletaram-se sub-amostras perpendiculares a linha da cultura e equidistantes, compreendidas entre duas entre-linhas sendo uma na linha. Para a soja coletou-se 5 sub-amostras por local enquanto para o milho coletou-se 7 sub-amostras, em razão do maior espaçamento desta cultura. Depois de coletadas, as amostras foram secas ao ar, maceradas, passadas em peneira de 1 mm e analisadas quanto a P disponível por Bray 1 (Bray & Kurtz, 1945), sendo a camada de 0-5 cm obtida pela média dos teores das duas primeiras camadas.

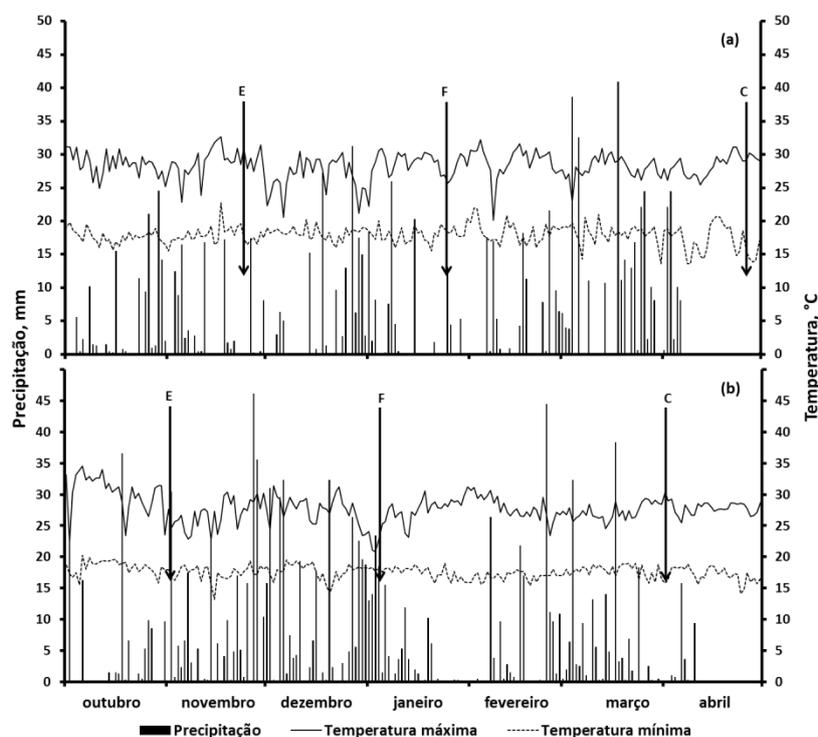
Foram coletadas, no momento do florescimento da soja (cultivar BRSMG 850) no 16º ano e do milho (híbrido simples Pioneer 30F53) no 17º ano, com trado tipo caneca com 10 cm de diâmetro, amostras de solo nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm e 10 a 20 cm, em dois locais (linha e entre-linha), para avaliação de atributos de raiz. Cada amostra foi composta por duas sub-amostras e a amostra coletada na entre-linha foi retirada a uma distância da linha de  $\frac{1}{4}$  do espaçamento da cultura, ou seja, 12,5 cm para a soja e 20 cm para o milho. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e as raízes separadas do solo por lavagem e peneiramento em malha de 0,5 mm, seguida de catação manual em bandeja com água de resíduos vegetais e novo peneiramento em malha de 0,5 mm, sendo que no caso do milho foram descartadas as raízes com diâmetro maior que 2 mm. Após esses procedimentos, uma alíquota de raízes foi separada e acondicionada em solução 30% de álcool etílico em geladeira (4°C) para posterior determinação de área de superfície radicular. O restante das raízes foi levado para estufa para determinação de matéria seca.

A alíquota de raízes mantida em solução alcoólica foi colorida com cloreto de pararosanilina (violeta de genciana) 5 g L<sup>-1</sup>, seca ao ar em papel de germinação e escaneadas. Para determinação de área de superfície radicular, as imagens digitais foram trabalhadas com utilização do software computacional SIARCS® 3.0 (Jorge et al., 1996). Após esses

procedimentos, essa alíquota foi levada para estufa para determinação de matéria seca. Os dados utilizados correspondem à média dos valores obtidos para linha e entre-linha.

No mesmo momento da avaliação de raízes, foi realizada amostragem para avaliação da absorção de P pela soja e milho coletando-se 5 plantas inteiras por parcela e determinado a matéria seca de parte aérea (MSPA) e teor de P (EMBRAPA, 2005), permitindo calcular o P acumulado na parte aérea (PA). A eficiência de utilização de P foi determinada [EUP = MSPA / (PA/MSPA)], conforme proposto por Siddiqi & Glass (1981), enquanto a eficiência de absorção de P foi determinada (EAP = PA / densidade de raízes na camada de 0-20 cm), adaptando o conceito proposto por Elliott & Läuchli (1985).

Ao final do ciclo foi realizada colheita manual da soja e do milho. A precipitação e temperaturas mínima e máxima diárias dos meses cultivados com soja (2009/10 - 16º ano) e milho (2010/11 - 17º ano) são apresentadas na Figura 6.1.



**Figura 6.1.** Precipitação e temperaturas mínima e máxima diárias durante os meses cultivados com soja na safra agrícola 2009/10 (a) e milho na safra agrícola 2010/11 (b), na área experimental, com indicação das datas de emergência das plântulas (E), florescimento (F) e colheita (C). Fonte: Estação Meteorológica da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF.

Para os teores de P no solo e densidade de raízes foi utilizado o modelo:

$$Y_{ijklm} = \mu + B_i + S_j + \text{erro} (ij) + F_k + M_l + FM_{kl} + SF_{jk} + SM_{jl} + SFM_{jkl} + \text{erro} (ijkl) + C_m + SC_{jm} + FC_{km} + MC_{lm} + FMC_{klm} + SFC_{jkm} + SMC_{jlm} + SFMC_{jklm} + \text{erro} (ijklm),$$

Para a matéria seca de parte aérea, P absorvido, eficiência de absorção e utilização e produtividade de grãos foi utilizado o modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + S_j + \text{erro} (ij) + F_k + M_l + FM_{kl} + SF_{jk} + SM_{jl} + SFM_{jkl} + \text{erro} (ijkl),$$

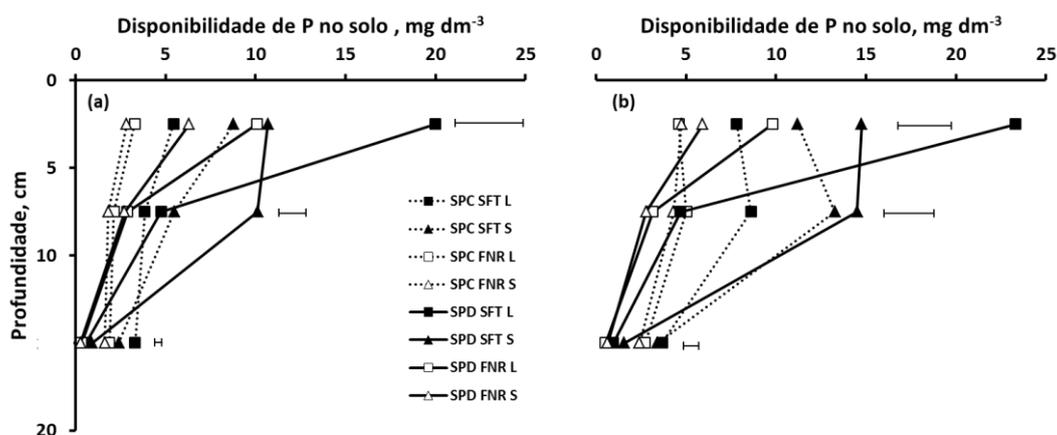
onde:  $\mu$  = média geral dos dados; B = bloco ( $i = 1,2,3$ ); S = Sistema de preparo ( $j = 1,2$ ); F = Fonte de fósforo ( $k = 1,2$ ); M = Modo de aplicação ( $l = 1,2$ ); C = camada ( $m = 1,2,3$ ); Erro = erro experimental.

A análise de variância foi realizada via PROC MIXED do SAS 9.1 e quando apresentou significância o teste de hipótese de Student (t) ( $p < 0,05$ ) foi utilizado para distinção das médias. Os teores de P no solo e densidade de raízes foram modelados utilizando a regressão multivariada em árvore (De'ath, 2002), conforme descrito por Mendes et al. (2012) e considerando camada, sistema, fonte e modo de aplicação como variáveis explanatórias. Além disso, foi realizada análise de regressão linear via PROC GLM do SAS 9.1.

## 6.4. RESULTADOS

### 6.4.1 Distribuição de fósforo e raízes no solo

Os diferentes manejos da adubação fosfatada alteraram os teores de P até a camada de 10 cm no SPD e 20 cm no SPC, para os dois momentos avaliados (Figura 6.2).

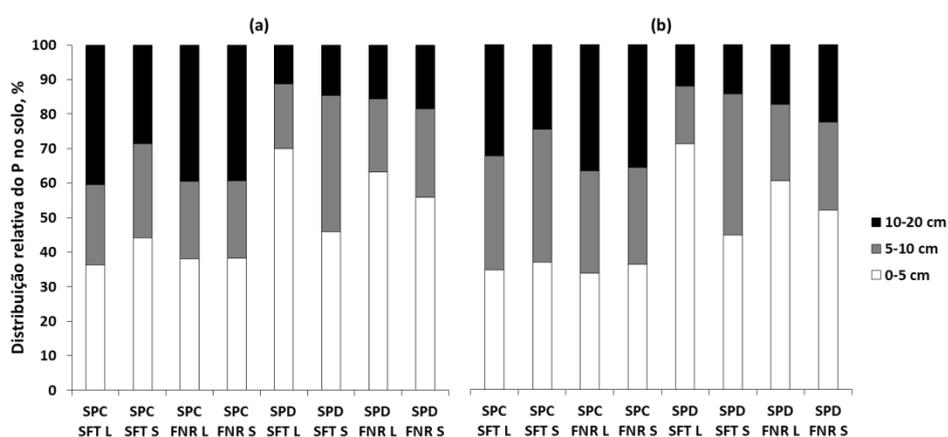


**Figura 6.2.** Disponibilidade de P (Bray 1) em três camadas de um Latossolo Vermelho muito argiloso em diferentes sistemas de manejo de solo e da adubação fosfatada aos 14 anos (a) e 17 anos (b) de cultivo. SPC - sistema de preparo convencional; SPD - sistema plantio direto; SFT - superfosfato triplo; FNR - fosfato natural reativo; aplicação à lanço na superfície (L); aplicação no sulco de semeadura (S). Barras horizontais indicam o DMS pelo teste t a 5%.

No SPC, quando a fonte foi o SFT, a adubação no sulco apresentou teores semelhantes ou maiores do que a adubação a lanço em todas as camadas avaliadas e nos dois momentos, com exceção para a camada de 10-20 cm avaliada aos 14 anos. No SPD, quando a fonte foi o SFT, a adubação no sulco proporcionou teores de P menores em relação aos observados para adubação à lanço na camada de 0-5 cm, ocorrendo o oposto para a camada de 5-10 cm. Quando a fonte foi o FNR, para os dois sistemas e nos dois momentos avaliados não se

observou diferença entre os modos de aplicação, com exceção para a camada de 0-5 cm no SPD, quando a aplicação a lanço resultou em maiores teores em relação à aplicação no sulco. Além disso, maiores teores de P no SPD em relação ao SPC ocorreram na camada de 0-5 cm para aplicação a lanço e 5-10 cm para aplicação no sulco. Na camada de 10-20 cm houve maiores teores de P no SPC para todos os manejos de adubação fosfatada.

Os teores de P apresentaram distribuição mais homogênea na camada de 0-20 cm no SPC, enquanto no SPD houve forte gradiente em profundidade (Figura 6.3), com exceção para SFT aplicado no sulco de semeadura. No SPD, quando adubado com SFT ou FNR aplicados a lanço, mais de 60% do teor de P está localizado nos primeiros 5 cm de profundidade, enquanto que a adubação no sulco de semeadura, principalmente com SFT, proporciona distribuições mais equilibradas até 10 cm de profundidade, havendo importante participação da camada de 5-10 cm, onde é realizada a adubação.

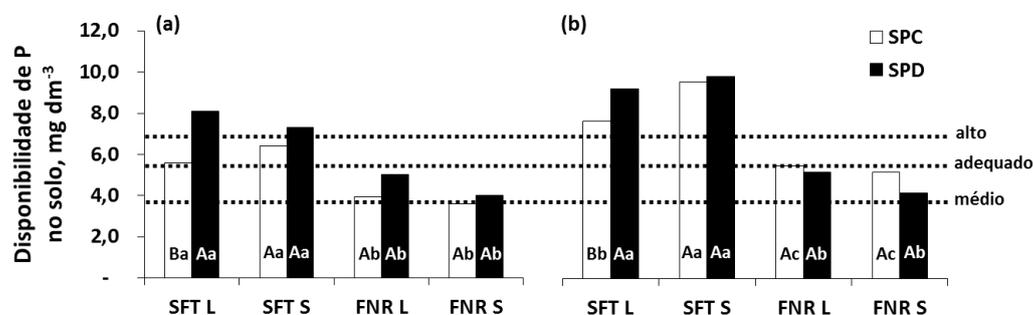


**Figura 6.3.** Distribuição relativa do teor de P disponível (Bray 1) em três camadas de um Latossolo Vermelho muito argiloso em diferentes sistemas de manejo de solo e da adubação fosfatada aos 14 anos (a) e 17 anos (b) de cultivo. SPC - sistema de preparo convencional; SPD - sistema plantio direto; SFT - superfosfato triplo; FNR - fosfato natural reativo; aplicação à lanço na superfície (L); aplicação no sulco de semeadura (S).

Na média ponderada até 20 cm de profundidade a disponibilidade de P foi menor no SPC em relação ao SPD apenas para o SFT aplicado a lanço incorporado (Figura 6.4). Nos dois sistemas de manejo de solo a adubação com SFT proporcionou maior disponibilidade de P em relação ao FNR, para o mesmo modo de aplicação, enquanto que, para a mesma fonte, não houve efeito do modo de aplicação, com exceção da avaliação feita aos 17 anos, quando o SFT no sulco proporcionou maior disponibilidade de P em relação a aplicação a lanço.

A disponibilidade de P pode ser considerada adequada (teor de P necessário para atingir entre 80% e 90% da máxima produtividade), de acordo com a calibração para a região do Cerrado (Sousa, D.M.G., dados não publicados), no SPC adubado com SFT nos dois modos de aplicação e alta (teor de P necessário para atingir mais que 90% da máxima

produtividade) no SPD adubado com SFT nos dois modos de aplicação, quando avaliada aos 14 anos do experimento. Aos 17 anos, em SPC e SPD adubados com SFT a disponibilidade é alta. Por outro lado, nos dois momentos avaliados a disponibilidade de P pode ser considerada média (teor de P necessário para atingir entre 60% e 80% da máxima produtividade) em SPC e SPD adubados com FNR nos dois modos de aplicação.



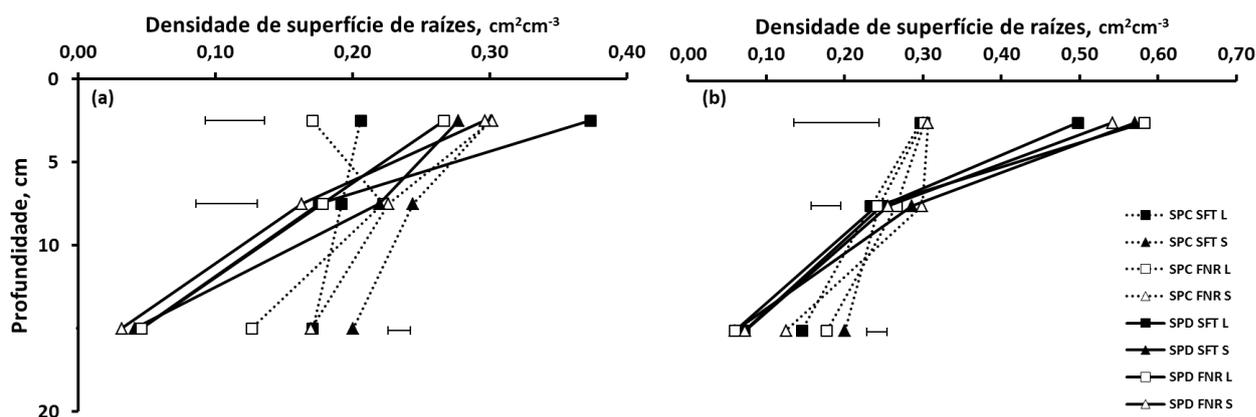
**Figura 6.4.** Disponibilidade de P (Bray 1) na camada de 0-20 cm em um Latossolo Vermelho muito argiloso em diferentes sistemas de manejo de solo e da adubação fosfatada aos 14 anos (a) e 17 anos (b) de cultivo. SPC - sistema de preparo convencional; SPD - sistema plantio direto; SFT - superfosfato triplo; FNR - fosfato natural reativo; aplicação à lanço na superfície (L); aplicação no sulco de semeadura (S). Barras representam a média ponderada das camadas de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm. Linhas tracejadas indicam o teor mínimo de cada classe de interpretação de acordo com calibração para a região do Cerrado (Sousa, D.M.G., dados não publicados). Letras maiúsculas comparam sistemas dentro de cada manejo de adubação e minúsculas comparam manejos de adubação dentro de cada sistema, a 5% pelo teste t.

A distribuição de raízes de soja e milho na camada de 0-20 cm, avaliada por meio da densidade de superfície, mesmo no 16º ou 17º cultivo ainda é influenciada pelo sistema de manejo de solo e da adubação fosfatada (Figura 6.5). Essa influência foi observada até a profundidade de 10 cm no SPD e 20 cm no SPC, para as duas culturas avaliadas.

No SPC, a densidade de superfície de raízes de soja foi maior com aplicação do fertilizante no sulco em relação à aplicação a lanço para todas as camadas avaliadas e nas duas fontes, com exceção para a camada de 5-10 cm com aplicação de FNR. Além disso, nesse sistema, para o mesmo modo de aplicação, observou-se semelhante densidade de raízes de soja para o SFT em relação ao FNR até 10 cm de profundidade e maior densidade na camada de 10-20 cm. No SPD, quando a fonte foi o SFT, a adubação no sulco proporcionou densidade de superfície de raízes de soja menores em relação aos observados para adubação à lanço na camada de 0-5 cm, ocorrendo o oposto para a camada de 5-10 cm. Neste mesmo sistema não se observou diferenças na densidade de raízes de soja quando a fonte utilizada foi o FNR. Além disso, observou-se maior densidade de raízes de soja utilizando o SFT em relação ao FNR, na camada de 0-5 cm para aplicação a lanço e 5-10 cm para aplicação no sulco.

A densidade de superfície de raízes de milho apresentou menores alterações em função do manejo da adubação fosfatada. No SPC, houve diferenças na camada 5-10 cm, com a aplicação no sulco apresentando maior densidade de superfície de raízes que a aplicação a lanço para SFT. Já na camada de 10-20 cm, a aplicação a lanço gerou maior densidade de superfície de raízes que a aplicação no sulco para FNR. Além disso, na camada de 10-20 cm o FNR apresentou maior densidade de raízes de milho para aplicação a lanço e menor para aplicação no sulco, ambos em relação ao SFT. No SPD a densidade de superfície apresentou alteração apenas na camada de 5-10 cm com o SFT aplicado no sulco proporcionando maior densidade de raízes em relação à aplicação à lanço.

A densidade de raízes de soja e milho foi maior no SPD em relação ao SPC apenas na camada de 0-5 cm, sendo que, na soja, isso ocorreu apenas para aplicações a lanço, e no milho, para todos os tratamentos. Por outro lado, a densidade de raízes de soja e milho foi maior na camada de 10-20 cm no SPC em relação ao SPD para todos os manejos de adubação.

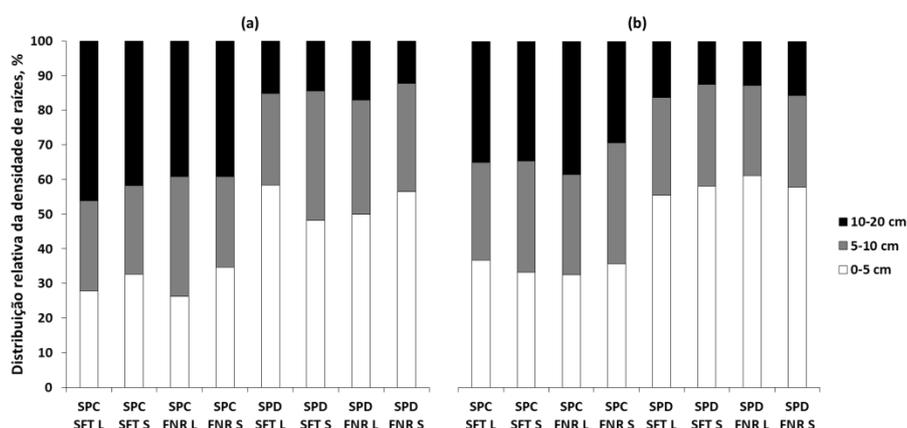


**Figura 6.5.** Densidade de superfície de raízes de soja (a) e milho (b) em três camadas de um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado em diferentes sistemas de manejo de solo e da adubação fosfatada. SPC - sistema de preparo convencional; SPD - sistema plantio direto; SFT - superfosfato triplo; FNR - fosfato natural reativo; aplicação à lanço na superfície (L); aplicação no sulco de semeadura (S). Barras horizontais indicam o DMS pelo teste t a 5%.

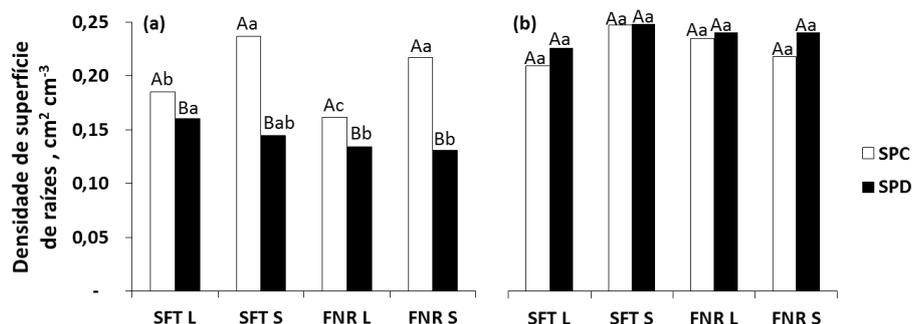
Observou-se distribuição mais homogênea da densidade de superfície de raízes de soja e milho na camada de 0-20 cm no SPC e forte gradiente em profundidade no SPD, mesmo com a aplicação no sulco de semeadura (Figura 6.6). No SPD, entre 48% e 61% das raízes de soja e milho estavam localizadas nos primeiros 5 cm de profundidade, enquanto no SPC este valor ficou entre 26% e 37%.

Avaliando a média ponderada da camada de 0-20 cm (Figura 6.7), o SPC apresentou maior densidade de raízes de soja em relação ao SPD para todos os manejos de adubação fosfatada. Além disso, no SPC os tratamentos com aplicação no sulco apresentaram maior

densidade de raízes de soja em relação à aplicação a lanço. Por outro lado, a densidade de superfície de raízes de milho foi semelhante nos dois sistemas e para os diferentes manejos de adubação fosfatada dentro de cada sistema, na camada de 0-20 cm.

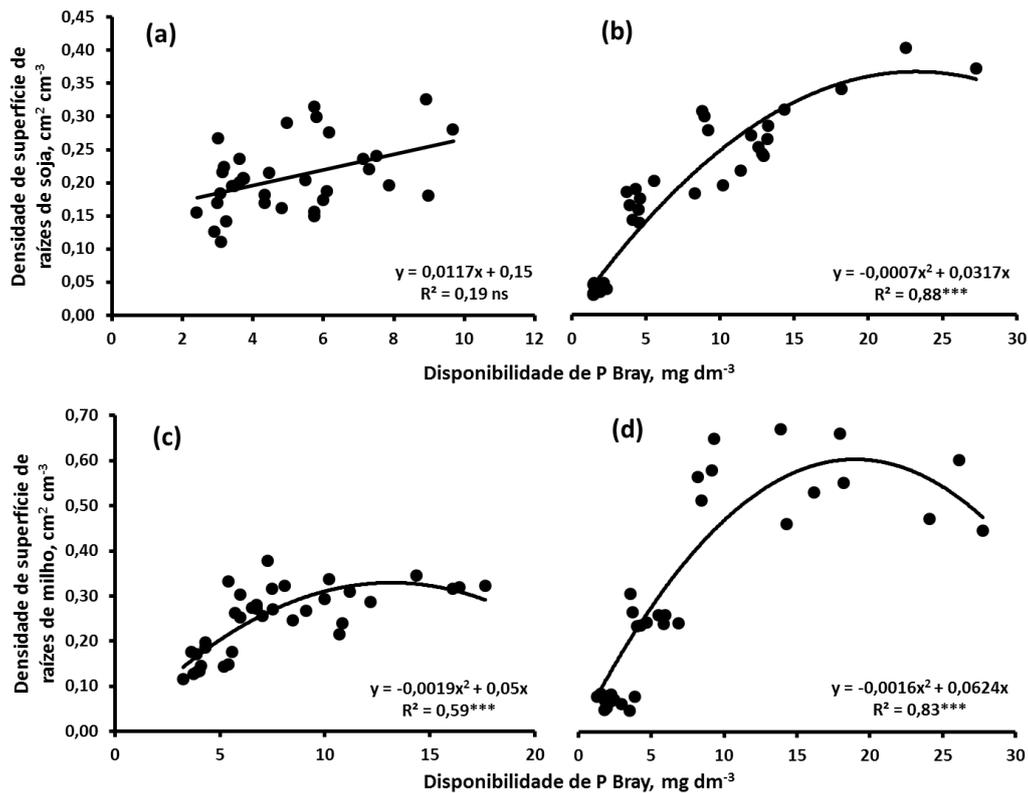


**Figura 6.6.** Distribuição relativa da densidade de superfície de raízes de soja (a) e milho (b) em três camadas de um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado em diferentes sistemas de manejo de solo e da adubação fosfatada. SPC - sistema de preparo convencional; SPD - sistema plantio direto; SFT - superfosfato triplo; FNR - fosfato natural reativo; aplicação à lanço na superfície (L); aplicação no sulco de semeadura (S).



**Figura 6.7.** Densidade de superfície de raízes de soja (a) e milho (b) na camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado em diferentes sistemas de manejo de solo e da adubação fosfatada. SPC - sistema de preparo convencional; SPD - sistema plantio direto; SFT - superfosfato triplo; FNR - fosfato natural reativo; aplicação à lanço na superfície (L); aplicação no sulco de semeadura (S). Barras representam a média ponderada das camadas de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm. Letras maiúsculas comparam sistemas dentro de cada manejo de adubação e minúsculas comparam manejos de adubação dentro de cada sistema, a 5% pelo teste t.

De modo geral, a distribuição do sistema radicular das culturas segue a mesma tendência observada para a disponibilidade de P no solo, uma vez que existe íntima relação entre os dois fenômenos. No entanto, observou-se que enquanto no SPD a disponibilidade de P no solo influenciou a distribuição das raízes de soja e milho (Figura 6.8b), no SPC isso ocorreu apenas para o milho (Figura 6.8a).

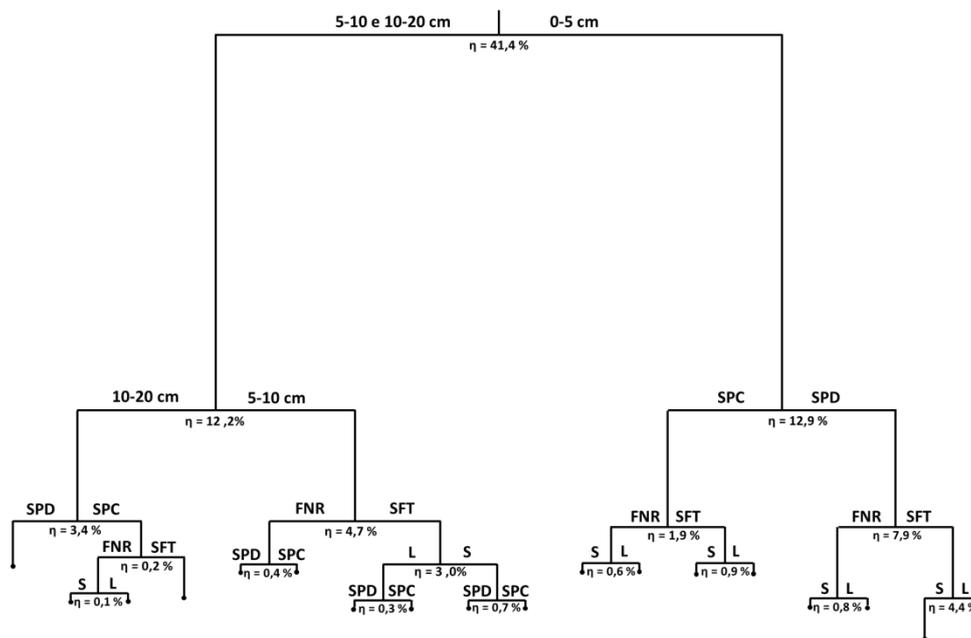


**Figura 6.8.** Relação entre P disponível (Bray 1) e densidade de superfície de raízes de soja em sistema de preparo convencional (a) e plantio direto (b) e milho em sistema de preparo convencional (c) e plantio direto (d) em um Latossolo Vermelho muito argiloso. Pontos representam os valores para a combinação entre fonte do fertilizante (FNR ou SFT), modo de aplicação (sulco ou lanço) e camada (0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm), com três repetições (n = 36). \*\*\* significativo a 0,1% pelo teste F.

Uma forma de integrar todas essas informações e avaliar o peso de cada fator estudado sobre a variabilidade dos dados é empregando a técnica de modelagem por regressão em árvore (Figura 6.9). O modelo selecionado explicou 95,8% da variabilidade dos dados de P extraível por Bray 1 e densidade de superfície de raízes de soja e milho e resultou em 18 grupos, representados pelos nós terminais, envolvendo todos os fatores analisados (sistema, fonte de P, modo de aplicação e profundidade). A profundidade das camadas avaliadas e o sistema de manejo do solo foram os fatores mais importantes, sendo responsáveis respectivamente por 55,9% e 18,5% da explicação do modelo, enquanto a fonte de P e modo de aplicação tiveram papel menos importante (15,3% e 10,2%, respectivamente).

A primeira ramificação resultou na separação da camada de 0-5 cm das demais e a fração da variabilidade total explicada ( $\eta$ ) nessa ramificação foi de 41,4%. Em seguida ocorre a separação das camadas de 5-10 cm e 10-20 cm, com 12,2% da variabilidade dos dados explicados por esta ramificação. Dentro das camadas de 0-5 cm e 10-20 cm as raízes e P no solo foram sensíveis primariamente ao sistema de manejo do solo ( $\eta = 12,9\%$  e  $3,4\%$ ,

respectivamente). Por sua vez, dentro do SPD na camada de 0-5 cm a fonte de P influencia mais do que o modo de aplicação ( $\eta = 7,9\%$  e  $5,2\%$ , respectivamente), enquanto na camada de 10-20 cm não há influência do manejo da adubação. No SPC a fonte do fertilizante apresenta mais influência em relação ao modo de aplicação, tanto na camada de 0-5 cm ( $\eta = 1,9\%$  e  $1,5\%$ , respectivamente) como na de 10-20 cm ( $\eta = 0,2\%$  e  $0,1\%$ , respectivamente). A camada de 5-10 cm apresentou os sistemas de manejo do solo como o fator menos influente ( $\eta = 1,4\%$ ), tendo a fonte de P e modo de aplicação como fatores mais explicativos ( $\eta = 4,7\%$  e  $3,0\%$ , respectivamente).



**Figura 6.9.** Modelo de regressão em árvore para P disponível (Bray 1) e densidade de superfície de raízes de soja e milho em diferentes camadas de amostragem (0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm), sistema de manejo de solo (sistema de preparo convencional - SPC e plantio direto - SPD), fonte do fósforo (superfosfato triplo - SFT e fosfato natural reativo - FNR) e modo de aplicação (lanço na superfície - L e sulco de semeadura - S).  $\eta$  indica a fração percentual da variabilidade total explicada por cada ramificação.

#### 6.4.2 Produção de biomassa, absorção de fósforo, índices de eficiência e produtividade de soja e milho

No SPC, a produção de biomassa da parte aérea e absorção de P por plantas de soja foi semelhante para os dois modos de aplicação quando a fonte foi o FNR (Tabela 6.1). Por outro lado, a adubação com SFT no sulco de semeadura possibilitou maior produção de biomassa e absorção de P pela soja em comparação com a aplicação a lanço, além de maior absorção de P em relação ao FNR aplicado no sulco. No SPD, além de não haver diferenças entre os manejos da adubação fosfatada para a produção de biomassa de parte aérea e absorção de P da soja, esses parâmetros foram maiores em relação ao SPC, com exceção no SFT aplicado no sulco.

**Tabela 6.1.** Matéria seca na parte aérea (MSPA), fósforo acumulado (PA) na parte aérea no florescimento, índice de eficiência de absorção de fósforo (EAP), índice de eficiência de utilização de fósforo (EUP) e produtividade de grãos de soja (16° cultivo) e milho (17° cultivo) em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado em sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), aplicados à lanço na superfície ou no sulco

		SFT Lanço	SFT Sulco	FNR Lanço	FNR Sulco
----- Soja -----					
MSPA (g / planta)	SPC	27,9 Bb	38,2 Aa	29,6 Ba	32,2 Bab
	SPD	40,7 Aa	40,6 Aa	43,2 Aa	41,8 Aa
PA (mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / planta)	SPC	44,9 Bb	65,4 Aa	50,7 Bab	48,5 Bb
	SPD	71,4 Aa	74,6 Aa	74,3 Aa	71,8 Aa
EAP <sup>(1)</sup> (mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / cm <sup>2</sup> raiz . cm <sup>-3</sup> )	SPC	244,7 Ba	276,5 Ba	314,5 Ba	224,3 Ba
	SPD	446,1 Aa	515,8 Aa	554,4 Aa	554,3 Aa
EUP <sup>(2)</sup> (g <sup>2</sup> / planta . mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	SPC	17,3 Bb	22,4 Aa	17,4 Bb	21,6 Aa
	SPD	23,3 Aa	22,1 Aa	25,2 Aa	24,4 Aa
Produtividade de grãos (kg ha <sup>-1</sup> )	SPC	3.343 Ba	2.951 Bb	3.318 Ba	2.955 Bb
	SPD	4.360 Aa	4.179 Aa	4.163 Aa	3.959 Aa
----- Milho -----					
MSPA (g / planta)	SPC	172,2 Aa	174,3 Aa	162,3 Aa	169,4 Aa
	SPD	164,2 Aa	170,5 Aa	170,8 Aa	174,4 Aa
PA (mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / planta)	SPC	268,6 Aa	266,4 Aa	243,2 Aa	251,4 Aa
	SPD	270,9 Aa	281,6 Aa	259,5 Aa	273,1 Aa
EAP <sup>(1)</sup> (mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / cm <sup>2</sup> raiz . cm <sup>-3</sup> )	SPC	1308,7 Aa	1096,1 Aa	1056,1 Aa	1175,7 Aa
	SPD	1232,1 Aa	1166,4 Aa	1121,3 Aa	1150,9 Aa
EUP <sup>(2)</sup> (g <sup>2</sup> / planta . mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	SPC	110,5 Aa	114,2 Aa	108,9 Aa	114,4 Aa
	SPD	99,9 Aa	103,3 Aa	112,7 Aa	111,9 Aa
Produtividade de grãos (kg ha <sup>-1</sup> )	SPC	12.691 Aa	12.155 Ba	12.321 Aa	12.652 Aa
	SPD	13.451 Aa	13.305 Aa	12.413 Aa	12.475 Aa

Médias seguidas de letras iguais maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, para cada parâmetro, não diferem entre si pelo teste t (p > 0,05).

<sup>(1)</sup> Eficiência de absorção de fósforo: EAP = PA/densidade de superfície de raízes na camada de 0-20 cm avaliadas no florescimento das culturas. <sup>(2)</sup> Eficiência de utilização de fósforo: [EUP = MSPA / (PA/MSPA)]

Não houve diferenças na eficiência de absorção de P (EAP) pela soja entre os diferentes manejos da adubação em SPC ou SPD (Tabela 6.1). No entanto, a EAP da soja foi maior no SPD em relação ao SPC, independentemente do manejo da adubação. A eficiência de utilização do P (EUP) pela soja, que corresponde à capacidade de conversão do P absorvido em biomassa, foi maior com aplicação do fertilizante no sulco em relação à aplicação a lanço, para as duas fontes de P em SPC (Tabela 6.1). Com a adubação no sulco, para as duas fontes no SPC, a EUP foi semelhante àquela observada no SPD. No entanto,

quando a adubação foi realizada a lanço na superfície, o SPD apresentou maior EUP para as duas fontes em relação ao SPC.

Apesar da aplicação do adubo fosfatado no sulco ter proporcionado maior absorção de P pela soja, avaliada no momento do florescimento, ao final do ciclo da cultura foi a aplicação a lanço que proporcionou maiores produtividades no SPC (Tabela 6.1). Por outro lado, no SPD a produção de grãos seguiu a mesma tendência observada para a absorção de P, com ausência de resposta do manejo de adubação fosfatada. Além disso, a maior absorção de P no SPD também resultou em maior produtividade da soja, em relação ao SPC.

Diferentemente do que ocorreu para a soja, a cultura do milho não apresentou diferenças de produção de biomassa de parte aérea, absorção de P e índices de eficiência tanto na comparação entre os manejos da adubação em cada sistema como entre os dois sistemas (Tabela 6.1). Isso influenciou a produtividade de grãos, uma vez que também não se observou diferenças entre os diferentes manejos da adubação fosfatada em SPC e SPD e na comparação entre os dois sistemas apenas a aplicação de SFT no sulco proporcionou maiores produtividade de milho no SPD em relação ao SPC.

## **6.5. DISCUSSÃO**

### **6.4.3 Distribuição de fósforo e raízes no solo**

Enquanto no SPD o solo fertilizado, partículas de fertilizantes não reagidos e resíduos culturais são mantidos na zona de aplicação/deposição, no SPC esses materiais são anualmente revolvidos, resultando numa maior superfície de contato com o solo e favorecendo reações de solubilização, adsorção e mineralização de P. Da mesma forma, a aplicação do fertilizante fosfatado a lanço na superfície confere maior superfície de contato deste com o solo, em relação à aplicação localizada no sulco de semeadura, havendo interação com o sistema de manejo do solo e fonte do fertilizante.

No SPC, o fertilizante aplicado a lanço é incorporado antes do cultivo resultando, num primeiro momento, numa distribuição do P disponível bem contrastante com a aplicação no sulco, que ocorre no momento da semeadura. No entanto, essa diferença não é cumulativa, uma vez que o revolvimento anual tende a igualar o efeito da adubação realizada em anos anteriores. Por reagir com menor volume de solo em relação ao tratamento a lanço, a aplicação do SFT no sulco resulta em maiores teores de P (Figura 6.2). No entanto, esse mesmo raciocínio não ocorre com o FNR, por se tratar de uma fonte de baixa solubilidade, que necessita de maior tempo e superfície de contato com o solo para reagir (Novais et al., 2007).

No SPD, como não há revolvimento, as diferenças entre as aplicações a lanço e no sulco ocorrem de forma mais intensa na camada de aplicação do fertilizante (0-5 cm para aplicação à lanço e 5-10 cm para aplicação no sulco) e tendem a ser crescentes com o tempo, devido ao acúmulo que ocorre a cada ano. É também nessas camadas que o SPD apresenta maior disponibilidade de P em relação ao SPC (Figura 6.2), no qual o solo fertilizado e partículas de fertilizante são revolvidos na camada de 0-20 cm de profundidade, reduzindo a disponibilidade de P em camadas específicas, mas alcançando camadas mais profundas, em relação ao SPD (Figura 6.2).

O revolvimento no SPC também resulta numa distribuição mais homogênea do P no perfil, enquanto no SPD há forte gradiente em profundidade, efeito já bem descrito na literatura (De Maria et al., 1999; Santos & Tomm, 2003; Motomiya et al., 2004) e que é intensificado pela aplicação a lanço na superfície (Figura 6.3). No SPD adubado a lanço, os teores de P na camada 0-5 cm são resultado da própria adubação feita nessa camada e da ciclagem do nutriente pelas culturas ao longo dos anos (Santos & Tomm, 2003), através da decomposição de resíduos vegetais de parte aérea depositados sobre a superfície do solo, bem como do P absorvido pelas raízes, que se concentram nessa camada (Figura 6.6). Nesta mesma condição de manejo, distribuições de P abaixo de 5 cm de profundidade podem ser considerados como resultado de redistribuição do nutriente no solo, pelo efeito da decomposição do P absorvido pelas raízes (Franchini et al., 2004), mobilização de ânions orgânicos (Pavinato et al., 2008), ou pela abertura anual do sulco para plantio das culturas e planta de cobertura.

Apesar das diferenças de distribuição de P (Figura 6.2), o teor médio no perfil analisado foi menor no SPC em relação ao SPD apenas no manejo de adubação que proporcionou a maior possibilidade de reação do P com o solo, ou seja, com a fonte solúvel aplicada a lanço incorporado (Figura 6.4). Dentro do mesmo sistema de manejo de solo, os ganhos do SFT em relação ao FNR, para o mesmo modo de aplicação, refletem a maior solubilidade do SFT. Por sua vez, a ausência de diferença entre os modos de aplicação, para a mesma fonte, indica que apesar de proporcionar zonas de acúmulo em camadas diferentes (Figura 6.2), lanço e sulco se equivalem. Santos et al. (2008) também observaram semelhantes teores de P na camada de 0-20 cm adubada a lanço e no sulco de semeadura com SFT ou FNR, e maiores teores no SFT em relação ao FNR, adubado a lanço ou no sulco.

Uma vez que o crescimento radicular é estimulado na presença de P (Barber, 1995), de modo geral, a distribuição de raízes (Figura 6.5) segue a mesma tendência do que ocorre para os teores de P no solo (Figura 6.2), sendo fortemente influenciada pelo sistema de manejo de solo e adubação fosfatada (Holanda et al., 1998; Costa et al., 2010). Assim, as maiores

densidades de raízes nas camadas de aplicação do fertilizante (0-5 cm para aplicação a lanço e 5-10 cm para aplicação no sulco), principalmente com a fonte solúvel (Figura 6.5), podem ser consideradas fruto dos maiores teores de P (Figura 6.2). Segundo Robinson (1996), as raízes respondem estruturalmente à distribuição e disponibilidade de nutrientes no solo, estimulando o crescimento onde o nutriente é mais prontamente disponível.

Apesar do efeito do revolvimento na estrutura do solo favorecer o crescimento vertical de raízes no SPC (Ball-Coelho et al., 1998) e justificar, em parte, o já conhecido maior crescimento radicular em profundidade no SPC (Hughes et al., 1992), a maior presença de P em profundidade no SPC em relação ao SPD (Figura 6.3) também podem ter influenciado o crescimento radicular mais abundante abaixo de 10 cm de profundidade (Figura 6.6), conforme também observaram Qin et al. (2006). No SPD, observa-se forte gradiente de distribuição de raízes em profundidade, que diferentemente do que ocorreu para o P, não foi atenuado pela aplicação do fertilizante no sulco de semeadura (Figura 6.6). Estes resultados se assemelham aqueles observados por Costa et al. (2009), após 18 anos de cultivo em um Argissolo em SPD, quando cerca de 50% da densidade de raízes de milho encontrava-se na camada superficial do solo, independentemente do modo de aplicação do fertilizante fosfatado. Ball-Coelho et al. (1998), ao observar a concentração superficial de raízes de milho no SPD, sugere que a aplicação a lanço de fertilizantes contendo nutrientes de alta mobilidade e passíveis de lixiviação, como o nitrogênio, seja mais eficiente que no sulco. Da mesma forma, a distribuição superficial de raízes de soja e milho neste estudo indica que no SPD, a aplicação a lanço de fertilizantes contendo nutrientes de baixa mobilidade, como o P, possa ser mais eficiente que no sulco, por permitir maior volume de solo fertilizado em contato com as raízes.

Na média do perfil avaliado, o sistema de manejo do solo e da adubação fosfatada influenciou de forma diferente a densidade de superfície de raízes de soja e milho. A menor densidade de raízes de soja no SPD em relação ao SPC, para todos os manejos de adubação fosfatada (Figura 6.7), reflete que o limitado crescimento de raízes abaixo de 10 cm de profundidade no SPD não foi plenamente compensado por um maior crescimento de raízes na camada superficial, fato que ocorreu para o milho (Figura 6.5). Desta forma, diferentemente do que foi observado por Ball-Coelho et al. (1998), o SPD não apresentou maiores densidade total de raízes no perfil. Apesar disso, a relação entre a distribuição de P disponível e raízes no solo foi maior no SPD em relação ao SPC, principalmente para a soja (Figura 6.8), indicando que o SPD apresenta condição mais favorável à absorção de P por essa cultura. Enquanto no SPD as camadas com maior concentração de P também foram aquelas com maior concentração de raízes de soja e milho, no SPC isso não ocorreu para a soja.

Possivelmente, isso influenciou na menor produção de biomassa, absorção de P, eficiência de absorção e utilização do nutriente e conseqüentemente menor produção de grãos de soja no SPC em relação ao SPD (Tabela 6.1), uma vez que o P é um nutriente limitante de produtividade nos solos de Cerrado (Nunes et al., 2011a).

A maior influência do sistema de manejo do solo nas camadas de 0-5 cm e 10-20 cm (Figura 6.9) se justifica pelo fato de ser nessas camadas onde ocorre o maior contraste entre os sistemas, uma vez que no SPD o P, e conseqüentemente as raízes, são mantidos na camada de 0-5 cm enquanto no SPC o P é revolvido até a camada de 10-20 cm (Figura 6.3), estimulando o crescimento radicular nessa camada (Figura 6.6). Por sua vez, em todas as camadas a fonte de P apresenta maior influência em relação ao modo de aplicação (Figura 6.9), indicando que em sistemas já estabelecidos, a ciclagem de nutrientes provocada pelas raízes e parte aérea das plantas (Santos & Tamm, 2003) tende a minimizar as diferenças promovidas pelo modo de aplicação, enquanto esse efeito para a fonte é mais prolongado.

#### **6.4.4 Produção de biomassa, absorção de fósforo, índices de eficiência e produtividade de soja e milho**

A elevada estratificação de P (Figura 6.3) e raízes (Figura 6.6) no solo no SPD, principalmente com adubação a lanço, não representou restrição à absorção de P e produção das culturas de soja e milho. Neste sistema, não houve qualquer efeito do manejo da adubação (Tabela 6.1). Em SPD já estabelecidos, com fertilidade adequada, não se observam diferenças de produtividade de soja e milho com o P aplicado a lanço ou no sulco (Pavinato & Cereta, 2004; Bergamin et al., 2008; Guareschi et al., 2008; Sousa et al., 2010; Nunes et al., 2011b) de modo que a escolha da melhor estratégia pode ser baseada em outros fatores, como o custo operacional (Matos et al., 2006) ou necessidade de velocidade de plantio. Na comparação entre fontes de P, Richart et al. (2006) e Nunes et al. (2011b) também observaram produtividade semelhante com o uso de fontes fosfatadas solúveis ou naturais reativas, apesar de muitos outros trabalhos relatarem menores produtividades no FNR em relação ao SFT (Oliveira Junior et al., 2008; Fontoura et al., 2010; Frandoloso et al., 2010) de modo que a aplicação antecipada desta fonte tem sido recomendada para contornar as limitações de velocidade de solubilização no SPD (Sousa et al., 2010). No entanto, esses trabalhos foram realizados em sistemas com menor tempo de condução do que no presente estudo, sendo que o tempo pode ser um fator chave no estudo de fontes de solubilização lenta no solo.

Por outro lado, no SPC a cultura da soja apresentou maior MSPA e PA com a aplicação do fertilizante fosfatado no sulco, manejo de adubação que promoveu maior concentração de P no solo (Figura 6.4) e maior crescimento radicular (Figura 6.7). No

entanto, apesar do melhor desempenho até o florescimento, momento em que essas avaliações foram feitas, a produtividade de grãos de soja foi maior com a aplicação do fertilizante a lanço na superfície, indicando que algum efeito do manejo da adubação influenciou tardiamente o comportamento da cultura. Além de influenciada pelo manejo da adubação, o cultivo de soja em SPC apresentou desempenho bem inferior ao observado no SPD, tanto nas avaliações feitas até o florescimento, como ao final do ciclo na produtividade de grãos (Tabela 6.1). Isso parece estar relacionado com a elevada relação entre a distribuição de P no solo e raízes de soja existente no SPD, mas que não ocorre no SPC (Figura 6.8), resultando numa maior EAP e produtividade de grãos, no SPD. Isso fica evidente ao se considerar que a correlação ( $n = 24$ ) entre a EAP e a produtividade de grãos de soja foi significativa a 0,1% pelo teste F ( $r = 0,68$ ). Apesar de nos anos iniciais o SPD não apresentar ganhos de produtividade em relação ao SPC (Schwab et al., 2006), com o passar do tempo as produtividades de soja são maiores no SPD (McGregor et al., 2006; Sousa et al., 2010; Nunes et al., 2011b). A cultura do milho, por sua vez, não sofreu qualquer influência do manejo da adubação fosfatada no SPC, além de apresentar desempenho semelhante ao observado no SPD para quase todos os manejos de adubação, sugerindo que o revolvimento do solo proporcionou uma condição limitante a absorção de P e produção da soja, mas que foi contornada pelo milho. Isso ocorreu possivelmente em função da relação entre a distribuição de P no solo e raízes de milho, observada no SPC (Figura 6.8). Além dessa distribuição radicular mais favorável à absorção do P, sabe-se que o milho apresenta diversos parâmetros de cinética de absorção desse nutriente com vantagem comparativa à soja (Barber, 1995), permitindo absorvê-lo satisfatoriamente em condições que seriam limitantes para essa leguminosa. Como resultado, o sistema radicular do milho apresentou EAP muito superior em relação à soja, principalmente no SPC, com valores cerca de 4,5 vezes maiores no SPC e 2,3 vezes maiores no SPD (Tabela 6.1). Consequentemente, enquanto a soja apresentou ganhos consideráveis de produtividade no SPD em relação ao SPC, para o mesmo manejo de adubação fosfatada (25% a 42%), o milho apresentou produtividades em sua maioria semelhantes e os ganhos quando ocorreram foram menores (9%).

## **6.6. CONCLUSÕES**

1. Enquanto no pantio direto há acentuado gradiente em profundidade, com acúmulo do fósforo disponível na zona de aplicação do fertilizante (0-5 cm para aplicação a lanço e 5-10 cm para aplicação no sulco), o revolvimento do solo no preparo convencional proporciona distribuição mais homogênea no perfil, com maior presença do nutriente abaixo de 10 cm.

2. Apesar das diferenças na distribuição em profundidade, o teor médio de fósforo disponível no perfil é semelhante para o sistema de preparo convencional ou plantio direto e para aplicação do fertilizante a lanço ou no sulco. No entanto, o superfosfato triplo proporciona maior disponibilidade média de fósforo no perfil em relação ao fosfato natural reativo.

3. A disponibilidade de fósforo e a densidade de raízes de soja e milho foram mais influenciadas pelo sistema de manejo de solo, seguido da fonte e do modo de aplicação do fertilizante fosfatado.

4. A distribuição de raízes de soja e milho no solo apresenta elevada relação com a distribuição de fósforo, com exceção para a soja cultivada em sistema de preparo convencional.

5. A produção de biomassa, absorção de fósforo e produção de grãos de soja no sistema de preparo convencional, além de influenciados pelo manejo da adubação fosfatada, apresenta desempenho bem inferior ao plantio direto, fato que não ocorre para o milho, que apresenta maior eficiência de absorção de fósforo em relação à soja.

6. A maior estratificação de fósforo e raízes de soja e milho no solo em plantio direto não representa qualquer limitação à absorção do nutriente e produtividade dessas culturas.

## 7. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1. Em área de disponibilidade muito baixa de fósforo, a produtividade e a eficiência de uso desse nutriente pela soja são afetadas pelo modo de aplicação apenas durante a fase de correção gradual, com maiores produtividades e eficiência de uso do fósforo com aplicação a lanço no sistema de preparo convencional e no sulco no plantio direto. Após o solo estar corrigido com fósforo, apesar da aplicação a lanço no plantio direto proporcionar elevado acúmulo de fósforo e raízes em superfície, não há efeito negativo sobre a absorção do nutriente e produção de grãos soja e milho, possivelmente pela elevada relação entre a distribuição de fósforo e raízes no perfil no plantio direto, bem como pelo acúmulo de formas de maior labilidade na camada superficial deste manejo.

2. A produtividade de grãos e a eficiência de uso do fósforo pela soja e milho são maiores com adubação com superfosfato triplo em relação ao fosfato natural reativo no plantio direto, enquanto no preparo convencional, o comportamento das duas fontes é semelhante. Isso ocorre pela solubilização mais lenta do fosfato natural reativo no plantio direto, resultando em elevado acúmulo de frações associadas à presença de fertilizante não solubilizado, além de o fósforo solubilizado assumir formas adsorvidas menos lábeis do que ocorre com o superfosfato triplo, especialmente com aplicação a lanço.

3. A produtividade de grãos e a eficiência de uso do fósforo pela soja são maiores no sistema de preparo convencional durante a fase de correção gradual e maiores no plantio direto, para a soja e milho, após o solo estar corrigido com fósforo. O aumento da eficiência de uso do fósforo ao longo do tempo no plantio direto ocorre devido ao maior acúmulo de matéria orgânica e fósforo orgânico no solo, bem como acúmulo de fósforo inorgânico em formas mais lábeis nesse sistema conservacionista em relação ao preparo convencional, mesmo com esses fenômenos restritos apenas aos primeiros 10 cm do solo.

4. A eficiência de uso do fósforo aumenta com a participação do milho no esquema de rotação de culturas, por efeitos diretos e indiretos desta planta. O efeito direto está relacionado ao fato do milho promover maior relação entre a distribuição de fósforo e raízes no perfil, favorecendo a absorção do nutriente e produção de grãos mesmo em condições de fertilidade mais adversas. O efeito indireto está relacionado à incorporação de resíduos do milho ao solo, que aumentam a matéria orgânica e fósforo orgânico do solo, impactando na eficiência da cultura subsequente.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMELUNG, W.; RODIONOV, A.; URUSEVSKAJA, I.S.; HAUMAIER, L.; ZECH, W. Forms of organic phosphorus in zonal steppe soils of Russia assessed by  $^{31}\text{P}$  NMR. **Geoderma**, v.103, n.3, p.335-350, 2001.
- AMOS, B.; WALTERS, D.T. Maize root biomass and net rhizodeposited carbon: An analysis of the literature. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.70, n.5, p.1489-1503, 2006.
- ANDA. **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.anda.org.br/index.php?mpg=03.01.00&ver=por>. Acesso em: 31 de março de 2014.
- ANDERSON, G. Assessing organic phosphorus in soil. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Eds.) **The Role of Phosphorus in Agriculture**, Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1980. p.411-431.
- ANDERSON, G.; MALCOLM, R.E. The nature of alkali-soluble soil organic phosphates. **Journal of Soil Science**, v.25, n.3, p.282-297, 1974.
- ANGHINONI, I. **A method for predicting the most efficient phosphate placement for corn using a simulation model**. 1979. 170f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Agronomy Department, Purdue University, West Lafayette, 1979.
- ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.537-562.
- ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.349-353, 1992.
- ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n.5, p.1041-1044, 1980.
- ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes. In: **WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: metodologias e estudo de casos**. Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros costeiros, 1999. p.57-88.
- ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. Suprimento de nutrientes pelo solo e sua absorção pelas plantas. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Genesis, 2004. p.33-43.
- BALDOVINOS, F.; THOMAS, G.W. The effect of soil clay content on phosphorus uptake. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.31, n.5, p.680-682, 1967.

- BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K. Plant nutrient efficiency: Towards the second paradigm. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. (Eds.) **Inter-relação fertilidade do solo, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: SBCS/UFLA, 1999. p.183-204.
- BALL-COELHO, B.R.; ROY, R.C.; SWANTON, C.J. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. **Soil and Tillage Research** v.45, n.3, p.237-249, 1998.
- BARBER, S.A. A diffusion and mass flow concept of soil nutrient availability. **Soil Science**, Baltimore, v.93, n.1, p.39-49, 1962.
- BARBER, S.A. Influence of the plant root on ion movement in soil. In: CARSON, E.W. (Ed.) **The plant root and its environment**. Charlottesville: The University Press of Virginia, 1974. p.526-564.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2.ed. New York: Jonh Wiley & Sons, Inc., 1995. 414p.
- BARRACLOUGH, P.B.; TINKER, P.B. The determination of ionic diffusion coefficients in field soils. I. Diffusion coefficients in sieved soils in relation to water content and bulk density. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.32, n.2, p.225-236, 1981.
- BARROW, N.J. Phosphorus in soil organic matter. **Soils and Fertilizers**, v.24, n.3, p.169-173, 1961.
- BARROW, N.J.; BOLLAND, M.D.A.; ALLEN, D.G. Effect of previous additions of superphosphate on sorption of phosphate. **Australian Journal of Soil Research**, v.36, n.3, p.359-372, 1998.
- BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo com ênfase na matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.3, p.867-694, 1999.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.1, p.105-112, 1997.
- BECK, M.A.; SANCHEZ, P.A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, n.5, p.1424-1431, 1994.
- BERGAMIN, A.C.; SCHLINDWEIN, J.A.; VENTUROSO, L.R.; VALADÃO JÚNIOR, D.D.; CARON, B.O.; SCHMIDT, D. Respostas de duas cultivares de soja à adubação a lanço e em sulco, no município de Rolim de Moura/RO. **Revista de Ciências Agrárias/ Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v.50, n.1, p.155-166, 2008.

- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.1, p.155-163, 2004a.
- BERTOL, I.; GUADAGNIN, J.C.; CASSOL, P.C.; AMARAL, A.J.; BARBOSA, F.T. Perdas de fósforo e potássio por erosão hídrica em um Inceptisol sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.3, p.485-494, 2004b.
- BIELESKI, R.L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. **Annual Review of Plant Physiology**, v.24, p.252-255, 1973.
- BLACK, C.A.; GORING, C.A.I. Organic phosphorus in soils. In: PIERRE, W.H.; NORMAN, A.G. (Eds.) **Soil and fertilizer phosphorus in crop nutrition**, v.4. New York: Academic Press, 1953. p.123-152.
- BLAKE, L.; JOHNSTON, A.E.; POULTON, P.R.; GOULDING, K.W.T. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. **Plant and Soil**, v.254, n.2, p.245-261, 2003.
- BOLLIGER, A.; MAGID, J.; AMADO, T.J.C.; NETO, F.S.; RIBEIRO, M.F.S.; CALEGARI, A.; RALISCH, R.; NEERGAARD, A. Taking Stock Of The Brazilian “Zero-Till Revolution”: A Review Of Landmark Research And Farmers’ Practice. In: SPARKS, D.L. (Ed.) **Advances in Agronomy**, v.91. New York: Academic Press, Inc., 2006. p.47-110.
- BOULDIN, D.R. Mathematical description of diffusion process in the soil-plant system. **Soil Science Society of America Procedures**, Madison, v.25, n.6, p.476-480, 1961.
- BOWMAN, R.A.; COLE, C.V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. **Soil Science**, v.125, n.2, p.95-101, 1978.
- BRAY, R.H.; KURTZ, L.T. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. **Soil Science**, v.59, n.1, p.39-45, 1945.
- BROOKES, P.C.; POWLSON, D.C. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal of the Science Food and Agriculture, London**, v.32, n.7, p.671-674, 1981.
- BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S.; JENKINSON, D.S. Phosphorus in the microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, Heidelberg, v.16, n.2, p.169-175, 1984.
- BUNEMANN, E.K.; SMERNIK, R.J.; MARSCHNER, P.; MCNEILL, A.M. Microbial synthesis of organic and condensed forms of phosphorus in acid and calcareous soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v.40, n.4, p.932-946, 2008.
- CADE-MENUN, B.J.; BERCH, S.M.; PRESTON, C.M.; LAVKULICH, L.M. Phosphorus forms and related soil chemistry of Podzolic soils on northern Vancouver Island. I. A comparison of two forest types. **Canadian Journal of Forest Research**, v.30, n.11, p.1714-1725, 2000.

- CARNEIRO, R.G.; MENDES, I.C.; LOVATO, P.E.; CARVALHO, A.M.; VIVALDI, L.J. Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de Cerrado sob plantio direto e plantio convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.7, p.661-669, 2004.
- CELI, L.; BARBERIS, E. Abiotic stabilization of organic phosphorus in the environment. In: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. (Eds.) **Organic phosphorus in the environment**. Wallingford: CABI, 2005. p.113-132.
- CHANG, S.C.; JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v.84, n.2, p.133-144, 1957.
- CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V.; ALBUQUERQUE, J.A., WOBETO, C. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.4, p.1055-1064, 2002.
- COELHO, A.M.; ALVES, V.M.C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.243-283.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFRS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Séries Históricas Relativas às Safras 1976/77 a 2013/14 de Área Plantada, Produtividade e Produção**. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14\\_03\\_13\\_09\\_09\\_43\\_brasilprodu\\_toseriehist.xls](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_03_13_09_09_43_brasilprodu_toseriehist.xls)>. Acesso em: 13 de abril, 2014.
- CONDRON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.36, n.2, p.199-207, 1985.
- CONDRON, L.M.; NEWMAN, S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments**, v.11, n.5, p.830-840, 2011.
- CONDRON, L.M.; TURNER, B.L.; CADE-MENUN, B.J.; SIMS, J.T.; SHARPLEY, A. N. Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. In: SIMS, J.T.; SHARPLEY, A.N. (Eds.) **Phosphorus: agriculture and the environment**, Agronomy Monograph n.46, 2005. p.87-121.
- CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.893-900, 2003.
- COREY, R.B. Soil test procedures: correlation. In: BROWN, J.R. (Ed.) **Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation**. SSSA Spec. Pub. No 21. Madison: SSSA, 1987. p.15-22.

- COREY, R.B.; SCHULTE, E.E. Factors affecting the availability of nutrients to plants. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D. (Eds.) **Soil testing and plant analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1973. p.23-33
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.527-535, 2003.
- COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E.D. de; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; CAO, E.G.; HOLZSCHUH, M.J. Phosphorus and root distribution and corn growth related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.5, p.1237-1247, 2009.
- COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E.D. de; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; VIEIRA, F.C.B.; MARTINS, A.P.; FERREIRA, E.V.O.; Patterns in phosphorus and corn root distribution and yield in long-term tillage systems with fertilizer application. **Soil and Tillage Research**, v.109, n.1, p.41-49, 2010.
- COWIE, B.A.; HASTIE, M.; HUNT, S.B.; ASGHAR, M.; LACK, D.W. Surface soil nutrient distribution following zero tillage and traditional tillage management. **Proceedings of The Australian Society of Agronomy**, 1996. Disponível em: <[www.regional.org.au/au/asa/1996/contributed/160cowie.htm](http://www.regional.org.au/au/asa/1996/contributed/160cowie.htm)>. Acesso em: 20 de abril de 2014.
- CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v.64, n.3-4, p.197-214, 1995.
- CUNHA, F.J.; CASARIN, V.; PROCHNOW, L.I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira no período de 1988 a 2010. **Informações agronômicas**, Piracicaba, n.135, p.1-7, 2011.
- DALAL, R. C. Soil organic phosphorus. In: BRADY, N.C. (Ed.) **Advances in Agronomy**, v.29. New York: Academic Press, Inc., 1977. p.83-117.
- DANIEL, T.C.; SHARPLEY, A.N.; EDWARDS, D.R.; WEDEPOHL, R.; LEMUNYON, J.L. Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management. **Journal of Soil and Water Conservation (USA)**, v.40, p.30-38, 1994.
- DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. Fósforo, potássio e matéria orgânica em um Latossolo Roxo sob sistemas de manejo com milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, n.3, p.471-477, 1993.
- DE MARIA, I.C.; NNABUDE, P.C.; CASTRO, O.M. Long-term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferrasol in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.51, n.1-2, p.71-79, 1999.
- DE'ATH, G. Multivariate regression trees: a new technique for modeling species-environment relationships. **Ecology**, v.83, n.4, p.1105-1117, 2002.

- DEAN, L.A. An attempted fractionation of the soil phosphorus. **The Journal of Agricultural Science**, v.28, n.2, p.234-246, 1938.
- DICK, W.A. Organic carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations and pH in soil profiles as affected by tillage intensity. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.47, n.1, p.102-107, 1983.
- DUIKER, S.W.; BEEGLE, D.B. Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.88, n.1, p.30-41, 2006.
- EDWARDS, J.H.; BARBER, S.A. Phosphorus uptake rate of soybean roots as influenced by plant age, root trimming, and solution P concentration. **Agronomy Journal**, v.68, n.6, p.973-975, 1976.
- ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v.75, n.4, p.529-538, 1995.
- ELLIOTT, G.C.; LÄUCHLI, A. Phosphorus efficiency and phosphate-iron interactions in maize. **Agronomy Journal**, v.77, n.3, p.399-403, 1985
- ELTZ, F.L.F.; PEIXOTO, R.T.G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, n.2, p.259-267, 1989.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de laboratórios: solo, água, nutrição animal e alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 313p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2013. 353p.
- EMSLEY, J.; HALL, D. **The chemistry of phosphorus: environmental, organic, inorganic, biochemical and spectroscopic aspects**. New York: Harper and Row, 1976. 563p.
- ENWEZOR, W.O. Soil Testing for Phosphorus in Some Nigerian Soils: III. Forms of Phosphorus in Soils of Southeastern Nigeria and Their Relationship to Plant Available Phosphorus. **Soil science**, v.124, n.1, p.27-33, 1977.
- ESSINGTON, M.E.; HOWARD, D.D. Phosphorus availability and speciation in long-term no-till and disk-till soil. **Soil Science**, Baltimore, v.165, n.2, p.144-152, 2000.
- FARES, F.; FARDEAU, J.C.; JACQUIN, F. Quantitative survey of organic phosphorus in different soil types. **Phosphorus in Agriculture**, v.63, p.25-40, 1974.
- FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA - FEBRAPDP. **Evolução da área cultivada no sistema de plantio direto na palha, Brasil**. Disponível em: <<http://www.febrapdp.com.br>>. Acesso em: 17 de julho de 2013.

- FIGUEIREDO, C.C.; RESCK, D.V.S.; CARNEIRO, M.A.C.; RAMOS, M.L.G.; SÁ, J.C.M. Stratification ratio of organic matter pools influenced by management systems in a weathered Oxisol from a tropical agro-ecoregion in Brazil. **Soil Research**, v.51, n.2, p.133-141, 2013.
- FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing soils for phosphorus. In: WESTERMAN, R.L. (Ed.) **Soil Testing and Plant Analysis**. 3.ed. Madison: Soil Science Society of America, Inc., 1990, p.141-180.
- FONTOURA, S.M.V.; VIEIRA, R.C.B.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; MORAES, R.P.D. Eficiência técnica de fertilizantes fosfatados em Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.6, p.1907-1914, 2010.
- FOX, R.L.; KANG, B.T. Influence of phosphorus fertilizer placement and fertilization rate on maize nutrition. **Soil Science**, Baltimore, v.125, n.1, p.34-40, 1978.
- FRANCHINI, J.C.; COSTA, J.M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52p. (Embrapa Soja. Documentos, 327)
- FRANCHINI, J.C.; PAVAN, M.A.; MIYAZAWA, M. Redistribution of phosphorus in soil through cover crop roots. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.47, n.3, p.381-386, 2004.
- FRANDOLOSO, J.F.; LANA, M.C.; FONTANIVA, S.; CZYCZA, R.V. Eficiência de adubos fosfatados associados ao enxofre elementar na cultura do milho. **Revista Ceres**, v.57, n.5, p.686-694, 2010.
- FREITAS-SILVA, F.H.; CAMPOS, J.E.G. Geologia do Distrito Federal. In: **Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal**. Brasília: IEMA- SEMATEC, 1999. CD-ROM.
- FU, Z.; WU, F.; SONG, K.; LIN, Y.; BAI, Y.; ZHU, Y.; GIESY, J. P. Competitive interaction between soil-derived humic acid and phosphate on goethite. **Applied Geochemistry**, v.36, p.125-131. 2013.
- GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fosforo no solo: usos e limitações. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIENCIA DO SOLO. **Tópicos em ciência do solo**, v.8. Viçosa, 2013. p.141-187.
- GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; FLORES, J.P.C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.31, n.4, p.691-699, 2007.

- GREGORY, P. **Plant roots-growth, activity and interaction with Soils**. Oxford: Blackwell Publishing, 2006. 318p.
- GUARESCHI, R.F.; GAZOLLA, P.R.; SOUCHIE, E.L.; ROCHA, A.C. Adubação fosfatada e potássica na semeadura e a lanço antecipada na cultura da soja cultivada em solo de Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, v.29, n.4, p.769-774, 2008.
- GUERTAL, E.A.; ECKERT, D.J.; TRAINA, S.J.; LOGAN, T.J. Differential phosphorus retention in soil profiles under no-till crop production. **Soil Science Society of America Journal**, v.55, n.2, p.410-413, 1991.
- GUGGENBERGER, G.; CHRISTENSEN, B.T.; RUBAEK, G.; ZECH, W. Land-use and fertilization effects on P forms in two European soils: resin extraction and <sup>31</sup>P-NMR analysis. **European Journal of Soil Science**, v.47, n.4, p.605-614, 1996.
- GUO, F.; YOST, R.S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, v.163, n.10, p.822-833, 1998.
- GUO, F.; YOST, R.S.; HUE, N.V.; EVENSEN, C.I.; SILVA, J.A. Changes in phosphorus fractions under intensive plant growth. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, n.5, p.1681-1689, 2000.
- HAAS, H. J.; GRUNES D. L.; REICHMAN, G. A. Phosphorus changes in Great Plains soils as influenced by cropping and manure applications. **Soil Science Society of America Journal**, v.25, n.3, p.214-218, 1961.
- HANCE, R.J.; ANDERSON, G. A comparative study of methods of estimating soil organic phosphate. **Journal of Soil Science**, v.13, n.2, p.225-230, 1962.
- HARGROVE, W.L. Influence of tillage on nutrient uptake and yield of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.77, n.5, p.763-768, 1985.
- HEDLEY, M.J.; KIRK, G.J.R.; SANTOS, M.B. Phosphorus efficiency and the forms of soil phosphorus utilized by upland rice cultivars. **Plant and Soil**, v.158, n.1, p.53-62, 1994.
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.46, n.5, p.970-976, 1982.
- HERNANI, L.C.; KURIHARA, C.H.; SILVA, W.M. Sistemas de manejo do solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.1, p.145-154, 1999.
- HINGSTON, F.J.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. II. Desorption of anions from hydrous oxide surfaces. **Journal of Soil Science**, v.25, p.16-26, 1974.
- HODGE, A.; BERTA, G.; DOUSSAN, C.; MERCHAN, F.; CRESPI, M. Plant root growth, architecture and function. **Plant and Soil**, v.321, n.1-2, p.153-187, 2009.

- HOLANDA, F.S.R.; MENGEL, D.B.; PAULA, M.B.; CARVAHO, J.G.; BERTONI, J.C. Influence of crop rotations and tillage systems on phosphorus and potassium stratification and root distribution in the soil profile. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.29, n.15-16, p.2383-2394, 1998.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência agronômica dos fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.665-687.
- HUE, N.V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, Baltimore, v.152, n.6, p.463-471, 1991.
- HUFFMAN, S.A; COLE, C.V.; SCOTT, N.A. Soil texture and residue addition effects on soil phosphorus transformation. **Soil Science Society of American Journal**, v.60, n.4, p.1095-1101, 1996.
- HUGHES, K.A.; HORNE, D.J.; ROSS, C.W.; JULIAN, J.F. A 10-year maize/oats rotation under three tillage systems. 2. Plant population, root distribution and forage yields. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.22, n.1-2, p.145-157, 1992.
- HUSSAIN, I.; OLSON, K.R.; EBELHAR, S.A. Long-term tillage effects on soil chemical properties and organic matter fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, n.5, p. 1335-1341, 1999.
- IUSS WORKING GROUP WRB. World reference base for soil resources 2006: A framework for international classification, correlation and communication. **World Soil Resources Reports**, n.103. Rome: FAO, 2006. 128p.
- JAKOBSEN, I.; LEGGETT, M.E.; RICHARDSON, A.E. Rhizosphere microorganisms and plant phosphorus uptake. In: SIMS, J.T; SHARPLEY, A.N. (Eds.) Phosphorus: agriculture and the environment, **Agronomy Monograph n.46**, 2005. p.437-494.
- JOHNSTON, A.E.; POULTON, P.R. Yields on the Exhaustion Land and changes in the NPK contents of the soils due to cropping and manuring, 1852-1975. **Rothamsted Experimental Station Report for 1976, Part 2**, 1977. p.53-85.
- JORGE, L.A.C.; RALISCH, R.; ABI-SAAB, O.J.G.; MEDINA, C.C.; GUIMARÃES, M.F.; NEVES, C.S.V.J.; CRESTANA, S.; CINTRA, F.L.D.; BASSOI, L.H.; FERNANDES, S.B.V. Aquisição de imagens de raízes. In: JORGE, L.A.C. (Ed.) **Recomendações práticas para aquisição de imagens digitais através do SIARCS**. São Carlos: EMBRAPA-CNPDI, 1996. p.2-28. (Circular técnica 1)
- JUNGK, A.; BARBER, S.A. Phosphate uptake rate of corn roots as related to the proportion of the roots exposed to phosphate. **Agronomy Journal**, v.66, n.4, p.554-557, 1974.
- KAILA, A. Organic phosphorus in finnish soils. **Soil Science**. v.95, n.1, p.38-44, 1963.
- KAILA, A. Phosphorus in virgin peat soils. **The Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland**, v.28, p.142-167, 1956.

- KANEKO, F.H.; ARF, O.; GITTI, D.C.; TARSITANO, M.A.A.; RAPASSI, R.M.A.; VILELA, R.G. Custos e rentabilidade do milho em função do manejo do solo e da adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.40, n.1, p.102-109, 2010.
- KHASAWNEH, F.E.; HASHIMOTO, I.; SAMPLE, E.C. Reactions of ammonium ortho-and polyphosphate fertilizers in soil: II. Hydrolysis and reactions with soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.43, n.1, p.52-58, 1979.
- KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; HASHIMOTO, I. Reactions of ammonium ortho-and polyphosphate fertilizers in soil: I. Mobility of phosphorus. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.38, n.3, p.446-451, 1974.
- KLEPKER, D. **Distribuição de fósforo e de raízes no solo e sua relação com o estresse hídrico e o crescimento de milho**. 1996. 178f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- KLEPKER, D. **Nutrientes e raízes no perfil e crescimento de milho e aveia em função do preparo do solo e modos de adubação**. 1991. 117f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, n.3, p.395-401, 1995.
- KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Phosphate uptake and corn root distribution as affected by fertilizer placement and soil tillage. **Agronomy (Trends in Agriculture Science)**, Madison, v.1, p.111-115, 1993.
- KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A. Adubação profunda no sistema plantio direto. In: CURSO SOBRE ASPECTOS BÁSICOS DE FERTILIDADE E MICROBIOLOGIA DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 3., 1999, Passo Fundo. **Resumos de palestras: fertilidade do solo em plantio direto**. Passo Fundo, 1999. p.67-69.
- KOVAR, J.L.; BARBER, S.A.; KLADIVKO, E.J.; GRIFFITH, D.R. Characterization of soil temperature, water content, and maize root distribution in two tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.24, n.1, p.11-27, 1992.
- KUNISHI, H.M.; BANDEL, V.A.; MULFORD, F.R. Measurement of available soil phosphorus under conventional and no-till management. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.13, n.8, p.607-618, 1982.
- LEVINE, S.L.; SCHINDLER, D.W. Phosphorus, nitrogen and carbon dynamics of Experimental Lake 303 during recovering from eutrophication. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v.46, n.1, p.2-10, 1989.

- LILIENFEIN, J.; WILCKE, W.; AYARZA, M.A.; VILELA, L.; LIMA, S.C.; ZECH, W..  
Chemical fractionation of phosphorus, sulphur, and molybdenum in Brazilian savannah  
Oxisols under different land use. **Geoderma**, v.96, n.1, p.31-46, 2000.
- LINDSAY, W.L. **Chemical equilibrium in soils**. New York: John Wiley and Sons, 1979.  
449p.
- LINDSAY, W.L.; FRAZIER, A.W.; STEPHENSON, H.F. Identification of reaction products  
from phosphate fertilizers in soils. **Soil Science Society of America Proceedings**,  
Madison, v.26, n.5, p. 446-452, 1962.
- LINDSAY, W.L.; STEPHENSON, H.F. Nature of the reactions of monocalcium phosphate  
monoydrate in soils: IV. Repeated reactions with metastable triple-point solution. **Soil  
Science Society of America Proceedings**, Madison, v.23, n.6, p.440-445, 1959.
- LINDSAY, W.L.; VLEK, P.L.G.; CHIEN, S.H. Phosphate minerals. In: DIXON, J.B.;  
WEED, S.B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. 2.ed. Madison: Soil Science Society  
of America, Inc., 1989. p.1089-1130.
- LINQUIST, B.A.; SINGLETON, P.W.; CASSMAN, K.G. Inorganic and organic phosphorus  
dynamics during a build-up decline of available phosphorus in an Ultisol. **Soil Science**,  
v.162, n.4, p.254-264, 1997.
- LIU, Q.; LOGANATHAN, P.; HEDLEY, M.J.; SKINNER, M.F. The mobilization and fate of  
soil and rock phosphate in the rhizosphere of ectomycorrhizal *Pinus radiata* seedlings in  
an Allophanic soil. **Plant and Soil**, v.264, n.1-2, p.219-229, 2004.
- LOPES, A.S.; SILVA, C.A.P.; BASTOS, A.R.R. Reservas de fosfatos e produção de  
fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.  
(Eds.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.13-34.
- MAGID, J. Vegetation effects on phosphorus fraction in set-aside soils. **Plant and Soil**,  
Dordrecht, v.149, n.1, p.111-119, 1993.
- MAGID, J.; TIESSEN, H.; CONDRON, L.M. Dynamics of organic phosphorus in soils under  
natural and agricultural ecosystems. In: PICCOLO, A. (Ed.) **Humic substances in  
terrestrial ecosystems**. Amsterdam: Elsevier, 1996. p.429-466.
- MAKAROV, M.I.; HAUMAIER, L.; ZECH, W. Nature of soil organic phosphorus: an  
assessment of peak assignments in the diester region of <sup>31</sup>P NMR spectra. **Soil Biology  
and Biochemistry**, v.34, n.10, p.1467-1477, 2002.
- MARTORANO, L.G.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; FARIA, R.T.;  
MIELNICZUK, J.; COMIRAN, F. Indicadores da condição hídrica do solo com soja em  
plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e  
Ambiental**, v.13, p.397-405, 2009
- MATOS, M.A.; SALVI, J.V.; MILAN, M. Pontualidade na operação de semeadura e a  
antecipação da adubação e suas influências na receita líquida da cultura da soja.  
**Engenharia Agrícola**, v.26, p.493-501, 2006.

- McGREGOR, K.C.; CULLUM, R.F.; MUTCHLER, C.K.; JOHNSON, J.R. Long-term no-till and conventional till soybean yields. **Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station Research Report**, n.1146, 2006. p.14.
- McLAUGHLING, M.J.; ALSTON, A.M.; MARTIN, J.K. Phosphorus cycling in wheat-pasture rotations. I. The source of phosphorus taken up by wheat. **Australian Journal of Soil Research**, v.26, n.2, p.323, 1988a.
- McLAUGHLING, M.J.; ALSTON, A.M.; MARTIN, J.K., Phosphorus cycling in wheat-pasture rotations. III. Organic phosphorus turnover and phosphorus cycling. **Australian Journal of Soil Research**, v.26, n.2, p.343, 1988b.
- MENDES, I.C.; FERNANDES, M.F.; CHAER, G.M.; REIS JUNIOR, F.B. Biological functioning of Brazilian cerrado soils under different vegetation types. **Plant and Soil**, v.359, n.1-2, p.183-195, 2012.
- MENDES, I.C.; REIS JUNIOR, F.B.; HUNGRIA, M.; SOUSA, D.M.G.; CAMPO, R.J. Adubação nitrogenada suplementar tardia em soja cultivada em Latossolos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília v.43, n.8, p.1053-1060, 2008.
- MENDES, I.C.; SOUZA, L.V.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Propriedades biológicas em agregados de um Latossolo Vermelho-escuro sob plantio convencional e direto no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.3, p.435-443, 2003.
- MERTEN, G.H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.15, n.3, p.369-374, 1991.
- MESQUITA FILHO, M.V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the cerrado region (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v.58, n.1, p.107-123, 1993.
- MEURER, E.L.; RHEINHEIMER, D.S.; BISSANI, C.A. Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E.J. (Ed.) **Fundamentos de química do solo**. 2.ed. Porto Alegre: Gênese, 2004. p.131-179.
- MIRANDA, L.N.; De MIRANDA, J.C.C.; REIN, T.A.; GOMES, A.C. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.6, p.563-572, 2005.
- MODEL, N.S.; ANGHINONI, I. Resposta do milho a modos de aplicação de adubos e técnicas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, n.1, p.55-59, 1992.
- MOLLIER, A.; PELLERIN, S. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 50, n.333, p. 487-497, 1999.
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2002. 625p.

- MOTOMIYA, W.R.; FABRÍCIO, A.C.; MARCHETTI, M.E.; GONÇALVES, M.C.; ROBAINA, A.D.; NOVELINO, J.E. Métodos de aplicação de fosfato na soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.04 p.307-312, 2004.
- MULIA, R.; DUPRAZ, C.; VAN NOORDWIJK, M. Reconciling root plasticity and architectural ground rules in tree root growth models with voxel automata. **Plant and Soil** v.337, n.1-2, p. 77-92, 2010.
- MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, v.27, p.31-36, 1962.
- MUZILLI, O. Influência do sistema plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.95-102, 1983.
- NEUFELDT, H.; SILVA, J.E.; AYARZA, M.A.; ZECH, W. Phosphorus fractions under different land-use systems in Oxisols of the Brazilian cerrados. In: THOMAS, R.; AYARZA, M.A. (Eds.) **Sustainable land management for the Oxisols of the Latin American savannas: dynamics of soil organic matter and indicators of soil quality**. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 1999. p.146-158.
- NEWMAN, R.H.; TATE, K.R. Soil phosphorus characterisation by  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.11, n.9, p.835-842, 1980.
- NICOLODI, M. **Evolução da noção da fertilidade e sua percepção como uma propriedade emergente do sistema solo**. 2007. 140f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; SALET, R.L. Alternativa à coleta de uma seção transversal, com pá de corte, na largura da entrelinha, na amostragem do solo em lavouras com adubação em linha no sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v.69, p.22-28, 2002.
- NICOLODI, M.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I.; MARRE, J.; MIELNICZUK, J. Insuficiência do conceito mineralista para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas cultivadas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2735-2744, 2008.
- NOACK, S.R.; McBEATH, T.M.; McLAUGHLIN, M.J.; SMERNIK, R.J.; ARMSTRONG, R.D. Management of crop residues affects the transfer of phosphorus to plant and soil pools: Results from a dual-labelling experiment. **Soil Biology and Biochemistry**, v.71, p.31-39, 2014.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In. NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds.) **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-550.

- NUNES, R.S.; LOPES, A.A.C.; SOUSA, D.M.G.; MENDES, I.C. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em latossolo de Cerrado com a sucessão soja-milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.4, p.1407-1419, 2011a.
- NUNES, R.S.; SOUSA, D.M.G.; GOEDERT, W.J.; VIVALDI, L. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.3, p.877-888, 2011b.
- NUNES, R.S.; SOUSA, D.M.G.; GOEDERT, W.J.; SOARES, J.R.R. Impacto dos Sistemas de Plantio Direto e Preparo Convencional nas Interações entre Matéria Orgânica e Fertilidade do Solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9., SIMPÓSIO INTERNACIONAL SAVANAS TROPICAIS, 2., 2008, Brasília. **Anais...** 6p.
- NYE, P.H.; TINKER, P.B. **Solute movement in the soil-root system**. Berkeley: University of California Press, 1977. 342p.
- NZIGUHEBA, G.; PALM, C.A.; BURESH, R.J.; SMITHSON, P.C. Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.198, n.2, p.159-168, 1998.
- O'HALLORAN, I.P.; STEWASRT, J.W.B.; KACHANOSKI, R.G. Influences of texture and management practices on the forms and distribution of soil phosphorus. *Canadian Journal of Soil Science*, v.67, n.1, p.147-163, 1987.
- OHNO, T.; ERICH, M. S. Inhibitory effects of crop residue-derived organic ligands on phosphate adsorption kinetics. **Journal of Environmental Quality**, v.26, n.3, p.889-895, 1997.
- OLIVEIRA JUNIOR, A.; PROCHNOW, L.I.; KLEPKER, D. Eficiência agronômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.5, p.623-631, 2008.
- OLIVEIRA, M.R.G.; Van NOORDWIJK, M.; GAZE, S.R.; BROUWER, G. Auger sampling, ingrowth cores, and pinboard methods. In: SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS C.; Van NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; Van de GEIJN, S.C. (Eds.) **Root methods: a handbook**. Berlin: Springer-Verlag, 2000. p.175-210.
- OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E. Phosphorus. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, Q. R. (Eds.) **Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties**. 2.ed. Madison: ASA, SSSA, 1982. p.403-430.
- OLSEN, S.R.; KEMPER, W.D. Movement of nutrients to plant roots. In: NORMAN, A.G. (Ed.) **Advances in Agronomy**, v.10. New York: Academic Press, Inc., 1968. p.91-151.
- OLSEN, S.R.; WATANABE, F.S. Diffusion of phosphorus as related to soil texture and plant uptake. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.27, n.6, p.648-653, 1963.
- OLSEN, S.R.; WATANABE, F.S. Diffusive supply of phosphorus in relation to soil textural variations. **Soil Science**, Baltimore, v.110, n.5, p.318-327, 1970.

- PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. In: BRADY, N.C. (Ed.) **Advances in Agronomy**, v.30. New York: Academic Press, Inc., 1978. p.01-46.
- PAVINATO, P.S.; CERETTA, C.A. Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.6, p.1779-1784, 2004.
- PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Organic compounds from plant extracts and their effect on soil phosphorus availability. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.10, p.1379-1388, 2008.
- PAVINATO, S.P.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil and Tillage Research**, v.105, n.1, p.149-155, 2009.
- PEDERSEN, P.; LAUER, J.G. Corn and soybean response to rotation sequence, row spacing, and tillage system. **Agronomy Journal**, Madison, v.95, n.1, p.965-971, 2003.
- PEDÓ, F. **Rendimento e distribuição de raízes de seis espécies de plantas em dois níveis de compactação do solo**. 1986. 92f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.
- PEREIRA, R.G.; ALBUQUERQUE, A.W.; CAVALCANTE, M.; PAIXÃO, S.L.; MARACAJÁ, P.B. Influência dos sistemas de manejo do solo sobre os componentes de produção do milho e brachiaria decumbens. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.22, n.1, p.64-71, 2009.
- PIERRE, W. H.; PARKER F.W. Soil phosphorus studies: II. The concentration of organic and inorganic phosphorus in the soil solution and soil extracts and the availability of the organic phosphorus to plants. **Soil Science**, v.24, n.2, p.119-128, 1927.
- PROCHNOW, L.I.; ALCARDE, J.C.; CHIEN, S.H. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds.) **Fósforo na Agricultura Brasileira**, Piracicaba: Potafos, 2004. p.605-663.
- QIN, R.; STAMP, P.; RICHNER, W. Impact of tillage on maize rooting in a Cambisol and Luvisol in Switzerland. **Soil and Tillage Research**, v.85, n.1, p.50-61, 2006.
- QUALLS, R.G.; RICHARDSON, C.J. Forms of soil phosphorus along a nutrient enrichment gradient in the northern Everglades. **Soil Science**, v.160, n.3, p.183-198, 1995.
- RANDALL, G.W.; HOEFT, R.G. Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizers: A review. **Journal of Production in Agriculture**, Madison, v.1, n.1, p.70-79, 1988.
- REDEL, Y.D.; RUBIO, R.; ROUANET, J.L.; BORIE, F. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. **Geoderma**, v.139, n.3, 388-396, 2007.

- REIN, T.A. **Surface chemical properties and nitrate adsorption of oxisols from the Brazilian savannas**. 2008. 509f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculty of the Graduate School, Cornell University, Ithaca, 2008.
- RESENDE, A.V. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado**. 2004. 169f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.1, p.151-160, 2001.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, n.15-16, p.2339-2354, 2003.
- RICHART, A.; LANA, M.C.; SCHULZ, L.R.; BERTONI, J.C.; BRACCINI, A.L. Disponibilidade de fósforo e enxofre para a cultura da soja na presença de fosfato natural reativo, superfosfato triplo e enxofre elementar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.4, p.695-705, 2006.
- RIXON, A.J. Soil Fertility changes in a red-brown earth under irrigated pastures: II Changes in phosphorus. **Australian Journal of Agriculture Research**, v.17, n.3, p.317-325, 1966.
- ROBINSON, D. Variation, co-ordination and compensation in root systems in relation to soil variability. **Plant and Soil**, v.187, n.1, p.57-66, 1996.
- RUEDELL, J. **Plantio direto na região de Cruz Alta**. Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 1995. 134p
- RUSSELL, E.W. **Soil conditions and plant growth**. 10.ed. New York: Green, 1973. 263p.
- SAMPLE, E.C.; KHASAWNEH, F.E.; HASHIMOTO, I. Reactions of ammonium ortho- and polyphosphate fertilizers in soil: III. Effects of associated cations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.43, n.1, p.58-65, 1979.
- SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J.; RACZ, G.J. Reactions of phosphate fertilizers in soil. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Eds.) **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1980. p.263-310.
- SANTOS, H.P.; LHAMBY, J.C.B.; SPERA, S.T. Rendimento de grãos de soja em função de diferentes sistemas de manejos de solo e de rotação de culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.21-29, 2006.
- SANTOS, H.P.; TOMM, G.O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. **Ciência Rural**, v.33, p.477-486, 2003.
- SANTOS, H.P.; TOMM, G.O.; KOCHHANN, R.A. Rendimento de grãos de milho em função de diferentes sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.9, n.3, p.251-256, 2003.

- SANTOS, J.Z.L.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A.V.; CURI, N.; CARNEIRO, L.F.; COSTA, S.E.V.G.A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.705-714, 2008.
- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BALBINOT Jr., A.A.; BATISTELA, O. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II. Perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.437-447, 2000b.
- SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT Jr., A.A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.427-436, 2000a.
- SCHWAB, G.J.; WHITNEY, D.A.; KILGORE, G.L.; SWEENEY, D.W. Tillage and Phosphorus Management Effects on Crop Production in Soils with Phosphorus Stratification. **Agronomy Journal**, v.98, n.3, p.430-435, 2006.
- SELLES, F.; KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; ZENTNER, R. P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian oxisol under different tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.44, n.1, p.23-34, 1997.
- SHARPLEY, A.N. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.49, n.4, p.905-911, 1985.
- SHARPLEY, A.N.; SMITH, S.J. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.49, n.1, p.127-130, 1985.
- SHARPLEY, A.N.; TIESSEN, H.; COLE, C.V. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, n.2, p.362-365, 1987.
- SHEAR, G.M.; MOSCHLER, W.W. Continuous corn by the no-tillage and conventional tillage methods: a six-year comparison. **Agronomy Journal**, v.61, n.4, p.524-526, 1969.
- SIBANDA, H.M.; YOUNG, S.D. Competitive adsorption of humic acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. *Journal of Soil Science*, v.37, n.2, p.197-204, 1986.
- SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D. Utilization Index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.4, n.3, p.289-302, 1981.
- SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, n.3, p.249-254, 1985.

- SILVA, M.A.; NÓBREGA, J.C.A.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; SÁ, J.J.G.; MARQUES, M.; MOTTA, P.E.F. Frações de fósforo em Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, n.10, p.1197-1207, 2003.
- SMECK, N.E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. **Geoderma**, v.36, n.1, p.185-199, 1985.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 11.ed. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2010. 338p.
- SOLOMON, D.; LEHMANN, J.; MAMO, T.; FRITZSCHE, F.; ZECH, W. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands. **Geoderma**, v.105, n.1, p.21-48, 2002.
- SOUSA, D.M.G. **Reações de grânulos de superfosfato triplo em solos e seus efeitos imediatos e residuais sobre as culturas**. 1980. 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.
- SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Planaltina: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416p.
- SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D.M.G., LOBATO, E. (Eds.) **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Planaltina: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.147-168.
- SOUSA, D.M.G.; REIN, T.A.; GOEDERT, W.J.; LOBATO, E.; NUNES, R.S. Fósforo. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. (Eds.) **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: volume 2, nutrientes**. Piracicaba: INPI - Brasil, 2010. p.67-132.
- SOUSA, D.M.G.; VOLKWEISS, S.J. Efeito residual do superfosfato triplo aplicado em pó e em grânulos no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n.1, p.141-146, 1987a.
- SOUSA, D.M.G.; VOLKWEISS, S.J. Reações do superfosfato triplo em grânulos com solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n.1, p.133-140, 1987b.
- SOUZA, E.D. **Evolução da matéria orgânica, do fósforo e da agregação do solo em sistema de integração agricultura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo**. 2008. 182f. Tese (Doutorado em Ciência do solo) - Programa de Pós Graduação em Ciência do solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- SOUZA, L.M.; SCHLEMMER, F.; ALENCAR, P.M.; LOPES, A.A.C.; PASSOS, S.R.; XAVIER, G.R.; FERNANDES, M.F.; MENDES, I.C.; REIS JUNIOR, F.B. Estrutura metabólica e genética de comunidades bacterianas em solo de cerrado sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.2, p.269-276, 2012.
- STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. **Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1999. 427p.

- STEWART, J.W.B.; SHARPLEY, A.N. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. In: FOLLETT, R.F.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V.; POWER, J.F. (Eds.) **Soil Fertility and organic matter as critical components of production systems**. Madison: Soil Science Society of America, Inc., 1987. p.101-121.
- STEWART, J.W.B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, Netherlands, v.4, n.1, p.41-60, 1987.
- SYERS, J.K.; JOHNSTON, A.E.; CURTIN, D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. **FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin**, n.18. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 108p.
- THOMAS, G.W; PEASLEE. Testing soils for phosphorus. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D. (Eds.) **Soil Testing and Plant Analysis**. 1.ed. Madison: Soil Science Society of America, Inc., 1973. p.111-132.
- TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D.S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil and Tillage Research**, v.124, p.57-67, 2012a
- TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; CALEGARI, A. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.1, p.271-281, 2012b.
- TIESSEN, H.; MOIR, J.O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M.R.; GREGORICH, E.G. (Eds.) **Soil Sampling and Methods of Analysis**. 2.ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. p.293-306.
- TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, n.4, p.853-858, 1984.
- TOKURA, A.M.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C.H.; ALOVISI, A.A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.7, n.10, p.1467-1476, 2002.
- TURNER, B.L.; PAPHAZY, M.J.; HAYGARTH, P.M.; MCKELVIE, I.D. Inositol phosphates in the environment. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. Series B: Biological Sciences, v.357, n.1420, p.449-469, 2002.
- UEHARA, G.; GILLMAN, G.P. **The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge**. Boulder: Westview Press, Inc., 1981. 188p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Methods of chemical analysis for water and wastes**. Cincinnati: USEPA, 1971. 312p.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Mineral commodity summaries**. Reston: USGS, 2014. 196p.

- VEZZANI, F.M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- VILELA, L.; SOUSA, D.M.G.; SILVA, J.E. da. Adubação potássica. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Eds.) **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.169-183.
- WALKER, T.W.; ADAMS, A.F.R. Studies on soil organic matter: II. Influence of increased leaching at various stages of weathering on levels of carbon, nitrogen, sulfur, and organic and total phosphorus. **Soil Science**. v.87, n.1, p.1-10, 1959.
- WEIL, R.R.; BENEDETTO, P.W.; BANDEL, V.A.; SIKORA, L.J. Influence of tillage practices on phosphorus distribution and forms in three Ultisols. **Agronomy Journal**, v.80, n.3, p.503-509, 1988.
- WHITE, R.E. Retention and release of phosphate by soil and soil constituents. In: TINKER, P.B. (Eds.) **Soil and Agriculture**. New York: John Wiley & Sons, 1980. p.71-114.
- WIETHOLTER, S. Um modelo para avaliar a disponibilidade de nutrientes baseado em teoria de difusão. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 16., 1984, Ilhéus. **Reciclagem de nutrientes e agricultura de baixos insumos nos trópicos**. Ilhéus: CEPLAC / SBCS, 1985. p.104-148.
- WILD, A. Mass flow and diffusion. In: GREENLAND, D.J.; HAYES, M.H.B. (Eds.) **The chemistry of soil processes**. New York: John Wiley & Sons, 1981. p.37-80.
- WILD, A. The retention of phosphate by soil: A review. **Journal of Soil Science**, v.1, n.2, p.221-238, 1950.
- WILLIAMS, C.H.; ANDERSON, G. Inositol phosphates in some Australian soils. **Australian Journal of Soil Research**, v.6, p.121-130, 1968.
- WILLIAMS, C.H.; SAUNDERS, W.M.H. Distribution of phosphorus in profiles and particle size fractions of some Scottish soils. **Journal of Soil Science**, v.7, n.1, p.90-108, 1956.
- WILLIAMS, C.H.; STEINBERGS, A. Sulphur and phosphorus in some eastern Australian soils. **Australian Journal of Agriculture Research**, v.9, n.4, p.483-491, 1958.
- YAMADA T.; LOPES, A.S. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira. **Informações agronômicas**, Piracicaba, n.84, 1998. 8p. (Encarte técnico)
- YOO, K.H.; TOUCHTON, J.T.; WALKER, R.H. Runoff, sediment and nutrient losses from various tillage systems of Cotton. **Soil and Tillage Research**, v.12, n.1, p.13-24, 1988.
- YOST, R.S.; KAMPRATH, E.J.; LOBATO, E.; NADERMAN, G. Phosphorus response of corn on Oxisol as influenced by rates and placement. **Soil Science Society of America Journal**, v.43, n.2, p.338-343, 1979.

- ZAMUNER, E.C.; PICONE, L.I.; ECHEVERRIA, H.E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. **Soil and Tillage Research**, v.99, n.2, p.131–138, 2008.
- ZHANG, T.Q.; MACKENZIE, A.F.; LIANG, B.C.; DRURY, C.F. Soil test phosphorus and phosphorus fractions with long-term phosphorus addition and depletion. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, n.2, p.519-528, 2004.
- ZHENG, Z.; SIMARD, R.R.; LAFOND, J.; PARENT, L.E. Changes in phosphorus fractions of a Humic Gelysol as influenced by cropping systems and nutrient sources. **Canadian Journal of Soil Science**, v.81, n.2, p.175-183, 2001.

## **9. APÊNDICES**

## APÊNDICE A: FÓSFORO DISPONIVEL – BRAY 1

(Bray e Kurtz, 1945)

### 1. SOLUÇÕES

Solução Bray ( $\text{NH}_4\text{F}$   $0,03 \text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{HCl}$   $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ ): pesar 1,11 g de  $\text{NH}_4\text{F}$  p.a. e dissolver em 500 mL de água destilada. Adicionar 2,2 mL de  $\text{HCl}$  conc. e completar o volume para 1 litro.

Solução de Molibdato de Amônio: Dissolver 12,5 g de molibdato de amônio p.a. em 100 mL de água destilada (se necessário, aquecer em banho maria). Adicionar 0,305 g de antimônio tartarato de potássio p.a., misturar bem e adicionar 125 mL de ácido sulfúrico conc.. Esperar esfriar e completar o volume com água para 250 mL.

Solução Redutora A: Diluir 10 mL da solução de molibdato de amônio em balão volumétrico de 100 mL contendo 50 mL de água destilada. Adicionar 0,88 g de ácido ascórbico p.a.. Misturar bem e completar o volume.

Solução Redutora B: Diluir 15 mL da solução de molibdato de amônio em um balão volumétrico de 500 mL, adicionar 1,5 g de ácido ascórbico p.a., misturar bem e completar o volume. Diluir 10 mL da solução de molibdato de amônio em um balão volumétrico de 250 mL, adicionar 0,75 g de ácido ascórbico p.a., misturar bem e completar o volume. Misturar as duas soluções em um Becker de 1000 mL para trabalho.

### 2. EXTRAÇÃO

- 2.1. Cachimbar  $5 \text{ cm}^3$  de solo para copinho e preparar filtros de papel.
- 2.2. Na manhã seguinte preparar e adicionar 40 mL de solução Bray.
- 2.3. Agitar por 1 minuto e, imediatamente, filtrar em papel filtro Quantitativo Faixa Azul.

### 3. DETERMINAÇÃO

#### Curva padrão

- 3.1. Adicionar o volume de solução  $2 \text{ mg dm}^{-3}$  de P mostrado na Tabela 1;
- 3.2. Adicionar o volume de água destilada mostrado na Tabela 1;
- 3.3. Adicionar o volume de Solução Bray mostrado na Tabela 1.

#### Amostras

- 3.4. Pipetar 5 mL do filtrado para copo plástico descartável de 50 mL, limpar a pipeta imergindo-a em beakers contendo água destilada para limpar o exterior da ponteira;
- 3.5. Adicionar 5 mL de água destilada; este procedimento já limpa o interior da ponteira;
- 3.6. Preparar soluções redutoras A e B;
- 3.7. Adicionar o volume de solução redutora A (mostrado na Tabela 1) na curva marcando o tempo de início;
- 3.8. Adicionar 15 mL de solução redutora B em todas amostras;

#### Diluições

- 3.9. Pipetar 5 mL do filtrado para copo plástico descartável de 50 mL, limpar a pipeta imergindo-a em beakers contendo água destilada para limpar o exterior da ponteira;
- 3.10. Adicionar 5 mL de solução Bray (diluição de 2x);

- 3.11. Pipetar 5 mL da solução diluída para copo plástico descartável de 50 mL, limpar a pipeta imergindo-a em beakers contendo água destilada para limpar o exterior da ponteira;
- 3.12. Adicionar 5 mL de água destilada; este procedimento já limpa o interior da pipeta;
- 3.13. Adicionar 15 mL de solução redutora B;

### Leitura

- 3.14. Aguardar 40 minutos do início da adição de solução redutora A na curva e fazer a leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 680 nm.

**Tabela 1.** Curva de calibração

Teor de P no solo	Teor de P na solução	Sol. de P (2 mg dm <sup>-3</sup> )	Água destilada	Solução Bray	Solução Redutora A
---- mg dm <sup>-3</sup> ----			----- mL -----		
0	0	0	15	5	5
6,4	0,16	2	13	5	5
12,8	0,32	4	11	5	5
25,6	0,64	8	7	5	5
32	0,8	10	5	5	5
38,4	0,96	12	3	5	5

## APÊNDICE B: FÓSFORO ORGÂNICO TOTAL

(modificado de Olsen & Sommers, 1982)

### 1. SOLUÇÕES:

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,0 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar, vagorosamente, 111,11 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. em um Becker de 1000 mL contendo 700 mL de água destilada. Deixar em repouso por 2 hs e após frio, completar o volume com água destilada para balão volumétrico de 1000 mL

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,5 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar, vagorosamente, 140 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. para Becker de 1000 mL contendo 700 mL de água destilada. Transferir para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

NaOH 4 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 160,00 g de NaOH para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

Solução Indicadora p-nitrofenol (0,25% / mL): Pesar 0,08g de p-nitrofenol para balão de 200 mL e completar o volume com água destilada.

Molibdato de Amônio: Pesar 20 g de molibdato de amônio para balão de 500 mL e completar o volume com água destilada.

Antimônio Tartarato de Potássio: Pesar 0,2728 g de antimônio tartarato de potássio para balão de 100 mL e completar o volume com água destilada.

Ácido Ascórbico 0,1 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 1,76 g de ácido ascórbico para balão de 100 mL e completar o volume com água destilada. Preparar esta solução imediatamente antes de usá-la.

Solução Mista: Solução A - Adicionar 200 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,5 mol L<sup>-1</sup>, 60 mL de solução de molibdato de amônio, 20 mL de solução de antimônio tartarato de potássio, em balão de 1000 mL, adicionar 300 mL de água destilada e misturar. Solução B - Pesar 2,112 g de ácido ascórbico e dissolver com cerca de 150 mL de água destilada. Adicionar a solução B à solução A e completar o volume com água destilada.

### 2. EXTRAÇÃO:

- 2.1. Pesar 2 g de solo em duplicata: Conjunto A para cadinho de porcelana e o Conjunto B para snap-cap de 100 mL;
- 2.2. Levantar o Conjunto A para mufla e ignificar a 550 °C por 1,5 hora (elevar a temperatura gradualmente);
- 2.3. Transferir o solo ignificado para snap-cap de 100 mL e adicionar 50 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,0 mol L<sup>-1</sup>;
- 2.4. Adicionar 50 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,0 mol L<sup>-1</sup> ao Conjunto B;
- 2.5. Agitar os conjuntos A e B por 16 horas em agitador horizontal à 220 rpm;
- 2.6. Filtrar os extratos com papel filtro Quantitativo Faixa Azul para snap cap de 100 mL vazios até obter solução clara;

### 3. DETERMINAÇÃO:

- 3.1. Pipetar 2 mL de filtrado para copo plástico descartável de 50 mL;
- 3.2. Adicionar 10 mL de água destilada;
- 3.3. Adicionar 1 mL de solução indicadora;
- 3.4. Adicionar 2 mL de NaOH 4 mol L<sup>-1</sup>;

- 3.5. Adicionar 10 mL de solução mista;
- 3.6. Preparar a curva de calibração simultaneamente;
- 3.7. Aguardar 30 minutos e fazer a leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 880 nm. Quando necessário, fazer diluições com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2,0 mol L<sup>-1</sup>.
- 3.8. A leitura proveniente do solo ignificado dá o teor de P total e do não ignificado dá o teor de P inorgânico. O P orgânico é dado pela diferença: P orgânico = P total – P inorgânico

**Tabela 1.** Curva de calibração

Teor de P no solo	Teor de P na solução	Solução Padrão P (5 mg dm <sup>-3</sup> )	Água dest.	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2 mol L <sup>-1</sup>	Indicador	NaOH 4 mol L <sup>-1</sup>	Sol. Mista
---- mg dm <sup>-3</sup> ----				mL			
0	0	0	10	2	1	2	10
62,5	0,2	1	9	2	1	2	10
125	0,4	2	8	2	1	2	10
187,5	0,6	3	7	2	1	2	10
250	0,8	4	6	2	1	2	10
312,5	1	5	5	2	1	2	10

## APÊNDICE C: FÓSFORO TOTAL DO SOLO – DIGESTÃO ÁCIDA

(Brookes e Powlson, 1981; Hedley et al., 1982)

### 1. SOLUÇÕES

MgCl<sub>2</sub> 167g/200 mL: Dissolver 167g de MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O em 200 mL de água. Adicionar água aos poucos enquanto o sal dissolve, para não ultrapassar o volume porque ele contém muita água.

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,5 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar, vagarosamente, 70 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. em um balão volumétrico de 500 mL contendo 300 mL de água destilada. Deixar em repouso por 2 hs e após frio, completar o volume com água destilada.

NaOH 6,75 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 270,00 g de NaOH para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

Solução Indicadora p-nitrofenol (0,25% / mL): Pesar 0,08g de p-nitrofenol para balão de 200 mL e completar o volume com água destilada.

Molibdato de Amônio: Pesar 20 g de molibdato de amônio para balão de 500 mL e completar o volume com água destilada.

Antimônio Tartarato de Potássio: Pesar 0,2728 g de antimônio tartarato de potássio para balão de 100 mL e completar o volume com água destilada.

Solução Mista: Solução A - Adicionar 400 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,5 mol L<sup>-1</sup>, 120 mL de solução de molibdato de amônio, 40 mL de solução de antimônio tartarato de potássio, em balão de 1000 mL, adicionar 300 mL de água destilada e misturar. Solução B - Pesar 4,224 g de ácido ascórbico e diluir com cerca 300 mL de água destilada. Adicionar a solução B à solução A e completar o volume com água destilada.

### 2. EXTRAÇÃO

- 2.1. Pesar 0,15 g de solo para tubo de digestão graduado de 50 mL;
- 2.2. Adicionar 1 mL de MgCl<sub>2</sub> 167 g / 200 mL;
- 2.3. Adicionar 7,5 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 18 mol L<sup>-1</sup>;
- 2.4. Colocar funil de refluxo no tubo de digestão;
- 2.5. Aquecer por 2 horas no bloco digestor à 200°C;
- 2.6. Desligar o bloco e deixar esfriar (30 min), adicionar 2 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> p.a. e agitar imediatamente manualmente com cuidado;
- 2.7. Aquecer por 1 hora no bloco digestor à 100°C;
- 2.8. Adicionar 2 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> p.a. (não precisa deixar esfriar) e agitar manualmente com cuidado;
- 2.9. Aquecer por 1 hora no bloco digestor à 100°C;
- 2.10. Aquecer no bloco digestor à 150°C até não haver mais bolhas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> saindo do tubo (± 2,5 horas);
- 2.11. Desligar o bloco digestor e deixar esfriar até o dia seguinte;
- 2.12. Completar para 50 mL, agitando para homogeneizar;
- 2.13. Deixar esfriar e transferir para “snap cap” de 100 mL filtrando em filtro de papel quantitativo faixa azul ou preta (transferir ± 35 mL, agitar, transferir o restante);
- 2.14. Realizar o mesmo procedimento em tubo vazio (branco) gerando solução para uso na curva padrão e diluições (2 tubos por bloco);

### 3. DETERMINAÇÃO

- 3.1. Pipetar 5 mL de extrato para copo plástico descartável de 50 mL;
- 3.2. Adicionar 5 mL de água destilada;
- 3.3. Adicionar 1 mL de solução indicadora;
- 3.4. Adicionar 4 mL de NaOH 6,75 mol L<sup>-1</sup> (a amostra irá esquentar, aguardar 2 horas até a esfriar);
- 3.5. Adicionar 5 mL de solução mista;
- 3.6. Preparar a curva de calibração simultaneamente;
- 3.7. Aguardar 30 minutos e fazer a leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 880 nm. Quando necessário, fazer diluições com extrato do branco.

**Tabela 1.** Curva de calibração

Teor de P no solo	Teor de P na solução	Solução Padrão P (3 mg dm <sup>-3</sup> )	Água dest.	Extrato do branco	Indicador	NaOH 6,75 mol L <sup>-1</sup>	Sol. Mista
---- mg dm <sup>-3</sup> ----		----- mL -----					
0	0	0	5	5	1	4	5
200	0,15	1	4	5	1	4	5
400	0,3	2	3	5	1	4	5
600	0,45	3	2	5	1	4	5
800	0,6	4	1	5	1	4	5
1000	0,75	5	0	5	1	4	5

## APÊNDICE D: FRACIONAMENTO DO FÓSFORO DO SOLO – EXTRAÇÕES

(adaptado de Hedley et al., 1982 com modificações de Condrón et al., 1985)

### 1. SOLUÇÕES

NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> pH 8,5: Pesar 42 g de NaHCO<sub>3</sub> para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada. Ajustar pH para 8,5 utilizando NaOH ou HCl.

NaCl 0,5 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 29,25 g de NaCl para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 8,00 g de NaOH para balão de 2000 mL e completar o volume com água destilada.

HCl 1 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar 84 mL de HCl conc. para balão de 1000 mL contendo 700 mL de água destilada e completar o volume com água destilada.

NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 20,00 g de NaOH para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

### 2. EXTRAÇÃO

#### Primeiro dia

- 2.1. pesar 1,5 gramas de solo para tubo de centrífuga com tampa rosca;
- 2.2. adicionar 30 mL de NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>;
- 2.3. agitar manualmente para soltar o solo do fundo do tubo;
- 2.4. agitar por 16 horas no "end-over-end";

#### Segundo dia

- 2.5. centrifugar à 25000 g por 10 min a 0° C;
- 2.6. reservar o sobrenadante para análise de Pi e Pt;
- 2.7. adicionar 30 mL de NaCl 0,5 mol L<sup>-1</sup> com cuidado para não mexer o solo;
- 2.8. centrifugar à 6000 rpm por 5 min a 0° C e descartar o sobrenadante;
- 2.9. adicionar 30 mL de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>;
- 2.10. agitar (usar o vortex e batendo) para soltar o solo do fundo do tubo;
- 2.11. agitar por 16 horas no "end-over-end";

#### Terceiro dia

- 2.12. centrifugar à 25000 g por 10 min a 0° C;
- 2.13. reservar o sobrenadante para análise de Pi e Pt;
- 2.14. adicionar 30 mL de NaCl 0,5 mol L<sup>-1</sup> com cuidado para não mexer o solo;
- 2.15. centrifugar à 6000 rpm por 5 min a 0° C e descartar o sobrenadante;
- 2.16. adicionar 30 mL de HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>;
- 2.17. agitar (usar o vortex e batendo) para soltar o solo do fundo do tubo;
- 2.18. agitar por 16 horas no "end-over-end";

### **Quarto dia**

- 2.19. centrifugar à 25000 g por 10 min a 0° C;
- 2.20. reservar o sobrenadante para análise de Pi e Pt;
- 2.21. adicionar 30 mL de NaCl 0,5  $\text{mol L}^{-1}$  com cuidado para não mexer o solo;
- 2.22. centrifugar à 6000 rpm por 5 min a 0° C e descartar o sobrenadante;
- 2.23. adicionar 30 mL de NaOH 0,5  $\text{mol L}^{-1}$ ;
- 2.24. agitar (usar o vortex e batendo) para soltar o solo do fundo do tubo;
- 2.25. agitar por 16 horas no "end-over-end";

### **Quinto dia**

- 2.26. centrifugar à 25000 g por 10 min a 0° C;
- 2.27. reservar o sobrenadante para análise de Pi e Pt;
- 2.28. adicionar 30 mL de NaCl 0,5  $\text{mol L}^{-1}$  com cuidado para não mexer o solo;
- 2.29. centrifugar à 6000 rpm por 5 min a 0° C e descartar o sobrenadante;
- 2.30. guardar o tubo para posterior análise de P do resíduo.

## APÊNDICE E: FRACIONAMENTO DO FÓSFORO DO SOLO – DETERMINAÇÕES NO EXTRATO DE $\text{NaHCO}_3$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$

(adaptado de Hedley et al., 1982; com modificações de Condron et al., 1985)

### A - SEPARAÇÃO DO $\text{P}_i$ NO EXTRATO ALCALINO - $\text{NaHCO}_3$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ;

#### 1. SOLUÇÕES

$\text{H}_2\text{SO}_4$   $5,15 \text{ mol L}^{-1}$ : Adicionar, vagorosamente, 143,05 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  conc. em um balão volumétrico de 500 mL contendo 300 mL de água destilada. Deixar em repouso por 2 hs e após frio, completar o volume com água destilada.

#### 2. PROCEDIMENTO

- 2.1. pipetar 9 mL de extrato para tubo de centrifuga;
- 2.2. pipetar 1 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $5,15 \text{ mol L}^{-1}$ ; (objetivo é que a solução resultante tenha 5,8 eq  $\text{H}^+$ ) (pipetar 0,5 + 0,5 mL muito vagorosamente para evitar borbulhamento excessivo)
- 2.3. tampar e agitar por 15 min;
- 2.4. colocar no congelador por 30 min para resfriar antes de centrifugar;
- 2.5. centrifugar à 25000 g por 10 min a  $0^\circ \text{C}$ ;
- 2.6. reservar o sobrenadante para análise de  $\text{P}_i$ ;
- 2.7. descartar o decantado;
- 2.8. BRANCO: 9 mL de solução extratora  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  + 1 mL  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $5,15 \text{ mol L}^{-1}$

### B - DETERMINAÇÃO DO $\text{P}_i$ NO EXTRATO ALCALINO – $\text{NaHCO}_3$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ;

#### 1. SOLUÇÕES

$\text{H}_2\text{SO}_4$   $2,5 \text{ mol L}^{-1}$ : Adicionar, vagorosamente, 140 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  conc. para Becker de 1000 mL contendo 700 mL de água destilada. Transferir para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

Solução Indicadora p-nitrofenol (0,25% / mL): Pesar 0,08g de p-nitrofenol para balão de 200 mL e completar o volume com água destilada.

Molibdato de Amônio: Pesar 20 g de molibdato de amônio para balão de 500 mL e completar o volume com água destilada.

Antimônio Tartarato de Potássio: Pesar 0,2728 g de antimônio tartarato de potássio para balão de 100 mL e completar o volume com água destilada.

Solução Mista: Solução A - Adicionar 400 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $2,5 \text{ mol L}^{-1}$ , 120 mL de solução de molibdato de amônio, 40 mL de solução de antimônio tartarato de potássio, em balão de 1000 mL, adicionar 300 mL de água destilada e misturar. Solução B - Pesar 4,224 g de ácido ascórbico e diluir com cerca de 300 mL de  $\text{H}_2\text{O}$  destilada. Adicionar a solução B à solução A e completar o volume com água destilada.

## 2. DETERMINAÇÃO

- 2.1. pipetar 5 mL do extrato para copo plástico descartável de 50 mL;
- 2.2. adicionar 5 mL de água (este procedimento já limpa o interior da pipeta)
- 2.3. adicionar 1 mL de solução indicadora;
- 2.4. adicionar 4 mL de NaOH  $\underline{X}$  mol L<sup>-1</sup> (a concentração deverá ser calculada previamente pela titulação do branco);
- 2.5. adicionar 5 mL de solução mista;
- 2.6. Preparar a curva de calibração simultaneamente;
- 2.7. Aguardar 30 minutos e fazer a leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 880 nm. Quando necessário, fazer diluições com extrato do branco.

**Tabela 1.** Curva de calibração

Teor de P na solução mg dm <sup>-3</sup>	Sol. Padrão P (2 mg dm <sup>-3</sup> )	Água dest.	Extrato do branco mL	Indicador	NaOH $\underline{X}$ mol L <sup>-1</sup>	Sol. Mista
0	0	5	5	1	4	5
0,05	0,5	4,5	5	1	4	5
0,1	1	4	5	1	4	5
0,2	2	3	5	1	4	5
0,3	3	2	5	1	4	5
0,4	4	1	5	1	4	5

Obs.: diluição final de 20 (solo – solução) x 10/9 (precipitação) x 4 (leitura) = **88,9** vezes

## C - DIGESTÃO DO EXTRATO ALCALINO PARA Pt- NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>;

### 1. SOLUÇÕES

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 9 mol L<sup>-1</sup> (1:1): Adicionar, 250 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. em um Becker de 500 mL contendo 200 mL de água destilada. Deixar em repouso por 2 hs e após frio, transferir para balão volumétrico de 500 mL e completar o volume com água destilada.

Persulfato de amônio 150g l<sup>-1</sup>: Pesar 150,00 g de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> para balão de 1000 mL e completar o volume com H<sub>2</sub>O destilada.

### 2. PROCEDIMENTO

- 2.1. pipetar 5 mL de extrato para tubo de digestão graduado em 20 mL;
- 2.2. adicionar 5 mL de Persulfato de amônio 150g l-1;
- 2.3. adicionar 1 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 9 mol L<sup>-1</sup> (1:1);
- 2.4. cobrir a boca dos tubos com papel alumínio, identificando-os;
- 2.5. colocar os tubos dentro de um Becker de plástico e cobrir a boca com papel alumínio;
- 2.6. colocar em autoclave a 121°; 103 kPa por 2 horas;
- 2.7. desligar a autoclave e deixar esfriar até o outro dia;
- 2.8. completar para 20 mL, agitando para homogeneizar;
- 2.9. deixar esfriar e transferir para pote;

2.10. realizar o mesmo procedimento em tubo vazio contendo apenas solução extratora (branco) gerando solução para uso na curva padrão e diluições; (pode ser feito em tubo de 50 mL colocando 2,5 vezes o volume de cada solução)

## D - DETERMINAÇÃO DO Pt NO EXTRATO ALCALINO – $\text{NaHCO}_3$ 0,5 mol L<sup>-1</sup>;

### 1. PLASMA

**Tabela 1.** Curva de calibração

	Branco	Pontos da curva						
		1	2	3	4	5	6	7
Teor de P na solução (mg dm <sup>-3</sup> )	0	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Teor de P no solo (mg dm <sup>-3</sup> )	0	4	8	16	32	48	64	80

### 2. COLORIMETRIA

- 2.1. pipetar 5 mL do extrato para copo plástico descartável de 50 mL;
- 2.2. adicionar 5 mL de água (este procedimento já limpa o interior da pipeta)
- 2.3. adicionar 1 mL de solução indicadora;
- 2.4. adicionar 4 mL de NaOH  $\underline{X}$  mol L<sup>-1</sup> (a concentração deverá ser calculada previamente pela titulação do branco);
- 2.5. adicionar 5 mL de solução mista;
- 2.6. Preparar a curva de calibração simultaneamente;
- 2.7. Aguardar 30 minutos e fazer a leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 880 nm. Quando necessário, fazer diluições com extrato do branco.

**Tabela 2.** Curva de calibração

Teor de P na solução mg dm <sup>-3</sup>	Sol. Padrão P (1 mg dm <sup>-3</sup> )	Água dest.	Extrato do branco mL	Indicador	NaOH $\underline{X}$ mol L <sup>-1</sup>	Sol. Mista
0	0	5	5	1	4	5
0,025	0,5	4,5	5	1	4	5
0,050	1	4	5	1	4	5
0,100	2	3	5	1	4	5
0,150	3	2	5	1	4	5
0,200	4	1	5	1	4	5

Obs.: diluição final de 20 (solo – solução) x 20/5 (digestão) x 4 (leitura) = **320** vezes

## APÊNDICE F: FRACIONAMENTO DO FÓSFORO DO SOLO – DETERMINAÇÕES NO EXTRATO DE NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>

(adaptado de Hedley et al., 1982; com modificações de Condrón et al., 1985)

### A - SEPARAÇÃO DO Pi NO EXTRATO ALCALINO - NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>;

#### 1. SOLUÇÕES

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1,385 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar, vagarosamente, 38,47 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. em um balão volumétrico de 500 mL contendo 300 mL de água destilada. Deixar em repouso por 2 hs e após frio, completar o volume com água destilada.

#### 2. PROCEDIMENTO

- 2.1. pipetar 9 mL de extrato para tubo de centrífuga, limpando a pipeta com água destilada entre as amostras;
- 2.2. pipetar 1 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1,385 mol L<sup>-1</sup>; (objetivo é que a solução resultante tenha 1,88 eq H<sup>+</sup>)
- 2.3. tampar e agitar por 15 min;
- 2.4. colocar no congelador por 30 min para resfriar antes de centrifugar;
- 2.5. centrifugar à 25000 g por 10 min a 0° C;
- 2.6. reservar o sobrenadante para análise de Pi;
- 2.7. descartar o decantado;
- 2.8. BRANCO: 9 mL de solução extratora NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> + 1 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1,385 mol L<sup>-1</sup>

### B - DETERMINAÇÃO DO Pi NO EXTRATO ALCALINO - NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>;

#### 1. SOLUÇÕES

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,5 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar, vagarosamente, 140 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. para Becker de 1000 mL contendo 700 mL de água destilada. Transferir para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

Solução Indicadora p-nitrofenol (0,25% / mL): Pesar 0,08g de p-nitrofenol para balão de 200 mL e completar o volume com água destilada.

Molibdato de Amônio: Pesar 20 g de molibdato de amônio para balão de 500 mL e completar o volume com água destilada.

Antimônio Tartarato de Potássio: Pesar 0,2728 g de antimônio tartarato de potássio para balão de 100 mL e completar o volume com água destilada.

Solução Mista: Solução A - Adicionar 200 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,5 mol L<sup>-1</sup>, 60 mL de solução de molibdato de amônio, 20 mL de solução de antimônio tartarato de potássio, em balão de 1000 mL, adicionar 300 mL de água destilada e misturar. Solução B - Pesar 2,112 g de ácido ascórbico e diluir com cerca de 150 mL de água destilada. Adicionar a solução B à solução A e completar o volume com água destilada.

## 2. COLORIMETRIA

- 2.1. pipetar 4 mL do sobrenadante para copo plástico descartável de 50 mL;
- 2.2. adicionar 4 mL de água (este procedimento já limpa o interior da pipeta)
- 2.3. adicionar 2 mL de solução indicadora B (diluir 2 vezes antes de pipetar);
- 2.4. adicionar 5 mL de NaOH  $\underline{X}$  mol L<sup>-1</sup> (a concentração deverá ser calculada previamente pela titulação do branco);
- 2.5. adicionar 10 mL de solução mista;
- 2.6. Preparar a curva de calibração simultaneamente;
- 2.7. Aguardar 30 minutos e fazer a leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 880 nm. Quando necessário, fazer diluições com extrato do branco.

Tabela 1. Curva de calibração

Teor de P na solução mg dm <sup>-3</sup>	Sol. Padrão P (5 mg dm <sup>-3</sup> )	Água dest.	Extrato do branco	Indicador A	NaOH $\underline{X}$ mol L <sup>-1</sup>	Sol. Mista
0	0	5	4	1	5	10
0,2	1	4	4	1	5	10
0,4	2	3	4	1	5	10
0,6	3	2	4	1	5	10
0,8	4	1	4	1	5	10
1	5	0	4	1	5	10

Obs.: diluição final de 20 (solo – solução) x 10/9 (precipitação) x 6,25 (leitura) = **138,8** vezes

## C - DIGESTÃO DO EXTRATO ALCALINO PARA Pt- NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>;

### 1. SOLUÇÕES

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 9 mol L<sup>-1</sup> (1:1): Adicionar, 250 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. em um Becker de 500 mL contendo 200 mL de água destilada. Deixar em repouso por 2 hs e após frio, transferir para balão volumétrico de 500 mL e completar o volume com água destilada.

Persulfato de amônio 150g l<sup>-1</sup>: Pesar 150,00 g de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

### 2. PROCEDIMENTO

- 2.1. pipetar 5 mL de extrato para tubo de digestão graduado em 20 mL;
- 2.2. pipetar 5 mL de água destilada (este procedimento já limpa o interior da pipeta)
- 2.3. adicionar 5 mL de Persulfato de amônio 150g l<sup>-1</sup>;
- 2.4. adicionar 1 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 9 mol L<sup>-1</sup> (1:1);
- 2.5. cobrir a boca dos tubos com papel alumínio, identificando-os;
- 2.6. colocar os tubos dentro de um Becker de plástico e cobrir a boca com papel alumínio;
- 2.7. colocar em autoclave a 121°; 103 kPa por 2 horas;
- 2.8. desligar a autoclave e deixar esfriar até o outro dia;
- 2.9. completar para 20 mL, agitando para homogeneizar;
- 2.10. deixar esfriar e transferir para pote;

2.11. realizar o mesmo procedimento em tubo vazio contendo apenas solução extratora (branco) gerando solução para uso na curva padrão e diluições; (pode ser feito em tubo de 50 mL colocando 2,5 vezes o volume de cada solução)

#### **D - DETERMINAÇÃO DO Pt NO EXTRATO ALCALINO – NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>;**

##### **1. PLASMA**

**Tabela 2.** Curva de calibração

	<b>Pontos da curva</b>						
	<b>Branco</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Teor de P na solução (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	0	0,5	1	2	3	4	5
<b>Teor de P no solo (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	0	40	80	160	240	320	400

**APÊNDICE G: FRACIONAMENTO DO FÓSFORO DO SOLO – DETERMINAÇÕES  
NO EXTRATO DE HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>**

(adaptado de Hedley et al., 1982; com modificações de Condron et al., 1985)

**A - DETERMINAÇÃO DO Pi NO EXTRATO ÁCIDO – HCl 1 mol L<sup>-1</sup>;**

**1. PLASMA**

**Tabela 1.** Curva de calibração

	Pontos da curva							
	Branco	1	2	3	4	5	6	7
<b>Teor de P na solução (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	0	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
<b>Teor de P no solo (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	0	1	2	4	8	12	16	20

Obs.: diluição final de 20 (solo – solução) = **20** vezes

**Tabela 2.** Curva de calibração para as amostras de 0-2,5 cm e 2,5-5 cm do SPD FNR

	Pontos da curva							
	Branco	1	2	3	4	5	6	7
<b>Teor de P na solução (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	0	1	2	4	6	8	10	12
<b>Teor de P no solo (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	0	20	40	80	120	160	200	240

Obs.: diluição final de 20 (solo – solução) = **20** vezes

## APÊNDICE H: FRACIONAMENTO DO FÓSFORO DO SOLO – DETERMINAÇÕES NO EXTRATO DE NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>

(adaptado de Hedley et al., 1982; com modificações de Condrón et al., 1985)

### A - SEPARAÇÃO DO Pi NO EXTRATO ALCALINO - NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>;

#### 1. SOLUÇÕES

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3,19 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar, vagarosamente, 88,6 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. em um balão volumétrico de 500 mL contendo 300 mL de água destilada. Deixar em repouso por 2 hs e após frio, completar o volume com água destilada.

#### 2. PROCEDIMENTO

- 2.1. pipetar 9 mL de extrato para tubo de centrifuga;
- 2.2. pipetar 1 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3,19 mol L<sup>-1</sup>; (objetivo é que a solução resultante tenha 1,88 eq H<sup>+</sup>)
- 2.3. tampar e agitar por 15 min;
- 2.4. colocar no congelador por 30 min para resfriar antes de centrifugar;
- 2.5. centrifugar à 25000 g por 10 min a 0° C;
- 2.6. reservar o sobrenadante para análise de Pi;
- 2.7. descartar o decantado;
- 2.8. BRANCO: 9 mL de solução extratora NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> + 1 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3,19 mol L<sup>-1</sup>

### B - DETERMINAÇÃO DO Pi NO EXTRATO ALCALINO - NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>;

#### 1. SOLUÇÕES

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,5 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar, vagarosamente, 140 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. para Becker de 1000 mL contendo 700 mL de água destilada. Transferir para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

Solução Indicadora p-nitrofenol (0,25% / mL): Pesar 0,08g de p-nitrofenol para balão de 200 mL e completar o volume com água destilada.

Molibdato de Amônio: Pesar 20 g de molibdato de amônio para balão de 500 mL e completar o volume com água destilada.

Antimônio Tartarato de Potássio: Pesar 0,2728 g de antimônio tartarato de potássio para balão de 100 mL e completar o volume com água destilada.

Solução Mista: Solução A - Adicionar 200 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,5 mol L<sup>-1</sup>, 60 mL de solução de molibdato de amônio, 20 mL de solução de antimônio tartarato de potássio, em balão de 1000 mL, adicionar 300 mL de água destilada e misturar. Solução B - Pesar 2,112 g de ácido ascórbico e diluir com cerca de 150 mL de água destilada. Adicionar a solução B à solução A e completar o volume com água destilada.

#### 2. COLORIMETRIA

- 2.1. pipetar 4 mL do sobrenadante para copo plástico descartável de 50 mL;

- 2.2. adicionar 4 mL de água (este procedimento já limpa o interior da pipeta)
- 2.3. adicionar 2 mL de solução indicadora B (diluir 2 vezes antes de pipetar);
- 2.4. adicionar 5 mL de NaOH \_\_\_\_\_ mol L<sup>-1</sup> (a concentração deverá ser calculada previamente pela titulação do branco);
- 2.5. adicionar 10 mL de solução mista;
- 2.6. Preparar a curva de calibração simultaneamente;
- 2.7. Aguardar 30 minutos e fazer a leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 880 nm. Quando necessário, fazer diluições com extrato do branco.

**Tabela 1.** Curva de calibração

Teor de P na solução mg dm <sup>-3</sup>	Sol. Padrão P (5 mg dm <sup>-3</sup> )	Água dest.	Extrato do branco	Indicador A	NaOH _____ mol L <sup>-1</sup>	Sol. Mista
		mL				
0	0	5	4	1	5	10
0,2	1	4	4	1	5	10
0,4	2	3	4	1	5	10
0,6	3	2	4	1	5	10
0,8	4	1	4	1	5	10
1	5	0	4	1	5	10

Obs.: diluição final de 20 (solo – solução) x 10/9 (precipitação) x 6,25 (leitura) = **138,8** vezes

## C - DIGESTÃO DO EXTRATO ALCALINO PARA Pt- NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>;

### 1. SOLUÇÕES

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 9 mol L<sup>-1</sup> (1:1): Adicionar, 250 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. em um Becker de 500 mL contendo 200 mL de água destilada. Deixar em repouso por 2 hs e após frio, transferir para balão volumétrico de 500 mL e completar o volume com água destilada.

Persulfato de amônio 150g l<sup>-1</sup>: Pesar 150,00 g de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

### 2. PROCEDIMENTO

- 2.1. pipetar 5 mL de extrato para tubo de digestão graduado em 20 mL;
- 2.2. adicionar 5 mL de Persulfato de amônio 150g l<sup>-1</sup>;
- 2.3. adicionar 1 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 9 mol L<sup>-1</sup> (1:1);
- 2.4. cobrir a boca dos tubos com papel alumínio, identificando-os;
- 2.5. colocar os tubos dentro de um Becker de plástico e cobrir a boca com papel alumínio;
- 2.6. colocar em autoclave a 121°; 103 kPa por 2 horas;
- 2.7. desligar a autoclave e deixar esfriar até o outro dia;
- 2.8. completar para 20 mL, agitando para homogeneizar;
- 2.9. deixar esfriar e transferir para pote;
- 2.10. realizar o mesmo procedimento em tubo vazio contendo apenas solução extratora (branco) gerando solução para uso na curva padrão e diluições; (pode ser feito em tubo de 50 mL colocando 2,5 vezes o volume de cada solução)

## D - DETERMINAÇÃO DO Pt NO EXTRATO ALCALINO – NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>;

### 1. PLASMA

**Tabela 1.** Curva de calibração

	Pontos da curva						
	Branco	1	2	3	4	5	6
<b>Teor de P na solução (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	0	0,5	1	2	3	4	5
<b>Teor de P no solo (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	0	40	80	160	240	320	400

# APÊNDICE I: FRACIONAMENTO DO FÓSFORO DO SOLO – DETERMINAÇÕES NO RESÍDUO DE SOLO

(Brookes e Powlson, 1981; Hedley et al., 1982)

## A - DETERMINAÇÃO DO Pt NO NO RESÍDUO DE SOLO

### 1. SOLUÇÕES

MgCl<sub>2</sub> 167g/200 mL: Dissolver 167g de MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O em 200 mL de água. Adicionar água aos poucos enquanto o sal dissolve, para não ultrapassar o volume porque ele contém muita água.

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,5 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar, vagarosamente, 70 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. em um balão volumétrico de 500 mL contendo 300 mL de água destilada. Deixar em repouso por 2 hs e após frio, completar o volume com água destilada.

NaOH 6,75 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 270,00 g de NaOH para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

Solução Indicadora p-nitrofenol (0,25% / mL): Pesar 0,08g de p-nitrofenol para balão de 200 mL e completar o volume com água destilada.

Molibdato de Amônio: Pesar 20 g de molibdato de amônio para balão de 500 mL e completar o volume com água destilada.

Antimônio Tartarato de Potássio: Pesar 0,2728 g de antimônio tartarato de potássio para balão de 100 mL e completar o volume com água destilada.

Solução Mista: Solução A - Adicionar 400 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,5 mol L<sup>-1</sup>, 120 mL de solução de molibdato de amônio, 40 mL de solução de antimônio tartarato de potássio, em balão de 1000 mL, adicionar 300 mL de água destilada e misturar. Solução B - Pesar 4,224 g de ácido ascórbico e diluir com cerca de 300 mL de água destilada. Adicionar a solução B à solução A e completar o volume com água destilada.

### 2. EXTRAÇÃO

- 2.1. pesar 0,15 g de solo para tubo de digestão graduado de 50 mL;
- 2.2. adicionar 1 mL de MgCl<sub>2</sub> 167 g / 200 mL;
- 2.3. adicionar 5 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc.;
- 2.4. colocar funil de refluxo no tubo de digestão;
- 2.5. aquecer por 2 horas no bloco digestor à 200°C;
- 2.6. desligar o bloco e deixar esfriar (30 min), adicionar 1 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> p.a. e agitar imediatamente manualmente com cuidado;
- 2.7. aquecer por 1 hora no bloco digestor à 100°C; (ele estará a 150° C mas não tem problema)
- 2.8. adicionar 2 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> p.a. e agitar imediatamente manualmente com cuidado;
- 2.9. aquecer por 1 hora no bloco digestor à 100°C;
- 2.10. aquecer no bloco digestor à 150°C até não haver mais bolhas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> saindo do tubo (± 2,5 horas);
- 2.11. desligar o bloco digestor e deixar esfriar até o dia seguinte;
- 2.12. completar para 50 mL, agitando para homogeneizar;

- 2.13. deixar esfriar e transferir para “snap cap” de 100 mL filtrando em filtro de papel quantitativo faixa azul ou preta (transferir  $\pm$  35 mL, agitar, transferir o restante);
- 2.14. realizar o mesmo procedimento em tubo vazio (branco) gerando solução para uso na curva padrão e diluições;

### 3. DETERMINAÇÃO NO PLASMA

**Tabela 1.** Curva de calibração

	Branco	Pontos da curva			
		1	2	3	4
<b>Teor de P na solução (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	0	0,1	0,2	0,4	0,6
<b>Teor de P no solo (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	0	33	66	133	200

Obs.: diluição final de 50/0,15 (solo – solução) = **333,33** vezes

## B - DETERMINAÇÃO DO P ORGÂNICO NO RESÍDUO DE SOLO

### 1. SOLUÇÕES:

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,0 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar, vagorosamente, 111,11 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. em um Becker de 1000 mL contendo 700 mL de água destilada. Deixar em repouso por 2 hs e após frio, completar o volume com água destilada para balão volumétrico de 1000 mL

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,5 mol L<sup>-1</sup>: Adicionar, vagorosamente, 140 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. para Becker de 1000 mL contendo 700 mL de água destilada. Transferir para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

NaOH 4 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 160,00 g de NaOH para balão de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

Solução Indicadora p-nitrofenol (0,25% / mL): Pesar 0,08g de p-nitrofenol para balão de 200 mL e completar o volume com água destilada.

Molibdato de Amônio: Pesar 20 g de molibdato de amônio para balão de 500 mL e completar o volume com água destilada.

Antimônio Tartarato de Potássio: Pesar 0,2728 g de antimônio tartarato de potássio para balão de 100 mL e completar o volume com água destilada.

Ácido Ascórbico 0,1 mol L<sup>-1</sup>: Pesar 1,76 g de ácido ascórbico para balão de 100 mL e completar o volume com água destilada. Preparar esta solução imediatamente antes de usá-la.

Solução Mista: Solução A - Adicionar 200 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,5 mol L<sup>-1</sup>, 60 mL de solução de molibdato de amônio, 20 mL de solução de antimônio tartarato de potássio, em balão de 1000 mL, adicionar 300 mL de água destilada e misturar. Solução B - Pesar 2,112 g de ácido ascórbico e dissolver com cerca de 150 mL de água destilada. Adicionar a solução B à solução A e completar o volume com água destilada.

### 2. EXTRAÇÃO:

- 2.1. Pesar 0,5 g de solo em duplicata: Conjunto A para cadinho de porcelana e o Conjunto B para tubo de centrífuga;

- 2.2. Levar o Conjunto A para mufla e ignificar a 550 °C por 1,5 hora (elevar a temperatura gradualmente);
- 2.3. Transferir o solo ignificado para tubo de centrifuga e adicionar 25 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,0 mol L<sup>-1</sup>;
- 2.4. Adicionar 25 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2,0 mol L<sup>-1</sup> ao Conjunto B;
- 2.5. Agitar os conjuntos A e B por 16 horas em agitador horizontal à 220 rpm;
- 2.6. Centrifugar à 25000 g por 10 min a 0° C;
- 2.7. Reservar o sobrenadante para análise de Pi e Pt;
- 2.8. A leitura proveniente do solo ignificado dá o teor de P total e do não ignificado dá o teor de P inorgânico. O P orgânico é dado pela diferença: P orgânico = P total – P inorgânico

#### 4. DETERMINAÇÃO NO PLASMA

**Tabela 1.** Curva de calibração

	Branco	Pontos da curva			
		1	2	3	4
Teor de P na solução (mg dm <sup>-3</sup> )	0	0,5	1	2	4
Teor de P no solo (mg dm <sup>-3</sup> )	0	25	50	100	200

## **APÊNDICE J: AMOSTRAGEM, SEPARAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE RAÍZES NO SOLO**

### **1. AMOSTRAGEM**

- 1.1. retirar material vegetal da superfície do solo;
- 1.2. com trado específico, retirar amostras de solo e transferir para saco plástico, recortando com tesoura as raízes que ficarem para fora do anel e colocando no saco da amostra da camada inferior;
- 1.3. as amostras coletadas na entre-linha são retiradas tendo trado no limite de 1/4 do espaçamento da cultura. Assim, para a soja a amostra foi tomada a 12,5 cm (50/4) da linha e no milho a 25 cm (80/4).
- 1.4. fechar bem o saco e armazenar em câmara fria (4° C) por no máximo 7 dias até determinar umidade.

### **2. DETERMINAÇÃO DE UMIDADE**

- 2.1. aferir a tara de copinhos de alumínio e colocá-los em ordem numa bandeja;
- 2.2. retirar os sacos da câmara fria, abrir e pesar;
- 2.3. homogeneizar o solo com a água retida na superfície interna do saco e transferir aproximadamente 30 g de solo nos copinhos de alumínio, tomando cuidado para não pegar raízes ( $\pm 3$  cachimbadas de 10 cm<sup>3</sup>);
- 2.4. colocar os copinhos de alumínio em estufa a 108° C até atingir peso constante (2 dias);
- 2.5. pesar o solo seco;

### **3. SEPARAÇÃO DAS RAÍZES DO SOLO**

- 3.1. colocar o solo em balde de 20 litros, diluindo em água e homogeneizando manualmente;
- 3.2. passar material do balde em peneira de 0,5 mm cuidando para não derramar o solo depositado no fundo do balde;
- 3.3. despejar material da peneira para vasilha com água para retirar materiais grosseiros que não são raízes;
- 3.4. passar material da vasilha em peneira de 0,5 mm;
- 3.5. colocar o material retido na peneira de 0,5 mm em saco plástico e armazenar em geladeira a (4° C) por até 1 mês.

### **4. LIMPEZA DAS RAÍZES**

- 4.1. retirar o material da geladeira;
- 4.2. transferir o material para vasilha, colocar água e retirar contaminantes (palha, carvão etc.) com pinça;
- 4.3. passar material da vasilha em peneira de 0,5 mm;
- 4.4. colocar o material retido na peneira de 0,5 mm em papel toalha para retirar excesso de umidade e picar para homogeneizar;

- 4.5. coletar uma amostra (quantidade que preencha uma folha A4) e colocar em snap-cap de 100 mL contendo solução de álcool etílico 30% em geladeira, podendo ser acondicionado por até 6 meses;
- 4.6. colocar o restante do material em saco de papel e levar para estufa a 60 ° C até atingir peso constante;
- 4.7. retirar material da estufa e pesar matéria seca de raízes;

## **5. QUANTIFICAÇÃO DAS RAÍZES**

- 5.1. colorir a alíquota de raízes mantida em solução alcoólica com cloreto de pararosanilina (violeta de genciana) 5 g L<sup>-1</sup>;
- 5.2. Após 24 horas retirar as raízes da solução e secar ao ar em papel de germinação;
- 5.3. Espalhar com pinça as raízes secas em folha transparente e escanear;
- 5.4. Secar em estufa a 60 ° C até atingir peso constante e pesar matéria seca de raízes;
- 5.5. Trabalhar as imagens digitais com utilização do software computacional SIARCS® 3.0 (Jorge et al. 1996), utilizando o filtro “threshold > seleção ordenada”, que permite que se faça a seleção das cores que representam o objeto em análise, com nível de seleção de oito linhas completas deste filtro.