

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**DINÂMICA DO FÓSFORO EM SOLO MUITO  
ARGILOSO SOB DIFERENTES PREPAROS DE SOLO  
E CULTURAS DE INVERNO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Tales Tiecher**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2011**

# **DINÂMICA DO FÓSFORO EM SOLO MUITO ARGILOSO SOB DIFERENTES PREPAROS DE SOLO E CULTURAS DE INVERNO**

**Tales Tiecher**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Químicos e ciclagem de elementos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**.

**Orientador: Prof. Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2011**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**DINÂMICA DO FÓSFORO EM SOLO MUITO ARGILOSO SOB  
DIFERENTES PREPAROS DE SOLO E CULTURAS DE INVERNO**

elaborada por  
**Tales Tiecher**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Ciência do Solo**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos**  
(Presidente/Orientador) – CCR – UFSM

---

**Dr. Ademir Calegari**  
IAPAR

---

**Prof. Dr. João Kaminski**  
CCR – UFSM

Santa Maria, 28 de fevereiro de 2011.

*Aos meus pais, Ernani e Singlair*

*Aos meus irmãos, Talise e Tadeu*

*À minha namorada Silvana*

**Dedico este trabalho!**

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao mestre e amigo Danilo Rheinheimer dos Santos pela orientação desde a iniciação científica, pelos conselhos, confiança e pelo exemplo de dedicação à pesquisa e ao ensino superior.

Ao professor João Kaminski pelas conversas, sábios ensinamentos e amparo intelectual.

Ao pesquisador Ademir Calegari pela concessão do experimento instalado no IAPAR de Pato Branco, Paraná, para realizar o presente trabalho.

Aos colegas de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela amizade e convívio, especialmente ao Jaderson dos Anjos Toledo, Carlos Alberto Casali e Gabriel de Franceschi dos Santos pela ajuda na coleta das amostras de solo.

Aos bolsistas de iniciação científica do Laboratório de Química e Fertilidade dos Solos, em especial ao Marcos Antônio Bender, Rogério Piccin, Fabiano Elias Arbuseri, Rafael Ramon e Elci Gubiani, pelo auxílio e seriedade na execução dos trabalhos de laboratório.

Ao Alex Giuliani pela amizade, disposição e presteza.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudo e auxílio financeiro para execução do projeto.

Enfim, a todos que estiveram presentes direta ou indiretamente nesta etapa da minha vida e que contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Universidade Federal de Santa Maria

### **DINÂMICA DO FÓSFORO EM SOLO MUITO ARGILOSO SOB DIFERENTES PREPAROS DE SOLO E CULTURAS DE INVERNO**

AUTOR: TALES TIECHER  
ORIENTADOR: DR. DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS  
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 28 de fevereiro de 2011.

O cultivo de plantas com diferentes habilidades de aquisição e absorção de fósforo (P) sob diferentes sistemas de preparo de solo por um longo período de tempo pode alterar a ciclagem e a distribuição das formas de P no solo. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a dinâmica do P num solo muito argiloso de região subtropical, originalmente coberto por Mata Atlântica, sob sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto, com cultivo de diferentes espécies de plantas de inverno em sequência às culturas de soja e de milho. Em 1986 foi estabelecido o experimento com seis tratamentos de inverno (tremoço azul, ervilhaca peluda, aveia preta, nabo forrageiro, trigo e pousio) implantados num Latossolo Vermelho Aluminoférrico na região sudoeste do Paraná, sob sistema plantio direto (SPD) e sistema de cultivo convencional (SCC). Em outubro de 2009, foram coletadas amostras de solo em cinco camadas (0-5, 5-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm). Determinaram-se as formas de P pelo fracionamento químico de Hedley, a dessorção de P pela extração sequencial com resinas de troca aniônica, o teor de P armazenado na biomassa microbiana do solo e a atividade das enzimas fosfatases ácidas. A maior parte do fosfato aplicado via fertilizantes em doses racionais, de acordo com as necessidades das plantas e o tipo de solo, foi convertida em formas orgânicas pelas plantas e pela biomassa microbiana do solo, ao invés de ser adsorvido pela fração mineral do solo. A aplicação de fosfato no solo sob SPD criou forte gradiente de disponibilidade de P em profundidade, e no solo da camada superficial promoveu aumento do teor de P em formas orgânicas e inorgânicas, lábeis e moderadamente lábeis, comparativamente ao SCC. O cultivo do solo com plantas durante o período hibernal aumenta a importância das reações biológicas do ciclo do P, em especial no SPD, onde grande quantidade de resíduos vegetais é depositada na superfície do solo, apresentando maior teor de P orgânico, P estocado na BMS e atividade das enzimas fosfatases ácidas. O cultivo de plantas com grande produção de biomassa, como a aveia preta, e de plantas capazes de adquirir P de formas de menor labilidade, como o tremoço azul, sob o SPD, aumentou o teor de P inorgânico lábil no solo das camadas superficiais, devido à maior quantidade de P reciclado. O mesmo, porém, não ocorreu quando da incorporação dos resíduos culturais pelo revolvimento do solo no SCC, pois após ser mineralizado, o P segue a mesma rota de adsorção do P em solução, sendo retido com forte energia de ligação nesse sistema.

**Palavras-chave:** Sistema Plantio Direto. Sistema de Cultivo Convencional. Fracionamento do Fósforo. Culturas de Cobertura. Reciclagem de Fósforo.

## ABSTRACT

Master Dissertation  
Post-Graduate Program in Soil Science  
Federal University of Santa Maria

### **DYNAMICS OF PHOSPHORUS IN VERY CLAYEY SOIL UNDER DIFFERENT SOIL MANAGEMENT SYSTEM AND WINTER CROPS**

AUTHOR: TALES TIECHER  
ADVISER: DR. DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS  
Place and Date of the Defense: Santa Maria, 28<sup>th</sup> February 2011.

The cultivation of plants with different skills of acquisition and absorption of phosphorus (P) under different tillage systems for a long period of time can alter the cycling and distribution of P forms in soil. The aim of this study was to evaluate the dynamics of P in a very clayey soil in the subtropical region, originally covered by Atlantic Forest, under systems of tillage and conventional tillage, with cultivation of different species of winter plants in response to soybeans and corn crops. In 1986 was established the experiment with six winter treatments (blue lupine, hairy vetch, oats, turnip, wheat and fallow) implanted in a Rhodic Hapludox in southern Brazil, under no-tillage system (NT) and conventional tillage system (CT). In October 2009, soil samples were collected at five depths (0-5, 5-10, 10-20, 20-30 and 30-40 cm). The forms of P were determined by chemical fractionation of Hedley, desorption of P by sequential extraction with anion exchange resins, the amount of P stored in soil microbial biomass and activity of the acid phosphatase enzyme. Most of the phosphate applied through fertilizer in rational doses, according to plant needs and soil type, was converted in organic forms by plants and soil microbial biomass, instead of being adsorbed by the soil mineral fraction. The application of phosphate in soil under NT created a strong gradient of P availability in depth, and in soil surface layer promoted an increase of P content in organic and inorganic forms, labile and moderately labile, compared to the CT. Growing plants during the winter period in highly weathered subtropical soil increases the importance of biological reactions in the P cycle, especially in the SPD, where a large amount of vegetable waste is deposited on the soil surface, increasing the content of soil organic P, P content stored in the SMB and acid phosphatase enzyme activity. Growing plants with high biomass production, such as oats, and plants capable of acquiring P from less labile forms, such as the blue lupine, under the NT, increased the content of inorganic labile P in the soil of surface layers, due to the higher amount of P recycled. The same, however, did not occur when the incorporation of crop residues by soil disturbance in the CT, because after being mineralized, P follows the same route of adsorption of P in solution, being retained with strong binding energy, in this system.

**Key words:** No-tillage. Conventional Tillage. Fractionation of Phosphorus. Cover Crops. Recycling of phosphorus.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Relação entre os teores de P total e P orgânico dos solos tropicais e subtropicais utilizando dados obtidos com o fracionamento de Hedley encontrados na literatura.....	16
Figura 2 –	Características das plantas e dos atributos do solo que atuam sobre os processos de aquisição e disponibilização de P do solo. Adaptado de Horst et al. (2001).....	20
Figura 3 –	Localização do experimento na Estação Experimental do IAPAR, na região Sudoeste do Paraná (CALEGARI, 2006).....	35
Figura 4 –	Dessorção de P por extrações sucessivas com RTA de diferentes profundidades do solo sob sistema plantio direto, sistema de cultivo convencional e mata nativa.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Localização, classificação e caracterização dos solos e vegetação de estudos das formas de P em solos tropicais e subtropicais sob ambientes naturais.....	14
Tabela 2 – Formas de P em solos tropicais e subtropicais sob ambientes naturais.....	15
Tabela 3 – Textura e composição mineralógica do Latossolo Vermelho Aluminoférrico utilizado no experimento.....	36
Tabela 4 – Formas de fósforo orgânico do solo e P armazenado na BMS em função de diferentes preparos de solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.....	42
Tabela 5 – Teor de carbono orgânico total e estoque de carbono orgânico do solo em função de diferentes preparos de solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.....	43
Tabela 6 – Formas de P orgânico do solo, P armazenado na BMS e P total em função de diferentes culturas de inverno no solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.....	44
Tabela 7 – Fósforo orgânico estimado pelo método da ignição em função de diferentes preparos de solo e culturas de inverno após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.....	44
Tabela 8 – Atividade das enzimas fosfatases ácidas em função de diferentes preparos de solo e culturas de inverno após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.....	45
Tabela 9 – Teor de carbono orgânico total e estoque de carbono do solo em função de diferentes culturas de inverno após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.....	45
Tabela 10 – Textura e composição mineralógica do Latossolo Vermelho Aluminoférrico utilizado no experimento.....	58
Tabela 11 – Formas de P inorgânico e P total do solo em função de diferentes preparos de solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.....	63
Tabela 12 – Balanço de P em função de diferentes preparo de solo e culturas de inverno após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.....	65
Tabela 13 – Fósforo extraído com água destilada e fósforo extraído por RTA em função de diferentes preparos de solo e rotação de culturas após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.....	66
Tabela 14 – Fósforo inorgânico extraído por $\text{NaHCO}_3$ e fósforo extraído por HCl do solo em função de diferentes preparos de solo e rotação de culturas após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.....	67
Tabela 15 – Formas de fósforo inorgânico e fósforo total do solo em função de diferentes culturas de inverno no solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.....	68
Tabela 16 – Dessorção máxima com RTA ( $\beta$ ) e taxa de dessorção constante (k) em função de diferentes preparo de solo e culturas de inverno após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.....	69

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Distribuição das formas de fósforo no solo sob ambientes naturais tropicais e subtropicais.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Alterações na distribuição das formas de fósforo no solo causada pela conversão dos ambientes naturais em áreas de cultivo.....</b>	<b>16</b>
1.2.1 Alterações nas formas de fósforo devido ao tipo de preparo de solo adotado.....	17
1.2.2 Alterações nas formas de fósforo devido à espécie de planta cultivada.....	19
<b>1.3 Referências.....</b>	<b>23</b>
<b>2 HIPÓTESES.....</b>	<b>29</b>
<b>3 OBJETIVOS.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Objetivo geral.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>31</b>
<b>4 ESTUDO I - FORMAS DE FÓSFORO ORGÂNICO NO SOLO SOB DIFERENTES PREPAROS DE SOLO E CULTURAS DE INVERNO POR LONGO PERÍODO DE TEMPO .....</b>	<b>32</b>
<b>4.1 Introdução.....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 Material e métodos.....</b>	<b>35</b>
4.2.1 Descrição do local de estudo e histórico da área experimental.....	35
4.2.2 Coleta das amostras de solo.....	37
4.2.3 Análises de solo.....	38
4.2.4 Análises estatísticas.....	40
<b>4.3 Resultados.....</b>	<b>41</b>
4.3.1 Efeito do sistema de preparo de solo.....	41
4.3.2 Efeito do cultivo de diferentes espécies de plantas no inverno.....	43
<b>4.4 Discussão.....</b>	<b>46</b>
4.4.1 Efeito do sistema de preparo de solo.....	46
4.4.2 Efeito do cultivo de diferentes espécies de plantas no inverno.....	48
<b>4.5 Conclusões.....</b>	<b>49</b>
<b>4.6 Referências.....</b>	<b>50</b>
<b>5 ESTUDO II - FORMAS DE FÓSFORO INORGÂNICO NO SOLO SOB DIFERENTES PREPAROS DE SOLO E CULTURAS DE INVERNO POR UM LONGO PERÍODO DE TEMPO .....</b>	<b>55</b>
<b>5.1 Introdução.....</b>	<b>56</b>
<b>5.2 Material e métodos.....</b>	<b>58</b>
5.2.1 Descrição do local de estudo e histórico da área experimental.....	58
5.2.2 Coleta das amostras de solo.....	59
5.2.3 Análises de solo.....	60
5.2.4 Análises estatísticas.....	61
<b>5.3 Resultados.....</b>	<b>62</b>
5.3.1 Efeito do sistema de preparo de solo.....	62
5.3.2 Efeito do cultivo de diferentes espécies de plantas no inverno.....	65
<b>5.4 Discussão.....</b>	<b>70</b>
5.4.1 Efeito do sistema de preparo de solo.....	70
5.4.2 Efeito do cultivo de diferentes espécies de plantas no inverno.....	71
<b>5.5 Conclusões.....</b>	<b>73</b>
<b>5.6 Referências.....</b>	<b>73</b>
<b>6 CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>78</b>

## INTRODUÇÃO

Os solos altamente intemperizados, como a maioria dos solos brasileiros, são ricos em óxidos de ferro e alumínio e filossilicatos de camada 1:1, como a caulinita, resultando em alta capacidade de adsorção de fósforo (P). A vegetação que naturalmente ocorre sob tais solos desenvolveu diferentes mecanismos adaptativos para poder crescer e se desenvolver sob condições de restrição de P disponível. Em ambientes naturais sob esses solos, o P orgânico constitui uma fração importante do P total, principalmente do P lábil, e existe sincronismo entre a mineralização do P orgânico contido nos resíduos vegetais e a absorção do fosfato pelas plantas e/ou pelos microrganismos do solo. Contudo, quando solos altamente intemperizados são cultivados, a biociclagem é insuficiente para atender a demanda das culturas comerciais.

A quantidade de fertilizantes fosfatados utilizado tem aumentado muito nas últimas décadas. A necessidade de adubação não se restringe apenas as reposições das extrações pelas plantas, pois devido ao grande número de sítios de adsorção, variáveis com a textura e mineralogia dos solos, é necessário aplicar doses elevadas de fertilizantes. Assim, sistemas de produção mantidos por longos períodos de cultivo com aplicações de doses recomendadas de P, levam inevitavelmente ao acúmulo desse elemento no solo. O estudo de diferentes frações de P orgânico e inorgânico, bem como de parâmetros biológicos e bioquímicos diretamente ligados a dinâmica do P no solo, como o P armazenado na biomassa microbiana do solo e a atividade das enzimas fosfatases ácidas, pode ajudar no entendimento das interações existentes entre fontes e drenos de P no sistema solo, que dependerá entre outros, do preparo do solo e das plantas cultivadas.

Estratégias de gestão que mantenham ou aumentem a produtividade das culturas, reduzindo as demandas de fertilizantes fosfatados necessitam ser desenvolvidas. Nesse sentido, a integração de espécies de plantas que podem utilizar mais eficientemente o P do solo e de fertilizantes fosfatados, combinado com sistemas de preparo de solo que proporcionem acumulação de P em formas mais lábeis são condições básicas à sustentabilidade dos sistemas de produção.

# 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 1.1 Distribuição das formas de fósforo no solo sob ambientes naturais tropicais e subtropicais

O fósforo (P) contido no material de origem do solo encontra-se totalmente na forma mineral, sendo que as apatitas (fosfatos de cálcio) são os minerais primários fosfatados mais comuns (TIESSSEN et al., 1984, FROSSARD et al., 1995). A atuação conjunta dos fatores (clima, relevo, organismos, material de origem e tempo) e processos (transformação, translocação, adição e remoção) que regem o intemperismo, faz com que os minerais primários em desequilíbrio termodinâmico tendam a se transformar em substâncias mais estáveis as condições ambientais reinantes. Dessa forma, o P contido nesses minerais é liberado para a solução do solo. Concomitantemente, ocorrem perdas de bases sílica e carbonatos, e aumento na atividade de elementos como ferro e alumínio, com a consequente transformação dos minerais primários em argilas 2:1, e estas em 1:1 e óxidos (TIESSSEN et al., 1984), aumentando a quantidade de grupos funcionais capazes de sorver P.

Como descreve Tiessen et al. (1984), com o avanço do intemperismo do solo o destino do fosfato solubilizado dos minerais primários fosfatados pode ser: a) precipitado com vários cátions, inclusive ocorrendo a neoformação de fosfatos de cálcio (BECK e SANCHES, 1994); b) adsorvido pelos grupos funcionais dos minerais secundários, formando minerais fosfatados mais estáveis termodinamicamente; ou c) incorporado a compostos orgânicos biologicamente, formando o P orgânico do solo. Com todas essas mudanças ocorridas em virtude do intemperismo, a fração sólida mineral do solo passa de fonte a dreno de P da solução (RHEINHEIMER et al., 2008).

Dessa forma, as quantidades, as formas e a distribuição do P no solo sob ambientes naturais estão intimamente ligado ao seu intemperismo, podendo inclusive auxiliar no entendimento da sua pedogênese (WALKER e SYERS, 1976). Nas últimas décadas, vários trabalhos foram desenvolvidos no intuito de avaliar a distribuição das formas de P, em solos com diferentes graus de intemperismo, como os de Walker e Syers (1976), Tiessen et al. (1984), Smeck (1985), Sharpley et al. (1987), Cross e Schlesinger (1995), Guerra et al (1996), Pinochet et al. (2001), Johnson et al. (2003) e Sato et al. (2009). Em todos esses trabalhos

verifica-se que a contribuição dos processos geoquímicos e biológicos para disponibilidade de P varia com a pedogênese (CROSS e SCHLESINGER, 1995). Segundo esses autores, em ecossistemas naturais os processos geoquímicos podem determinar a distribuição do P nos solos no longo prazo. Mas em curto tempo, os processos biológicos influenciam a distribuição do P, porque a maioria do P disponível às plantas é derivado da matéria orgânica do solo.

Os solos ocorrentes nas regiões tropicais e subtropicais possuem intensidade e duração de intemperismo diferentes. Todavia, a maioria dos solos presentes nos biomas tropicais e subtropicais são altamente intemperizados, como os Latossolos e os Argissolos. Estes solos compreendem cerca de  $1,7 \times 10^6$  hectares em 72 países e representam a maior porção de terra potencialmente agricultável no mundo (cerca de 49%). Somente no Brasil eles ocupam 571 milhões de hectares (67% do território) (IBSRAM, 1985 apud Von UEXKÜLL e MUTERT, 1995). Mesmo assim, ainda existem poucos trabalhos sobre a dinâmica do P no solo utilizando o fracionamento de Hedley et al. (1982) em solos tropicais e subtropicais sob ambientes naturais. No Brasil, a maioria dos trabalhos contempla o bioma da Amazônia e Cerrado, enquanto outros biomas, como a Mata Atlântica, o Pantanal e o Pampa, são limitados a poucos trabalhos (Tabela 1). Nesses estudos é possível verificar que existe correlação entre o P orgânico total (soma do extraído pelo bicarbonato e hidróxido de sódio, e em alguns casos do extraído pelo HCl concentrado) e o P total (Figura 1), independente do tipo de solo, evidenciando o controle exercido pelo P sobre a produção de matéria orgânica e, conseqüentemente na acumulação de P orgânico no solo (GUERRA et al., 1996).

Embora existam algumas evidências de que o P ocluso, forma predominante de P nos solos tropicais e subtropicais (Tabela 2), possa ser utilizado pelas plantas em condições de restrição de P (GATIBONI et al, 2007) ou pela redução dos complexos de óxidos de ferro com fosfato durante condições anaeróbicas (RANNO et al, 2007; GONÇALVES e MEURER et al., 2009), ele é usualmente considerado ser de limitada disponibilidade às plantas e microrganismos do solo. Dessa forma, a principal fonte de P disponível nesses solos sob vegetação natural, sem adição de fertilizantes fosfatados, passa ser o *turnover* do P orgânico (JOHNSON et al., 2003), num ciclo muito fechado de conservação do elemento, onde as perdas ou ganhos em curto tempo são mínimas (SOLOMON et al., 2002; REDEL et al., 2008), pois a absorção do P proveniente da decomposição da serrapilheira ocorre tão rapidamente e perto das raízes que pouco deste pode ser absorvido pelos óxidos de ferro e alumínio (VINCENT et al, 2010).

Tabela 1 - Localização, classificação e caracterização dos solos e vegetação de estudos das formas de P em solos tropicais e subtropicais sob ambientes naturais.

Bioma/Vegetação	Subdivisão do Bioma	Solo	Local	Profundidade ----- cm -----	pH <sub>H2O</sub>	Argila ----- g kg <sup>-1</sup> -----	COT	Fonte
Amazônia	Mata de Terra Firme	Latossolo	Bragança – PA	0-5	4,3	nd	13,7	Frizano et al, 2003
Amazônia	Mata de Terra Firme	Latossolo	Manaus – AM	0-5	nd	nd	18,9	Lehmann et al, 2001
Amazônia	Mata de Terra Firme	Latossolo	Manaus – AM	0-5	nd	nd	18,9	Lehmann et al, 2001
Amazônia	Mata de Terra Firme	Latossolo	Manaus – AM	0-10	nd	nd	27,0	Rückamp et al, 2010
Amazônia	Mata de Terra Firme	Latossolo	Manaus – AM	0-15	4,7	nd	26,0	Kuczak et al, 2006
Amazônia	Mata de Igapó	Neossolo Flúvico	Manaus – AM	0-10	nd	nd	15,0	Rückamp et al, 2010
Amazônia	Mata de Várzea	Neossolo Flúvico	Manaus – AM	0-10	nd	nd	20,0	Rückamp et al, 2010
Caatinga	-	Latossolo	Santa Rita – PE	Hz A	6,0	152	0,8	Araújo et al, 2004
Caatinga	-	Luvissole	Parnamirim – PE	Hz A	6,4	97	1,4	Araújo et al, 2004
Caatinga	-	Argissolo	Caicó – RN	0-10	nd	nd	21,0	Rückamp et al, 2010
Caatinga	Carrasco	Neossolo	Ubajara – CE	0-50	5,6*	73*	9,8*	Xavier et al, 2009
Cerrado	-	Latossolo	Uberlândia – MG	0-15	4,7	680	24,8	Lilliefein et al, 2000
Cerrado	-	Latossolo	Uberlândia – MG	0-12	4,7	nd	23,5	Neufeldt et al, 2000
Cerrado	-	Latossolo	Uberlândia – MG	0-12	5,0	nd	9,8	Neufeldt et al, 2000
Mata Atlântica	-	Cambissolo	Caruaru – PE	0-10	nd	nd	59,0	Rückamp et al, 2010
Pantanal	-	Neossolo Flúvico	Cuiabá – MT	0-10	nd	nd	18,0	Rückamp et al, 2010
Pampa	-	Argissolo	Paraiso do Sul – RS	0-2,5	5,2	150	35,0	Gatiboni et al, 2008
Pampa	-	Vertissolo	Corrientes – N Argentina	0-15	5,3	234	21,0	López et al, 2006
Mata Nativa	-	Luvissole	Naberera – N Tanzânia	Hz A	6,6	295	18,7	Solomon e Lehmann, 2000
Cerrado Nativo	-	Neossolo	Puerto Ayacucho – Venezuela	0-10	5,8	nd	7,2	López-Contreras et al., 2007
Cerrado Nativo	-	Neossolo	Puerto Ayacucho – Venezuela	0-10	5,4	nd	8,9	López-Contreras et al., 2007
Cerrado Nativo	-	Neossolo	Puerto Ayacucho – Venezuela	0-10	5,3	nd	5,5	López-Contreras et al., 2007
Vegetação Natural	-	Argissolo	Corrientes – N Argentina	0-15	5,4	251	22	López et al, 2006
Vegetação Natural	-	Neossolo	Corrientes – N Argentina	0-15	4,6	98	3	López et al, 2006
Mata Nativa	-	Argissolo	Wushwush – S Etiópia	0-10	6,4	570	85	Solomon et al., 2002
Mata Nativa	-	Latossolo	Munesa – S Etiópia	0-10	7,6	523	103	Solomon et al., 2002

\* Valores de pH, argila e COT obtidos do solo da camada 0-5 cm.

Tabela 2 - Formas de P em solos tropicais e subtropicais sob ambientes naturais.

Bioma/Vegetação	Fósforo inorgânico (Pi)				Fósforo orgânico (Po)				P res.	Soma		P total	
	Resina	NaHCO <sub>3</sub>	NaOH <sub>0,1M</sub>	NaOH <sub>0,5M</sub>	HCl <sub>1M</sub>	HCl <sub>conc.</sub>	NaHCO <sub>3</sub>	NaOH <sub>0,1M</sub>		NaOH <sub>0,5M</sub>	HCl <sub>conc.</sub>		Pi
Amazônia	7,0	3,7	11,5	-	1,9	18,6	11,1	23,0	-	4,0	42,7	38,1	105
Amazônia	0,9	0,3	9,4	-	1,6	4,2	10,3	29,4	-	-	16,4	39,7	61
Amazônia	0,9	3,7	8,3	-	1,7	5,4	4,9	28,2	-	-	20,0	33,1	56
Amazônia <sup>1</sup>	5,6	8,4	5,6	-	7,0	29,4	32,2	21,0	-	7,0	56,0	60,2	139
Amazônia	2,2	2,3	10,2	-	0,6	3,4	1,9	13,0	-	1,3	18,7	16,2	41
Amazônia <sup>1</sup>	5,1	6,8	3,4	-	3,4	78,1	18,7	6,8	-	3,4	96,8	28,9	170
Amazônia <sup>1</sup>	20,4	15,3	61,3	-	132,8	117,5	61,3	35,7	-	25,5	347,3	122,6	506
Caatinga	7,9	7,2	47,5	-	40,2 <sup>2</sup>	-	6,5	57,8	-	-	224,3	102,8	391
Caatinga	14,3	10,8	38,2	-	58,5 <sup>2</sup>	-	9,2	69,8	-	-	145,7	121,8	347
Caatinga <sup>1</sup>	3,7	18,4	3,7	-	14,7	99,2	3,7	73,5	-	77,1	139,6	154,2	364
Caatinga	0,5	6,5	9,3	8,6	0,2	-	5,4	16,8	30,0	-	25,1	52,2	91
Cerrado	-	6,7	41,5	-	nd	120,0	10,9	101,2	-	-	108,0	168,2	388
Cerrado	3,0 <sup>3</sup>	-	43,0	-	-	99,0	-	83,0	-	-	146,0	145,0	371
Cerrado	3,0 <sup>3</sup>	-	15,0	-	-	41,0	-	39,0	-	-	21,0	59,0	116
Mata Atlântica <sup>1</sup>	*	*	28,9	-	*	103,3	*	103,3	-	53,7	119,8	132,2	409
Pantanal <sup>1</sup>	15,5	27,9	34,1	-	6,2	37,2	15,5	58,9	-	3,1	114,7	77,5	313
Pampa	36,0	16,0	78,0	19,0	11,0	-	30,0	58,0	24,0	-	75,0	160,0	347
Pampa <sup>1</sup>	-	20,3	8,4	2,7 <sup>4</sup>	6,0	8,6	9,7	68,8	3,6 <sup>4</sup>	-	14,2	46,0	142
Mata Nativa	-	55,0	114,0	-	143,0	208,0	37,0	106,0	-	-	77,0	520,0	739
Cerrado Nativo	0,3	2,8	9,3	2,7 <sup>4</sup>	0,2	-	1,8	47,3	10,3 <sup>4</sup>	-	104,4	15,3	179
Cerrado Nativo	0,9	5,3	18,7	4,4 <sup>4</sup>	1,1	-	5,3	51,9	13,2 <sup>4</sup>	-	113,1	30,4	214
Cerrado Nativo	0,6	6,9	12,2	3,4 <sup>4</sup>	0,2	-	6,3	36,9	11,1	-	114,6	23,3	192
Vegetação Natural	-	14,2	9,0	0,7 <sup>4</sup>	4,0	6,0	6,8	71,1	11,1 <sup>4</sup>	-	7,1	33,9	127
Vegetação Natural	-	6,2	3,3	1,7 <sup>4</sup>	0,5	7,7	5,4	37,7	6,2 <sup>4</sup>	-	3,1	19,4	72
Mata Nativa	-	21,9	66,8	-	21,9	326,4	83,3	417,4	-	-	405,3	437,0	1343
Mata Nativa	-	43,3	108,2	-	21,6	251,0	125,5	476,1	-	-	400,3	424,1	1426

<sup>1</sup> Valores obtidos de figuras; <sup>2</sup> Os autores utilizaram H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M para obter essa fração de P inorgânico; <sup>3</sup> Valores de P extraído por Mehlich-I; <sup>4</sup> Extração com NaOH 0,1M + ultrassom; \* Dados não interpretáveis da figura; nd: não detectado.

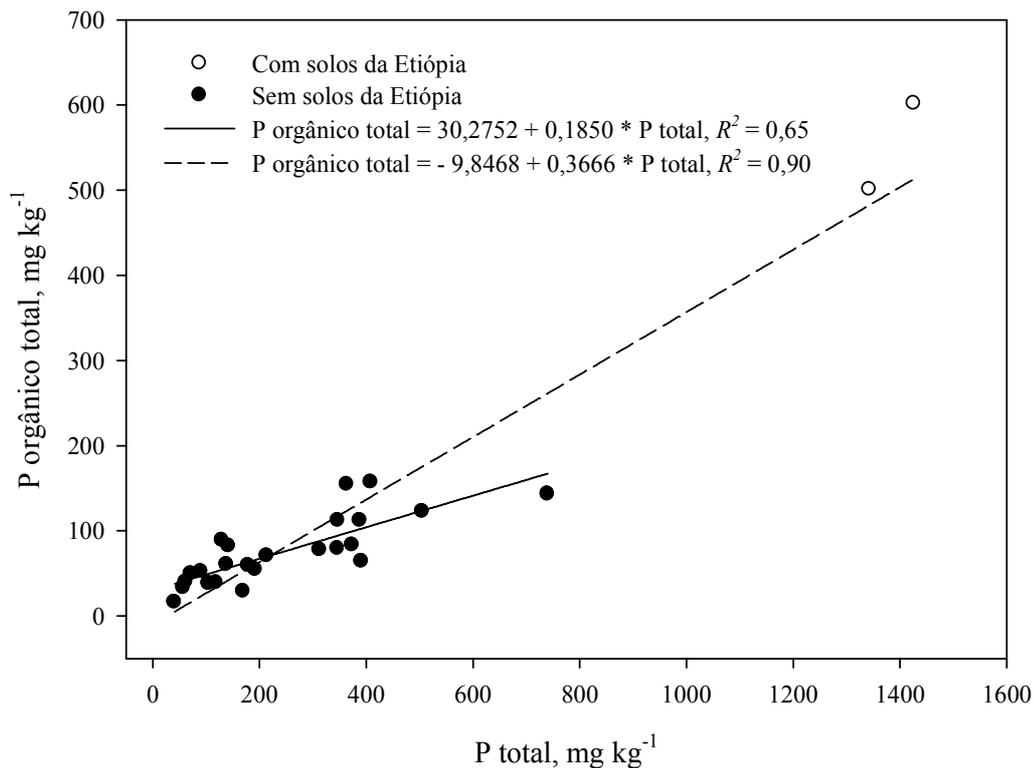


Figura 1 – Relação entre os teores de P total e P orgânico dos solos tropicais e subtropicais utilizando dados obtidos com o fracionamento de Hedley encontrados na literatura (Tabela 2).

## 1.2 Alterações na distribuição das formas de fósforo no solo causada pela conversão dos ambientes naturais em áreas de cultivo

A conversão dos ecossistemas naturais em áreas de cultivo altera profundamente a dinâmica dos elementos no solo, principalmente do P. Tal conversão, geralmente, se dá a partir do corte e posterior queima da vegetação nativa. Ocorre então aumento no teor de P disponível através da entrada de P pelas cinzas, mas parte desse P pode também ser perdido com a fumaça ou pela erosão das cinzas pela água da chuva e pelo vento (NZIGUHEBA e BÜNEMANN, 2005).

Na revisão de estudos sobre transformação dos ecossistemas naturais em sistemas de cultivo nos solos tropicais e subtropicais, Nziguheba e Bünemann (2005) relatam trabalhos em que houve situações com diminuição e aumento do P orgânico do solo. Num primeiro grupo de trabalhos foi observado diminuição do P total, P orgânico e carbono orgânico total (COT) quando do cultivo do solo sem aplicação de fertilizantes fosfatados. Os autores relatam que nesses casos 20-59% das perdas de P foram nas formas orgânicas, sem guardar relação

com o tempo de cultivo, que passaram para formas inorgânicas ou foram perdidas pela erosão e/ou colheita. Em sistemas de cultivo sem entradas de P e carbono, o P orgânico passa a ser fonte de fósforo para as plantas, e inevitavelmente diminui. Em outros trabalhos houve decréscimo do P orgânico do solo mesmo quando o P total aumentou ou foi pouco alterado. Nesses casos os teores de COT também diminuíram, confirmando a observação geral que o COT dos solos tropicais é facilmente perdido com o cultivo contínuo. Contudo, em muitos sistemas de cultivo contínuo, pastagem e culturas perenes com aplicações moderadas de P, resultaram em teores superiores de P inorgânico e orgânico comparativamente ao solo sob ambiente natural, mesmo com pequeno decréscimo do COT. Dessa forma, pode-se afirmar que em sistemas fertilizados, a dinâmica do P orgânico é menos influenciada pela dinâmica do COT que em sistemas naturais e não fertilizados.

Em suma, o cultivo do solo altera a biodiversidade da biomassa, a quantidade de nutrientes exportados, o teor de COT e incorpora insumos externos ao solo (RHEINHEIMER et al., 2008) e, de maneira geral, a alteração na distribuição das formas de P orgânico e inorgânico do solo dependerá basicamente da (i) quantidade de P exportado pela colheita, (ii) da taxa de reposição do P exportado do sistema, (iii) do sistema de preparo de solo adotado, e (iv) da habilidade das plantas acessar reservas de P de formas menos lábeis.

### 1.2.1 Alterações nas formas de fósforo devido ao tipo de preparo de solo adotado

O cultivo do solo sob o sistema plantio direto (SPD) com adição de fertilizantes fosfatados promove acúmulo de P em formas inorgânicas e orgânicas no solo da camada superficial, com diferentes graus de energia de ligação. A maioria dos trabalhos tem mostrado que quando a quantidade de P adicionado excede o removido pelas culturas, ele se acumula principalmente em formas inorgânicas extraídas com NaOH, consideradas de moderada labilidade (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001; CONTE et al., 2003; KUO et al., 2005; GATIBONI et al., 2007; GATIBONI et al., 2008; TAKEDA et al., 2009; VU et al., 2010; WANG et al., 2010). Em estudo realizado sob quatro diferentes solos do Rio Grande do Sul, Rheinheimer e Anghinoni (2003) verificaram que o aumento de P orgânico no SPD comparativamente ao sistema de cultivo convencional (SCC) ocorreu apenas no solo mais resiliente, principalmente na forma moderadamente lábil, não havendo incremento nos solos mais argilosos. Conte et al. (2003) verificaram ainda que o aumento da dose de P aplicada no

SPD diminui linearmente a participação do P orgânico em relação ao P total, pois o P aplicado acumula-se principalmente nas formas inorgânicas, sendo que o P orgânico, assim como o teor de COT não foi alterado pelas doses de P aplicado.

A adsorção do P no solo ocorre primeiramente nos sítios de sorção de maior afinidade, que implica em menor disponibilidade. Posteriormente, o P é adsorvido pelos sítios de afinidade inferior com menor energia, sendo, portanto, de maior disponibilidade às plantas. O revolvimento do solo no SCC expõe novos sítios de adsorção de P e distribui o P em profundidade, resultando em teores de P inorgânico lábil no solo da camada superficial inferiores ao SPD. Segundo Rheinheimer e Anghinoni (2001), no SPD existem também menores perdas de P por erosão e maior acumulação de P na superfície do solo devido à decomposição dos resíduos vegetais das plantas.

O não revolvimento do solo no SPD resulta também em maior quantidade de resíduos aportados na superfície do solo e maior teor de COT no solo da camada superficial. Muitos trabalhos relatam que pode existir competição pelos sítios de sorção de P devido à maior quantidade de ânions orgânicos no solo da superfície do solo sob SPD (REDEL et al., 2007; ZAMUNER et al., 2008). Contudo, em estudo realizado por Boem et al. (2008) utilizando 17 solos sob SCC e 18 solos sob SPD da Argentina, e em estudo realizado por Rheinheimer et al. (2003) em 3 solos do Rio Grande do Sul sob SPD e SCC, não foi observado diminuição na sorção de P no solo da superfície do SPD devido ao enriquecimento de carbono no solo.

No SPD, a maior disponibilidade de P, resíduos orgânicos e teor de COT, juntamente com as menores flutuações de temperatura e umidade, favorecem o crescimento e desenvolvimento da microbiota edáfica. Isto pode resultar em maior quantidade de P estocado na BMS, como observado por Rheinheimer et al (2000) e Carneiro et al. (2004). Em solos altamente intemperizados sob SPD, a menor decomposição e liberação do P dos resíduos vegetais e da matéria orgânica, e a maior quantidade de P na BMS é muito importante, pois previne a rápida fixação do P inorgânico pela fração mineral de solos altamente intemperizados ocorrentes em regiões tropicais e subtropicais, como verificado por Horst et al. (2001) e Martinazzo et al (2007).

Distúrbios físicos ocasionados pelo revolvimento do solo no SCC podem reduzir a colonização de raízes devido à redução da frequência de contato entre fontes potenciais de inóculo (esporos e raízes velhas infectadas) com as raízes novas e a destruição da rede de hifas no solo. Além disso, devido à maior taxa de decomposição no solo revolvido, os compostos orgânicos lábeis e o P armazenado na BMS são convertidos mais rapidamente a P inorgânico (TAKEDA et al., 2009).

### 1.2.2 Alterações nas formas de fósforo devido à espécie de planta cultivada

As plantas possuem diferentes capacidades de absorção, translocação e utilização do P. Como descrito por Lajtha e Harrison (1995), as principais adaptações das plantas para crescer e se desenvolver em ambiente com baixa disponibilidade de P podem ser de dois tipos: (i) estratégias de uso e conservação do P, tais como redução da taxa de crescimento, aumento do crescimento por unidade de P, aumento da reabsorção/translocação do P e aumento da longevidade foliar; e (ii) estratégias de absorção e aquisição de P, tais como modificações na morfologia das raízes, na taxa de absorção das raízes e na produção de exsudatos responsáveis por modificações químicas e bioquímicas no solo da rizosfera. Horst et al. (2001) elaboraram uma figura esquematizando as estratégias de absorção e aquisição de P do solo (Figura 2).

Estratégias que aumentam o contato solo/raiz são particularmente importantes na absorção do P, que é um elemento muito pouco móvel no solo. Dessa forma, o maior comprimento e densidade das raízes, e a maior quantidade de raízes capilares proporcionam maior contato solo/raiz, resultando em maior volume de solo explorado pelas plantas, permitindo acesso a maior quantidade de P disponível no solo. Além disso, as hifas dos fungos micorrízicos arbusculares que se associam às plantas aumentam ainda mais o volume de solo explorado. Entre todas as formas possíveis de aumentar a área de superfície das raízes, a mudança na morfologia de raízes capilares é considerada metabolicamente menos onerosa, e a colonização micorrízica geralmente representa custo significativo de carbono fotossintético (GAHOONIA e NIELSEN, 2004). Wang et al. (2008) e Vu et al. (2010) observaram que o trigo (*Triticum aestivum* L.) absorve maior quantidade de P disponível do solo devido a seu sistema radicular que permite explorar grande volume de solo. Já Redel et al (2007) observaram que o cultivo de trigo após o tremoço (*Lupinus albus* L.) apresentou maior transformação do P adicionado via fertilizantes para formas não lábeis, e atribuíram isso a supressão de formação micorrízica no trigo, uma vez que o tremoço não faz associações com fungos micorrízicos, reduzindo a absorção de P. Quando o solo é mantido sob pousio a menor quantidade de plantas hospedeiras diminui a fonte de inóculo de fungos micorrízicos no solo e também pode ocasionar redução de infecção em espécies hábeis em realizar associações micorrízicas nos cultivos subsequentes, reduzindo a absorção de P.

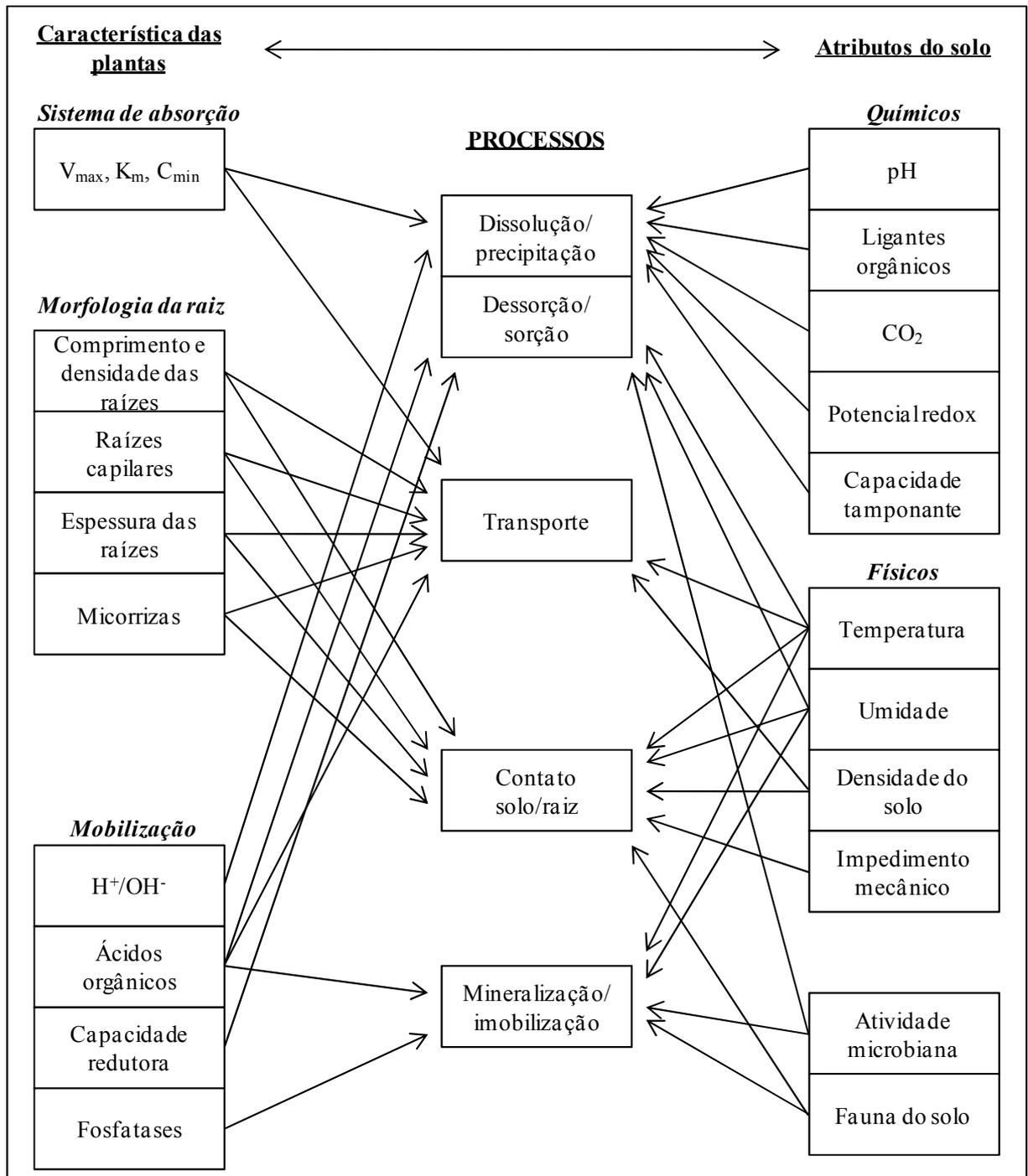


Figura 2 – Características das plantas e dos atributos do solo que atuam sobre os processos de aquisição e disponibilização de P do solo. Adaptado de Horst et al., (2001).

Costa e Lovato (2004) verificaram que o caráter micorrízico ou não micorrízico das plantas cultivadas têm inclusive efeito regulador na atividade enzimática ligada a mineralização de fosfatos orgânicos no solo. Esses autores encontraram que o uso de plantas não micorrizadas como o tremoço e nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) aumentaram a

atividade das fosfatases ácidas e alcalinas do solo, comparativamente ao solo cultivado com ervilhaca (*Vicia sativa* sp.) e aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) (plantas micorrizadas). Todavia, Takeda et al. (2009) observaram que o cultivo de centeio (*Secale cereale* L.) (planta micorrizada), canola (planta não micorrizada) e pousio durante o inverno não tiveram efeito significativo nas frações de P, possivelmente devido aos altos teores de P disponível no solo. As enzimas fosfatases extracelulares e periplasmicas são secretadas por muitas plantas e microrganismos do solo em resposta à necessidade de P, ou passivamente liberado após a morte e lise das células e catalizam a hidrólise do P orgânico (QUIQUAMPOIX & MOUSAIN, 2005). Nesse sentido, Wang et al. (2008) verificaram que a aquisição de fosfato em solo sob condições de deficiência de P foi melhorada pelo aumento da atividade de fosfatases ácidas na rizosfera das plantas de algodão (*Gossypium hirsutum* L.).

A exsudação de ácidos orgânicos como citrato, malato, fumarato e outros promovem mobilização de P pela troca de ligante e/ou pela dissolução e ocupação dos sítios de adsorção (BAYON et al., 2006). Segundo Jones (1998), os ácidos orgânicos no solo podem ainda formar complexos com metais livres na solução ou serem absorvidos e metabolizados pela biomassa microbiana do solo (BMS), que é responsável também pela excreção destes ácidos. Esse autor relata que alguns dos ácidos orgânicos excretados pelas plantas estão envolvidos na produção de energia das plantas, como intermediários no ciclo do ácido tricarbóxico (citrato e malato). Outros são presentes nas células principalmente para balancear a carga de cátions ou manter o potencial osmótico, como o malonato e o oxalato. Todavia, o conteúdo de ácidos orgânicos nas plantas é governado principalmente pelo tipo de fixação de carbono (metabolismo do ácido das Crassuláceas, C<sub>3</sub> ou C<sub>4</sub>), do estado nutricional e idade das plantas. Neumann e Römheld (1999) verificaram ainda que mudanças metabólicas relacionadas à exsudação de ácidos carboxílicos e prótons pelas raízes de plantas devido à deficiência de P induzida dependem de múltiplos fatores, tais como padrões de absorção de cátions e habilidade das plantas em acumular ácidos carboxílicos no tecido das raízes. Entre as plantas cultivadas, a aquisição de P de formas de baixa labilidade devido à exsudação de ácidos orgânicos é frequentemente observada em trabalhos com o cultivo de tremoço (BAIS, 2006; BAYON et al., 2006; SHANE et al., 2008; WANG et al., 2008) e colza (*Brassica napus* L.) (JONES, 1998; GAHOONIA e NIELSEN, 2004; ZHANG et al., 2009).

A alteração do pH do solo da rizosfera tem sido frequentemente demonstrado, ter variações de até 1,7 unidades (LI et al., 2008). As razões para tais mudanças de pH são várias, incluindo o desequilíbrio na absorção cátion-aniônica, particularmente afetada pelas fontes de nitrogênio, e maior efluxo de prótons como resultado da deficiência de P (GAHOONIA e

NIELSEN, 2004). Em um Latossolo, George et al. (2002) cultivaram algumas espécies agrofloretais, milho e tremoço, e verificaram que o milho diminuiu drasticamente o teor de P extraído por resina no solo da rizosfera, e o cultivo do tremoço apresentou a menor depleção dessa fração. Os autores sugerem que a acidificação verificada na rizosfera do tremoço pode ter diminuído a disponibilidade de P. Wang et al. (2008) observaram que a aquisição de fosfato em condições de baixa disponibilidade foi melhorada pela liberação de prótons pelo trigo. Entretanto, Rose et al. (2010) verificaram que as diferentes frações de P não foram igualmente disponíveis para a canola, trigo, grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) e fava (*Vicia faba* L.), em dois solos ácidos e um alcalino, mas que o pH da rizosfera e a exsudação de carboxilatos não pôde explicar completamente as depleções de P inorgânico em cada tipo de solo

A qualidade do resíduo das plantas também pode alterar a dinâmica do P no solo. Rheinheimer e Anghinoni (2003) constataram que o teor de P orgânico extraído por  $\text{NaHCO}_3$  no solo cultivado com aveia/milho foi menor do que no solo cultivado com aveia+ervilhaca/milho+caupi (*Vigna unguiculata* subs *unguiculata* (L.) Walp) e guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millps)/milho, possivelmente devido a baixa qualidade dos resíduos obtido na sucessão com gramíneas. Em solo do Quênia, Bünemann et al. (2004) encontraram maior absorção de P devido a maior biomassa microbiana no solo com rotação milho/crotalária (*Crotalaria juncea* L.) do que no solo sob cultivo contínuo com milho. González-Chávez et al. (2010) verificaram que o uso do sistema de rotação sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) - trigo - soja (*Glycine max* L.) aumentou a quantidade de P armazenado na BMS, principalmente sob SPD, comparado ao cultivo contínuo de trigo. Entretanto, para Rheinheimer et al., (2000) a utilização de diferentes sucessões culturais não alterou os teores de P armazenado na BMS no solo, devido aos altos teores de P disponível.

Baseado no exposto nesta revisão bibliográfica pode-se esperar que a incorporação de plantas com diferentes estratégias de obtenção de P em sucessões culturais pode melhorar a disponibilidade e ciclagem de P no solo, contribuindo para a utilização mais eficiente P do solo e dos fertilizantes, especialmente quando cultivadas sob sistemas de preparo de solo sem revolvimento, que permitem o acúmulo de seus resíduos na superfície do solo. Todavia, o efeito de diferentes preparos de solo e plantas cultivadas na dinâmica do P ainda permanece não totalmente esclarecido, especialmente em solos altamente intemperizados sob condições subtropicais, como os da região Sul do Brasil.

### 1.3 Referências

- ARAÚJO, M. S. B.; SCHAEFER, C. E. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 119, p. 309-321, 2004.
- BAIS, H. P. The role of Root Exudates in Rhizosphere Interactions with Plants and Other Organisms. **Annual Review of Plant Biology**, v. 57, p. 233-266, 2006.
- BAYON, R. C. et al. Soil phosphorus uptake by continuously cropped *Lupinus albus*: A new microcosm design. **Plant and Soil**, v. 283, p. 309–321, 2006.
- 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, p. 1424-1431, 1994.
- BOEM, F. H. G. et al. Phosphorus retention on soil surface of tilled and no-tilled soils. **Soil Science Society of America**, v. 72, p. 158-162, 2008.
- BÜNEMANN, E. K. Phosphorus dynamics in a highly weathered soil as revealed by isotopic labeling techniques. **Soil Science Society of America**, v. 68, p. 1645–1655, 2004.
- CARNEIRO, R. G. et al. Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de Cerrado sob plantio direto e plantio convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 661-669, 2004.
- 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**, v. 27, p.893-900, 2003.
- COSTA, M. D.; LOVATO, P. E. Fosfatases na dinâmica do fósforo do solo sob culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não micorrízicas, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.603-605, 2004.
- 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**, v. 64, p. 197-214, 1995.

FRIZANO, J. et al. Labile phosphorus in soils of forest fallows and primary forest in the bragantina region, Brazil. **Biotropica**, v. 35, p. 2-11, 2003.

FROSSARD, E. et al. Reactions controlling the cycling of P in soils. In: TIESSSEN, H (Ed). **Phosphorus in the global environmental: transfers, cycles and management**. 1. ed. Chichester, U.K: Wiley, p. 107-137, 1995.

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

GATIBONI, L. C. et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 691-699, 2007.

GATIBONI, L. C., et al. Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1753-1761, 2008.

GEORGE, T. S. et al. Changes in phosphorus concentrations and pH in the rhizosphere of some agroforestry and crop species. **Plant and Soil**, v. 246, p. 65-73, 2002.

GONÇALVES, G. K.; MEURER, E. J. Frações de fósforo no solo e sua relação com a absorção pelas plantas de arroz irrigado por alagamento em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 33, p. 357-362, 2009.

GONZÁLEZ-CHÁVEZ, M. C. A. et al. Soil microbial community, C, N, and P responses to long-term tillage and crop rotation. **Soil & Tillage Research**, v. 106, p. 285–293, 2010.

GUERRA, J. G. M. et al. Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, p. 291-299, 1996.

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 America Journal**, v. 46, p. 970–976, 1982.

HORST, W.J. et al. Agronomic measures for increasing P availability to crops. **Plant and Soil**, v. 237, p. 211-223, 2001.

IBSRAM. **Acid Tropical Soils Management Network**. International Board of Soil Research and Management, Bangkok, Tailândia, 1985.

JOHNSON, A. H.; FRIZANO, J.; VANN, D. R. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure, **Oecologia** v. 499, p.135-487, 2003.

JONES, D. L. Organic acids in the rhizosphere - a critical review. **Plant and Soil**, v. 205, p. 25-44, 1998.

KUO, S.; HUANG, B.; BEMBENEK, R. Effects of long-term phosphorus fertilization and winter cover cropping on soil phosphorus transformations in less weathered soil. **Biology and Fertility of Soils**, v.41, p. 116–123, 2005.

KUCZAK, C. N. et al. Inorganic and organic phosphorus pools in earthworm casts (Glossoscolecidae) and a Brazilian rainforest Oxisol. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, p. 553-560, 2006.

LAJTHA, K.; HARRISON, A. F. Strategies of phosphorus acquisition and conservation by plant species and communities. In: TIESSEN, H (Ed). **Phosphorus in the global environmental: transfers, cycles and management**. Ed. 1. Chichester, U.K: Wiley, p. 139-147, 1995.

LEHMANN, J. et al. Inorganic and organic soil phosphorus and sulfur pools in an Amazonian multistrata agroforestry system. **Agroforestry Systems**, v. 53, p. 113-124, 2001.

LI, H. et al. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems. **Plant and Soil**, v. 312, p. 139-150, 2008.

LILIENFEIN, J. et al. Chemical fractionation of phosphorus, sulphur, and molybdenum in Brazilian savannah Oxisols under different land use. **Geoderma**, v. 96, p. 31-46, 2000.

LÓPEZ, C. F.; MENDOZA, R.; VAZQUEZ, S. Fracciones de fósforo em suelos de Corrientes com producción cítrica, arrocera y pastoril. **Ciencia del Suelo**, v. 24, p. 161-168, 2006.

LÓPEZ-CONTRERAS, A. Y.; HERNÁNDEZ-VALENCIA, I.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, D. Fractionation of soil phosphorus in organic amended farms located on savanna sandy soils of Venezuelan Amazonian. **Biology and Fertility of Soils**, v. 43, p. 771-777, 2007.

MARTINAZZO, R; et al. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.563-570, 2007.

NEUFELDT, H. et al. Land-use effects on phosphorus fractions in Cerrado oxisols. **Biology and Fertility of Soils**, v. 31, p. 30-37, 2000.

NEUMANN, G.; RÖMHELD, V. Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. **Plant and Soil**, v. 211, p.121–130, 1999.

NZIGUHEBA, G.; BÜNEMANN, E. K. Organic phosphorus dynamics in tropical agroecosystems. In: TURNER, B.L; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. (Eds). **Organic Phosphorus in the Environmental**. Ed. 1. CAB International, Wallingford, UK, p. 243-268, 2005.

PINOCHET, D.; EPPLE, G.; MACDONALD, R. Fracciones de fósforo orgânico e inorgânico em um transecto de suelos de origen volcanico y metamórfico. **Revista de La Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal**, v. 1, p. 58-69, 2001.

QUIQUAMPOIX, H.; MOUSAIN, D. Enzymatic Hydrolysis of Organic Phosphorus. In: TURNER B.L; FROSSARD E.; BALDWIN D.S. (Eds). **Organic Phosphorus in the Environmental**. 1. ed. CAB International, Wallingford, UK, p. 89-112, 2005.

RANNO, S. K.; SILVA, L. S.; MALLMANN, F. J. K. Fracionamento do fósforo inorgânico em solos de várzeas do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrociências**, v. 13, p. 47-54, 2007.

REDEL Y. D. et al. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol, **Geoderma**, v. 139, p. 388–396, 2007.

REDEL, Y. D.; RUBIO, R.; BORIE, F. Phosphorus fractions and phosphatase activity in an Andisol under different forest ecosystems. **Geoderma**, v. 145, p. 216–221, 2008.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p.589-597, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p.151-160, 2001.

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

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 41-49, 2003.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Fósforo orgânico do solo. In: SANTOS, G. A. (Ed.) et al. **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais & Subtropicais**. 2.ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metropole, p. 139-157, 2008.

ROSE, T. J.; HARDIPUTRA, B.; RENGEL, Z. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. **Plant Soil**, v. 326, p. 159–170, 2010.

RÜCKAMP, D. et al. Phosphorus forms in Brazilian termite nests and soils: Relevance of feeding guild and ecosystems. **Geoderma**, v. 155, p. 269-279, 2010.

SATO, S. et al. Biogenic calcium phosphate transformation in soils over millennial time scales. **Journal of Soils and Sediments**, v. 9, p. 194-205, 2009.

SHANE, M. W. et al. Impact of phosphorus mineral source (Al–P or Fe–P) and pH on cluster-root formation and carboxylate exudation in *Lupinus albus* L. **Plant and Soil**, v. 304, p. 169-178, 2008.

SHARPLEY, A. N.; TIESSEN, H.; COLE, C. V. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. **Soil Science Society of American Journal**, v. 51, p. 362-365, 1987.

SMECK, N, E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. **Geoderma**, v. 36, p. 185-199, 1985.

SOLOMON, D. et al. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands, **Geoderma**, v. 105, p. 21–48, 2002.

SOLOMON, D.; LEHMANN J. Loss of phosphorus from soil in semi-arid northern tanzania as a result of cropping: evidence from sequential extraction and  $^{31}\text{P}$ -nmr spectroscopy. **European Journal of Soil Science**, v. 51, p. 699-708, 2000.

TAKEDA, M. Phosphorus transformation in a soybean-cropping system in Andosol: effects of winter cover cropping and compost application. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 85, p. 287–297, 2009.

TIESSSEN, H.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of American Journal**, v. 48, p. 853-858, 1984.

VINCENT, A. G.; TURNER, B. L.; TANNER, E. V. J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist Forest. **European Journal of Soil Science**, v. 61, p. 48–57, 2010.

Von UEXKÜLL, H. R.; MUTERT, E. Rehabilitation of Anthropoc Savanna. In: TIESSSEN, H (Ed). **Phosphorus in the global environmental: transfers, cycles and management**. 1. ed. Chichester, U.K: Wiley, p. 149-154, 1995.

VU, D. T.; TANG, C.; ARMSTRONG, R. D. Transformations and availability of phosphorus in three contrasting soil types from native and farming systems: A study using fractionation and isotopic labeling techniques, **Journal of Soils and Sediments**, v. 10, p.18–29, 2010.

WALKER, T. W.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, Netherlands, v 15, p. 01-19, 1976.

WANG, X. et al. Phosphorus acquisition characteristics of cotton (*Gossypium hirsutum* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.) and white lupin (*Lupinus albus* L.) under P deficient conditions. **Plant and Soil**, v. 312, p. 117-128, 2008.

WANG, J. et al. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-years superphosphate application. **Pedosphere**, v. 20, p. 304-310, 2010.

XAVIER, F. A. S. et al. Phosphorus fractionation in a sandy soil under organic agriculture in Northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 151, p. 417-423, 2009.

ZAMUNER, E. C.; PICONE, L. I., ECHEVERRIA, H. E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices, **Soil & Tillage Research**, v. 99, p. 131–138, 2008.

ZHANG, H. et al. Genotypic differences in phosphorus acquisition and the rhizosphere properties of *Brassica napus* in response to low phosphorus stress. **Plant and Soil**, v. 320, p. 91-102, 2009.

## 2 HIPÓTESES

No sistema plantio direto (SPD) a adição de fertilizantes fosfatados em doses superiores as retiradas pelas culturas e o não revolvimento do solo resulta na saturação dos sítios de adsorção mais ativos no solo das camadas superficiais. Existe ainda a competição pelos sítios de ligação exercida pelos compostos orgânicos de baixo peso molecular, devido aos altos teores de matéria orgânica, diminuindo a adsorção do fósforo (P) adicionado. O P acumula-se no solo principalmente nas formas inorgânicas preexistentes, notadamente na fração extraída pelo NaOH, convencionalmente dita ligada com moderada energia aos óxidos de ferro e alumínio, e limitado pela capacidade de acumulação fixa característica de cada solo. Ao ultrapassar tal limite o P deve permanecer em formas inorgânicas mais lábeis. Já no sistema de cultivo convencional (SCC), o revolvimento do solo expõe novos sítios de adsorção, e a taxa de decomposição dos resíduos vegetais é maior do que no SPD, impedindo o acúmulo de matéria orgânica e P orgânico no solo da camada superficial. De acordo com o exposto acima, a primeira hipótese desse trabalho é que:

- i) o fosfato aplicado anualmente via fertilizantes por longo período de cultivo acumula nas formas inorgânicas de P preexistentes, pois muito pouco é convertido em P orgânico. No SPD deve criar forte gradiente em profundidade, mais acentuado nas formas lábeis inorgânicas, devido à baixa mobilidade do fosfato no solo que permanece no local em que foi aplicado. Também se espera maior atividade das enzimas fosfatases ácidas e maior teor de P armazenado na biomassa microbiana do solo (BMS) na superfície do SPD, comparativamente ao SCC.

As plantas cultivadas possuem diferentes estratégias de absorção e aquisição de P, como modificações na morfologia das raízes e liberação de exsudatos radiculares, que determinam a sua capacidade/habilidade de adquirir P de frações de diferente labilidade e natureza (orgânico e inorgânico). Contudo, as diferenças das plantas em acumular diferentes tipos de fosfato são desprezíveis, e após a mineralização dos resíduos o P inorgânico liberado segue a mesma rota de adsorção do P em solução. Logo, o fator crucial na alteração da distribuição das formas de P no solo é a quantidade de P reciclado pelas culturas, determinado

pela produção de biomassa e pela capacidade de acessar P de formas de labilidade inferior. Deste modo, a segunda hipótese desse trabalho é que:

- ii) o uso de diferentes espécies de plantas por um longo período altera as formas de acumulação de P no solo, principalmente as mais lábeis, e também em parâmetros biológicos e bioquímicos ligados a dinâmica do P no solo, como a quantidade de P estocado na BMS e na atividade das enzimas fosfatases ácidas, em especial no SPD, onde grande quantidade de resíduos é depositada na superfície do solo.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo geral**

Avaliar a dinâmica do fósforo (P) num solo muito argiloso de região subtropical, originalmente coberto por Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Mista Montana), seguida de cultivo convencional para produção de grãos e, a partir de 1986 sob sistemas de preparo de solo convencional e plantio direto, com cultivo de diferentes espécies de plantas de inverno em sequência às culturas de soja e de milho.

### **3.2 Objetivos específicos**

Foram elaborados dois objetivos específicos, os quais serviram também de estratégia de estudo, sendo abordado um em cada estudo do presente trabalho.

a) Avaliar a alteração nas formas de P orgânico no solo submetido a diferentes sistemas de preparo de solo cultivado com diferentes espécies de plantas durante o inverno por um longo período, e sua influência em parâmetros biológicos e bioquímicos ligados ao ciclo do P, como a quantidade de P estocado pela biomassa microbiana do solo e a atividade das enzimas fosfatases ácidas.

b) Avaliar o efeito de longo período de utilização de sistemas de preparo com e sem revolvimento do solo combinados com o cultivo de espécies de plantas com habilidades e estratégias distintas de aquisição de P, na capacidade do solo disponibilizar o fosfato adicionado via fertilizante e na distribuição das formas de P inorgânico no solo.

## **4 ESTUDO I: FORMAS DE FÓSFORO ORGÂNICO NO SOLO SOB DIFERENTES PREPAROS DE SOLO E CULTURAS DE INVERNO POR LONGO PERÍODO DE TEMPO**

**Resumo:** O fósforo (P) orgânico é importante fonte de fosfato para as plantas, tanto em ambientes naturais quanto em solos cultivados. O cultivo de plantas com alta capacidade de reciclagem de P pode aumentar a importância das formas orgânicas na disponibilização de fosfato, especialmente quando o solo não é revolvido. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito de longo período de cultivo de diferentes espécies de inverno sob diferentes sistemas de preparo de solo na distribuição das formas de P orgânico do solo, no conteúdo de P armazenado na biomassa microbiana do solo (BMS) e na atividade das enzimas fosfatases ácidas. Em 1986 foi estabelecido o experimento com seis tratamentos de inverno (tremoço azul, ervilhaca peluda, aveia preta, nabo forrageiro, trigo e pousio) implantados num Latossolo Vermelho Aluminoférrico na região sudoeste do Paraná, sob sistema plantio direto (SPD) e sistema de cultivo convencional (SCC). O cultivo do solo com aplicações racionais de fertilizante fosfatado, de acordo com as necessidades das plantas e tipo de solo, mantendo altos teores de carbono orgânico do solo resultou no acúmulo de P na forma orgânica. O cultivo de plantas durante o período hibernal em solo subtropical altamente intemperizado aumenta a importância das reações biológicas do ciclo do P, em especial no SPD, onde grande quantidade de resíduos vegetais é depositada na superfície do solo, aumentando o teor de P orgânico do solo, o teor de P estocado na BMS e a atividade das enzimas fosfatases ácidas.

**Palavras-chave:** Sistema Plantio Direto. Sistema de Cultivo Convencional. Fracionamento do Fósforo. Fósforo na Biomassa. Fosfatase Ácida. Culturas de Cobertura.

### **FORMS OF ORGANIC PHOSPHORUS IN SOIL UNDER DIFFERENT SOIL MANAGEMENT SYSTEM AND WINTER CROPS IN A LONG TERM**

**Abstract:** Organic Phosphorus (P) is an important source of phosphate for plants in both natural environments and in cultivated soils. Growing plants with high capacity for recycling of P may increase the importance of organic forms in the availability of phosphate, especially when the soil is not plowed. The aim of this study was to evaluate the effect of long cultivation period of different winter's species under different systems of soil management in the distribution of the forms of organic P of soil, in the P content stored in the soil microbial biomass (SMB) and in the acid phosphatase enzyme activity. In 1986 was established the experiment with six treatments of winter (blue lupine, hairy vetch, oats, turnip, wheat and fallow) implanted in a Rhodic Hapludox in southern Brazil, under no-tillage system (NT) and conventional tillage system (CT). The cultivation of the soil with rational application of phosphate fertilizer, according to plant needs and soil type, while maintaining high levels of soil organic carbon resulted in the accumulation of P in organic form. Growing plants during the winter period in highly weathered subtropical soil increases the importance of biological reactions in the P cycle, especially in the SPD, where a large amount of vegetable waste is deposited on the soil surface, increasing the content of soil organic P, P content stored in the SMB and acid phosphatase enzyme activity.

**Key words:** No-tillage. Conventional Tillage. Fractionation of Phosphorus. Biomass Phosphorus. Acid Phosphatase. Cover Crops.

## 4.1 Introdução

A transformação dos ecossistemas naturais em áreas cultivadas altera a distribuição das formas de fósforo (P) no solo, principalmente das formas orgânicas. Geralmente, o P orgânico declina rapidamente em sistemas de cultivo contínuo sem aplicação de fertilizantes fosfatados, concomitantemente com a diminuição dos teores de carbono orgânico total (COT) e P total (SOLOMON e LEHMANN, 2000; SOLOMON et al., 2002; CONTE et al., 2002). Existe pouco entendimento dos fatores que favorecem o aumento do P orgânico do solo, mas normalmente ocorre em sistemas onde os teores de COT e P total são aumentados ou não são profundamente alterados (NZIGUHEBA e BÜNEMANN, 2005), como verificado por Redel et al. (2007).

O P orgânico pode representar de 20 a 80% do P total do solo (DALAL, 1977). Em ambientes naturais, após a sua mineralização, ele é fonte de P para as plantas, principalmente quando sob solos altamente intemperizados como os tropicais e subtropicais (VINCENT et al., 2010), e em solos cultivados, desde que com muito baixa disponibilidade de P (GATIBONI et al., 2005). Apesar disso, é menos estudado que as formas de P inorgânico, devido principalmente às limitações analíticas, uma vez que não existem métodos diretos para quantificação do P orgânico do solo (TURNER et al., 2005).

Muitos estudos têm se concentrado nas frações de P orgânico extraído pelo bicarbonato e pelo hidróxido de sódio, consideradas formas que podem ser mineralizadas e posteriormente absorvidas pelas plantas em curto e médio prazo. Todavia, essa relação depende, entre outros, do tipo de solo e da planta cultivada (CHEN et al., 2002). Por isso, a dinâmica do P orgânico no solo submetido à diferente uso e manejo do solo pode ser melhor entendida utilizando-se parâmetros microbiológicos e bioquímicos sensíveis a essas mudanças, como P armazenado na biomassa microbiana do solo (BMS) e a atividade das enzimas fosfatases ácidas (MATSUOKA et al., 2003; CARNEIRO et al., 2004; GATIBONI et al., 2008).

Os microrganismos do solo representam um reservatório dinâmico de nutrientes importante e potencialmente disponível para as plantas. Segundo Oberson et al. (2001), eles desempenham papel fundamental na transformação do P orgânico do solo através da excreção de fosfatases e solubilização de formas de P moderadamente lábeis, e da síntese e liberação de P orgânico. Conte et al. (2002) relatam ainda que eles atuam prevenindo a sorção do fosfato

pelos colóides inorgânicos do solo através da imobilização em seus tecidos. Posteriormente, com a sua morte e lise das células o P é liberado de forma mais sincronizada com a demanda das plantas (MARTINAZZO et al., 2007).

O sistema plantio direto (SPD) caracteriza-se por maior teor de COT e de P total no solo das camadas superficiais, comparativamente ao sistema de cultivo convencional (SCC), devido principalmente ao não revolvimento do solo, que permite acúmulo do P aplicado via fertilizantes e do carbono e P de resíduos culturais no solo dessa camada, como observado por Rheinheimer e Anghinoni et al (2001), Redel et al. (2007) e Zamuner et al. (2008). Tais condições são adequadas para maior transformação do P inorgânico adicionado via fertilizantes em formas orgânicas pelas plantas e BMS, aumentando a importância das reações biológicas do P no SPD (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2003).

Segundo Horst et al. (2001), o cultivo de diferentes espécies de plantas altera a dinâmica do P no solo principalmente devido à reciclagem do P mobilizado via resíduo e devido à colonização de microrganismos mobilizadores de P na rizosfera das culturas subsequentes nos sistemas de rotação. Nesse sentido, Rheinheimer e Anghinoni (2003) relatam que o menor teor de P orgânico no solo sob sucessão de aveia (*Avena strigosa* Schreb)/milho (*Zea mays* L.) comparativamente ao solo cultivado com aveia+ervilhaca (*Vicia* sp.)/milho+caupi (*Vigna unguiculata* subs *unguiculata* L. Walp) e ao solo cultivado com guandu (*Cajanus cajan* L. Millps)+milho, foi devido à maior entrada de resíduos de plantas ao solo e/ou a habilidade das plantas como caupi e guandu absorverem altas quantidades de P da solução do solo. Costa e Lovato (2004) verificaram ainda que as plantas de cobertura tiveram efeito regulador na atividade enzimática ligada à mineralização de fosfatos orgânicos no solo, e que tal efeito depende do caráter micorrízico ou não micorrízico das espécies utilizadas. Esses autores verificaram que o solo cultivado com espécies não micorrízicas apresentou maior atividade de fosfatases ácidas e alcalinas, promovendo possivelmente maior mineralização bioquímica do P orgânico do solo, e que isto pode ter compensado a menor absorção de P devido à ausência de micorrizas.

O presente estudo objetivou avaliar em um solo muito argiloso de região subtropical sob longo período de cultivo com aplicações de doses racionais de fertilizantes fosfatados, de acordo com as necessidades das plantas e tipo de solo (i) o efeito de diferentes preparos de solo e (ii) o efeito do cultivo de diferentes espécies de plantas de inverno, na distribuição das formas de P orgânico, no conteúdo de P armazenado na biomassa microbiana e na atividade das enzimas fosfatases ácidas.

## 4.2 Material e métodos

### 4.2.1 Descrição do local de estudo e histórico da área experimental

O experimento foi instalado na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) no município de Pato Branco, região sudoeste do Paraná (52° 41' W e 26° 07' S) (Figura 3), sob responsabilidade do pesquisador Dr. Ademir Calegari. A classificação do clima da região é subtropical úmido, Cfb, segundo classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.200 a 1.500 milímetros. O relevo é suave ondulado com pendentes entre 4-7% de declividade, com clima caracterizado por verão fresco, com média do mês mais quente <22 °C e a do mês mais frio <18 °C, sem estação seca definida (CALEGARI, 2006). O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho Aluminoférrico, muito argiloso, formado a partir de derramamento basáltico (Tabela 3).



Figura 3 – Localização do experimento na Estação Experimental do IAPAR, na região Sudoeste do Paraná (CALEGARI, 2006).

Tabela 3 – Textura e composição mineralógica do Latossolo Vermelho Aluminoférrico utilizado no experimento.

Horizonte	Textura <sup>1</sup>			Mineralogia <sup>2</sup>							Oxalato <sup>3</sup>	
	Argila	Silte	Areia	1:1 <sup>4</sup>	2:1 <sup>5</sup>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Maghemita	Hematita	Goethita	Gibbsita	Fe	Al
	----- g kg <sup>-1</sup> -----											
A (0-1 m)	720	140	140	680	132	140	130	510	360	50	55	22
Bw (1-2 m)	-	-	-	710	128	140	120	540	340	20	-	-

<sup>1</sup>Calegari (2006); <sup>2</sup>Costa (1996); <sup>3</sup>Solo da camada 0-40cm; <sup>4</sup>Caulinita e halloisita; <sup>5</sup>Vermiculita e/ou montmorillonita.

A área experimental era coberta por Mata Atlântica até 1976, quando esta foi derrubada, passando-se a cultivar o solo com milho (*Zea mays* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), sob o sistema de cultivo convencional (SCC), com aração e gradagens leves. A partir do inverno de 1986 os tratamentos combinados de diferentes preparos de solo e espécies cultivadas no inverno foram implantados na área experimental. Os tratamentos de inverno foram: tremoço azul (*Lupinus angustifolius* L.), ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth), aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), e pousio, implantadas sob SCC, com uma aração e duas gradagens antes de cada cultivo, e sob sistema plantio direto (SPD).

Os tratamentos de inverno foram implantados somente em 12 dos 23 cultivos (1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1992, 1994, 1999, 2000, 2001, 2005 e 2008). Em 1991, 1995, 1996, 1998, 2006 e 2009 cultivaram-se aveia preta, e em 1997, 2002, 2003, 2004 e 2007 foi cultivada aveia preta consorciada com nabo forrageiro, ambos em todas as parcelas, exceto no tratamento pousio. Em 1993, todas as parcelas permaneceram em pousio. As plantas de cobertura foram controladas no estágio de pleno florescimento através de rolo-faca (tremoço, ervilhaca peluda, aveia preta e nabo forrageiro) ou pela aplicação de herbicidas (pousio), sendo que ocasionalmente, após o rolo-faca, o controle da vegetação foi complementado com herbicida. As parcelas com trigo foram colhidas até 1995 (7 cultivos), e seus resíduos deixados na superfície do solo antes do preparo de solo para o cultivo de verão. Nos demais anos o trigo foi manejado como as demais plantas de cobertura. No verão a área toda era cultivada com soja (*Glycine max* L.) ou milho. Durante o período experimental a soja foi cultivada por 13 vezes (1989, 1990, 1991, 1993, 1995, 1997, 1998, 2000, 2001, 2002, 2004, 2005 e 2007) e o milho em 9 (1986, 1987, 1988, 1992, 1994, 1996, 1999, 2003 e 2008). Em 2006 não foi realizado nenhum cultivo de verão.

A adubação foi realizada sempre nos cultivos de verão sendo a mesma quantidade de fertilizante aplicado em todos os tratamentos. Fósforo, potássio e 1/3 do nitrogênio (N) foram aplicados simultaneamente ao plantio, na linha de semeadura, e o restante do N 45 dias após. O total de fertilizantes aplicados durante o período experimental foi 1510 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 805 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 501 kg ha<sup>-1</sup> de N. Durante o período de condução do experimento foi aplicado calcário em superfície 6 vezes, num total de 11,5 Mg ha<sup>-1</sup> (1,0; 2,0; 3,0; 1,5; 2,0; 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em todas as parcelas, em 1989, 1992, 1995, 1999, 2001 e 2006 respectivamente).

#### 4.2.2 Coleta das amostras de solo

As amostras de solo foram coletadas em outubro de 2009, no início da floração da aveia preta. Em cada parcela foram abertas duas trincheiras com pá de corte onde foi coletado o solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 cm. As subamostras das duas trincheiras de cada parcela foram misturadas para compor a amostra da respectiva profundidade. Também, foi coletada amostra de solo sob mata nativa, em área contígua a área experimental. Logo após a coleta, o solo das amostras foi acondicionado em caixas térmicas com gelo e transportado via terrestre até o laboratório de Química e Fertilidade do Solo da UFSM, onde foi peneirado em malha de 2 mm e armazenado em incubadora a ±4°C até a realização das análises de P armazenado na BMS e atividade das enzimas fosfatases ácidas. Logo após o solo das amostras foi seco em estufa de circulação forçada de ar a ±60°C e armazenado para as demais análises. Numa trincheira por parcela foram coletadas amostras de solo indeformadas na parte superior de cada estratificação do solo com auxílio de anéis (3 x 6,12 cm) para estimar a densidade do solo, que resultou nas camadas amostradas de 0-3, 5-8, 10-13, 20-23 e 30-33 cm.

#### 4.2.3 Análises de solo

As formas de P orgânico do solo foram estimadas pelo fracionamento descrito por Hedley et al., (1982), com as modificações feitas por Rheinheimer (2000). As formas de P foram sequencialmente extraídas pelos seguintes extratores: resina de troca aniônica (RTA) (placas AR 103 QDP 434) (P inorgânico);  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  à pH 8,5 (P inorgânico e orgânico);  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  (P inorgânico e orgânico);  $\text{HCl}$  1,0 mol  $\text{L}^{-1}$  (P inorgânico);  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (P inorgânico e orgânico). Todos os extratores permaneceram em contato com a amostra durante 16 horas em agitador tipo 'sem fim' (33 rpm), com posterior centrifugação a 2510 g por 30 minutos. Neste estudo, apenas as frações orgânicas foram utilizadas, sendo as formas inorgânicas apresentadas e discutidas no estudo II. Nos extratos alcalinos de  $\text{NaHCO}_3$  e  $\text{NaOH}$ , o P total foi estimado por digestão com persulfato de amônio e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  em autoclave a  $121^\circ\text{C}$  (USEPA, 1971), e posterior determinação do P conforme metodologia de Murphy e Riley (1962). O P inorgânico desses extratos foi determinado pelo método de Dick e Tabatabai (1977), sendo o P orgânico obtido pela diferença entre P total e o P inorgânico. O resíduo foi seco em estufa a  $\pm 50^\circ\text{C}$  e moído em gral de ágata, e posteriormente estimou-se o P orgânico pelo método de ignição (OLSEN e SOMMERS, 1982). O P orgânico extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$  foi considerado lábil e o extraído pelo  $\text{NaOH}$  moderadamente lábil. O P orgânico residual foi considerado não-lábil. A soma dessas frações de P orgânico foi chamada P biológico, conforme sugerido por Cross e Schlesinger (1995).

O P total foi estimado por digestão com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$  na presença de  $\text{MgCl}_2$  saturado (OLSEN e SOMMERS, 1982). A estimativa do P orgânico total foi feita pelo método de ignição do solo a  $550^\circ\text{C}$ , com posterior extração com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,25 mol  $\text{L}^{-1}$ , sendo a quantidade de P orgânico obtido pela diferença entre o P extraído da amostra ignificada e a não ignificada. (OLSEN e SOMMERS, 1982).

O conteúdo de P armazenado na BMS foi estimado pelo método de fumigação-extração, de Hedley e Stewart (1982) adaptado por Rheinheimer et al. (2000), descrita resumidamente a seguir: amostras de 0,500 g de solo úmido foram pesadas em triplicatas (conjuntos A, B e C) e acondicionadas em tubos *falcon* de 15 mL. Foi realizada uma extração de P com (RTA), para diminuir a concentração de P no solo. Na seqüência, os tubos foram centrifugados a 2510 g por 30 minutos. Descartou-se o sobrenadante. No solo do conjunto A foi adicionado 0,5 mL de clorofórmio livre de álcool e nos conjuntos B e C, 0,5 mL de água destilada. Em seguida, os três conjuntos permaneceram em repouso por 24 h. Após este

período, nos conjuntos A e B adicionou-se 10 mL de  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  a pH 8,5 e, no conjunto C, 10 mL desse extrator contendo 50 mg de P  $\text{L}^{-1}$ . Posteriormente, os conjuntos de frascos foram submetidos à agitação por 16 h, em agitador do tipo ‘sem fim’ (33 rpm). Novamente, ao fim da agitação, as amostras foram novamente centrifugadas a 2510 g por 30 minutos retirando-se uma alíquota do sobrenadante. O extrato foi digerido de acordo com método da USEPA (1971) e o P determinado pelo método de Murphy e Riley (1962). O conteúdo de P armazenado na BMS foi estimado pela equação:

$$\text{Parmazenado na BMS} = \frac{50(P_A - P_B)}{0,40(P_C - P_B)}$$

onde o fator  $50/(P_C - P_B)$  é o ajuste da capacidade de adsorção do solo (MOREL et al., 1996) e o fator 0,4 é usado, assumindo-se que somente 40% do P microbiano é liberado como P inorgânico pelo  $\text{CHCl}_3$  (BROOKES et al., 1982). Os resultados foram expressos em relação ao solo seco.

A atividade das enzimas fosfatases ácidas (fosfomonoesterases) foi avaliada segundo metodologia de Tabatabai e Bremner (1969). Ela consiste da incubação de 1,000 g de solo na umidade de campo com a mistura de 1 mL de *p*-nitrofenyl fosfato e 4 mL de tampão modificado com pH 6,5 (MUB, pH 6,5), eliminando-se o tolueno. A incubação foi realizada por 1 hora a 37°C em erlenmeyers de 25 ml fechados e protegidos da luz por papel laminado. Após a incubação foi adicionado 1 mL de  $\text{CaCl}_2$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  e 4 mL de  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ , misturado através de agitação manual e posteriormente filtrado em papel Whatman nº 2v. A atividade da fosfatase foi estimada pela quantificação espectrométrica do *p*-nitrofenol liberado na mistura filtrada a 400 nm.

O teor de carbono orgânico total (COT) foi estimado pelo método de combustão úmida com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado e  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , corrigindo para o teor obtido pelo auto-analisador de carbono, conforme metodologia proposta por Rheinheimer et al. (2008). O estoque de carbono no solo foi calculado conforme metodologia proposta por Fernandes e Fernandes (2008) para solos sob diferentes condições de manejo, corrigindo os estoques de carbono para uma mesma massa de solo. A fórmula utilizada foi:

$$Cs = \sum_{i=1}^{n=1} Cti + \left[ Mtn - \left( \sum_{i=1}^n Mti - \sum_{i=1}^n Msi \right) \right] * Ctn$$

onde:

$C_s$  = estoque de C total, corrigido em função da massa de solo de uma área de referência.

$$\sum_{i=1}^{n-1} C_{ti} = \text{somatório dos estoques de C da primeira a penúltima camada amostrada, no tratamento considerado (Mg ha}^{-1}\text{)}.$$

$M_{tn}$  = massa de solo da última camada amostrada no tratamento (Mg ha<sup>-1</sup>).

$$\sum_{i=1}^n M_{ti} = \text{somatório da massa total de solo amostrado sob o tratamento (Mg ha}^{-1}\text{)}.$$

$$\sum_{i=1}^n M_{si} = \text{somatório da massa total de solo amostrado na área de referência (Mg ha}^{-1}\text{)}.$$

$C_{tn}$  = teor de C do solo da última camada amostrada (Mg de C Mg<sup>-1</sup> de solo).

#### 4.2.4 Análises estatísticas

O modelo estatístico adotado foi um trifatorial com blocos casualizados, e parcelas subdivididas com três repetições. Os sistemas de preparo do solo foram as parcelas principais, as culturas de inverno as subparcelas e as camadas de solo amostradas as subsubparcelas. Quando os efeitos dos tratamentos foram significativos a 5% de probabilidade de erro, as diferenças entre as médias dos sistemas de preparo, das culturas de inverno e das camadas de solo foram comparadas pelo teste de Tukey.

### 4.3 Resultados

#### 4.3.1 Efeito do sistema de preparo de solo

O solo da camada 0-5 cm sob SPD apresentou maior teor de todas as frações de P orgânico (exceto a fração residual), maior teor de P armazenado na BMS, maior teor de P total (Tabela 4), e maior atividade das enzimas fosfatases ácidas (Tabela 8), que o solo sob SCC. O P biológico foi maior no solo sob SPD do que sob SCC até 10 cm de profundidade. A quantidade de P orgânico estimado pelo método de ignição foi maior no SPD do que no SCC apenas no solo da camada 0-5 cm, e acessou somente 36% do P total do solo em média (dados não apresentados).

No SCC, o teor de P orgânico lábil extraído por  $\text{NaHCO}_3$  e o teor de P total do solo das camadas 10-20 e 20-30 cm foram superiores aos encontrados no SPD (Tabela 4). O teor de P armazenado na BMS foi maior no SCC apenas no solo da camada 20-30 cm. No solo da camada 10-20 cm, a atividade das enzimas fosfatases ácidas foi maior no SCC do que no SPD somente quando o solo foi cultivado durante o período hibernar.

O P biológico representou em média 45 e 35% do P total no solo cultivado e no solo da mata, respectivamente. Exceto o P orgânico extraído por  $\text{NaHCO}_3$ , todas as outras formas de P orgânico (extraído por  $\text{NaOH}$  0,1 e 0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ , e residual), apresentaram valor absoluto e relativo ao P total maior no solo cultivado do que no solo sob vegetação nativa (Tabela 4).

Comparativamente ao solo cultivado, o solo sob vegetação nativa apresentou menor teor de P total e maior atividade das enzimas fosfatases ácidas em todas as camadas (Tabelas 4 e 8). O teor de P armazenado na BMS foi maior no solo da mata até 20 cm de profundidade (Tabela 4). O P armazenado na BMS representou em média 9,5 e 17,2% do teor de P orgânico estimado pelo método de ignição no solo cultivado e no solo da mata, respectivamente.

O SPD apresentou maior teor de COT no solo da camada 0-10 cm comparativamente ao SCC, igualando-se nas demais camadas (Tabela 5). Ambos os sistemas de preparo de solo apresentaram teores de COT inferiores aos encontrados no solo da mata em todas as camadas. A quantidade de carbono estocado no solo sob SPD foi maior do que no SCC até os primeiros 20 cm de profundidade. Embora o estoque de carbono até 40 cm tenha sido 5% maior no SPD do que no SCC, a quantidade de COT estocada nos dois sistemas não diferiu estatisticamente.

Tabela 4 – Formas de fósforo orgânico do solo e P armazenado na BMS em função de diferentes preparos de solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Preparo de solo	Camada de solo, cm				
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40
----- P armazenado na BMS, mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	80 (4,3) <sup>2</sup> aA**	46 (3,1) aB	37 (2,9) aB	14 (1,2) bC	<1 aD
SCC	57 (3,8) bA	38 (2,7) aB	39 (2,7) aB	25 (2,0) aC	<1 aD
Mata	118 (9,3)	91 (7,7)	50 (4,5)	13 (1,2)	<1
CV = 39,54%					
----- P orgânico extraído por NaHCO <sub>3</sub> , mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	35,6 (1,9) <sup>2</sup> aA**	21,6 (1,5) aB	14,2 (1,1) bC	10,7 (0,9) bCD	8,8 (0,8) aD
SCC	25,7 (1,7) bA	23,6 (1,6) aAB	21,0 (1,5) aB	13,4 (1,0) aC	9,2 (0,8) aD
Mata <sup>1</sup>	28,4 (2,2)	20,1 (1,7)	14,2 (1,3)	12,9 (1,2)	10,2 (1,0)
CV = 23,69%					
----- P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup> , mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	413,7 (22) <sup>2</sup> aA**	240,5 (16) aB	165,4 (13) aC	121,0 (10) aD	108,8 (10) aD
SCC	241,0 (16) bA	214,4 (15) aAB	175,1 (12) aBC	140,2 (11) aCD	113,9 (10) aD
Mata	171,6 (14)	130,2 (11)	126,0 (11)	103,2 (10)	86,0 (8)
CV = 23,82%					
----- P orgânico extraído por NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup> , mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	294,7 (16) <sup>2</sup> aA**	163,0 (11) aB	122,5 (9) aC	101,5 (9) aCD	85,1 (8) aD
SCC	147,1 (10) bA	145,4 (10) aA	141,0 (10) aAB	115,0 (9) aB	84,0 (7) aC
Mata	48,9 (4)	62,8 (5)	99,0 (9)	69,6 (6)	71,4 (7)
CV = 22,16%					
----- P orgânico no resíduo, mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	301,6 (16) <sup>2</sup>	292,2 (20)	279,0 (21)	259,2 (22)	241,8 (21)
SCC	291,7 (19)	278,1 (19)	276,7 (19)	259,4 (20)	247,0 (21)
Média	296,6 a**	285,2 ab	277,8 b	259,3 c	244,4 d
Mata	203,3 (16)	185,9 (16)	192,2 (17)	176,5 (16)	169,1 (16)
CV = 6,67%					
----- P biológico, mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	1046 (56) <sup>2</sup> aA**	717 (48) aB	581 (45) aC	492 (42) aD	445 (40) aD
SCC	705 (47) bA	661 (45) bAB	613 (43) aB	527 (41) aC	453 (39) aD
Mata	452 (36)	399 (34)	431 (39)	362 (34)	337 (32)
CV = 11,22%					
----- P orgânico por ignição, mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	447 (24) <sup>2</sup> aA**	352 (24) aB	330 (26) aB	294 (25) aC	272 (25) aC
SCC	363 (24) bA	341 (23) aAB	348 (24) aA	314 (25) aB	278 (24) aC
Mata <sup>1</sup>	399 (31)	353 (30)	312 (28)	276 (26)	246 (24)
CV = 9,05%					
----- P total, mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	1887 aA**	1488 aB	1308 bC	1188 bD	1125 aD
SCC	1514 bA	1472 aAB	1435 aB	1289 aC	1155 aD
Mata	1268	1189	1118	1074	1039
CV = 6,07%					

\* Significativo a 5% de probabilidade de erro; \*\* Significativo a 1% de probabilidade de erro; Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando preparo de solo para cada profundidade, e médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha, comparando a profundidade dentro de cada preparo de solo não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística; <sup>2</sup> Valores em parênteses relativos ao P total no solo.

Tabela 5 – Teor de carbono orgânico total e estoque de carbono orgânico do solo em função de diferentes preparos de solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Preparo de solo	Camada de solo, cm				
	0 – 5	5 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40
----- Carbono orgânico total, g kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	33,3 aA **	23,7 aB	21,0 aC	17,9 aD	15,7 aE
SCC	22,9 bA	22,7 bA	21,8 aA	18,1 aB	15,2 aC
Mata <sup>1</sup>	41,2	30,5	24,4	22,1	19,1
CV = 7,59%					
----- Estoque de carbono orgânico, Mg ha <sup>-1</sup> -----					
SPD	28,7 a*	43,5 a*	59,9 a*	87,4 <sup>ns</sup>	98,7 <sup>ns</sup>
SCC	20,7 b	35,1 b	52,5 b	82,5	93,9
Mata	29,9	37,8	57,5	90,5	102,9
CV, %	10,21	7,36	4,71	5,00	5,76

\* Significativo a 5% de probabilidade de erro; \*\* Significativo a 1% de probabilidade de erro; Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando preparo de solo para cada profundidade, e médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha, comparando a profundidade dentro de cada preparo de solo, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística.

#### 4.3.2 Efeito do cultivo de diferentes espécies de plantas no inverno

O solo cultivado com plantas durante o período hibernal apresentou maior teor de P orgânico lábil e maior teor de P armazenado na BMS, comparativamente ao tratamento pousio, com destaque para a sucessão de culturas envolvendo o tremoço azul (Tabela 6). O P orgânico estimado pelo método de ignição também foi maior quando o solo foi cultivado no inverno, mas apenas no solo da camada 0-5 cm (Tabela 7). Já as frações de P orgânico menos lábeis, o P biológico e o P total não foram alteradas pelos diferentes cultivos de inverno.

O cultivo de plantas durante o inverno propiciou aumento da atividade das enzimas fosfatases ácidas no solo até 10 cm de profundidade no SPD, e até 5 cm de profundidade no SCC (Tabela 8). O solo cultivado com ervilhaca sob SPD apresentou o maior valor da atividade dessa enzima entre as culturas de inverno no solo da camada 0-5 cm (1625  $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), sendo maior inclusive que no solo da mata (1512  $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ ).

O cultivo do solo no inverno aumentou os teores de COT em ambos os sistemas, principalmente no solo das camadas superficiais (Tabela 9). O efeito do cultivo de plantas hibernais no estoque de carbono no solo foi significativo somente quando considerado o solo da camada 0-5 cm.

Tabela 6 – Formas de P orgânico do solo, P armazenado na BMS e P total em função de diferentes culturas de inverno no solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Cultura de inverno	Fósforo na BMS	Forma de fósforo orgânico					Fósforo Total
		NaHCO <sub>3</sub>	NaOH 0,1	NaOH 0,5	Resíduo	Biológico	
----- P orgânico, mg kg <sup>-1</sup> -----							
Aveia	34 (2,4) <sup>2</sup> ab*	19,5 (2,9) <sup>3</sup> ab**	214,9 <sup>ns</sup>	148,2 <sup>ns</sup>	282,4 <sup>ns</sup>	664 <sup>ns</sup>	1332 <sup>ns</sup>
Ervilhaca	32 (2,1) ab	17,7 (3,0) ab	178,0	121,2	269,5	586	1442
Nabo	32 (2,3) ab	18,9 (3,1) ab	180,2	140,9	264,1	604	1270
Pousio	29 (1,9) b	15,3 (2,4) b	199,4	138,8	273,1	627	1434
Tremoço	40 (2,7) a	21,3 (3,3) a	208,1	148,9	269,9	648	1403
Trigo	34 (2,2) ab	17,6 (2,9) ab	179,9	141,6	277,0	615	1435
<i>Média</i>	34 (2,3)	18,4 (2,9)	193,5 (31) <sup>3</sup>	139,9 (22) <sup>3</sup>	272,4 (44) <sup>3</sup>	625	1386
Mata <sup>1</sup>	54 (4,8)	17,2 (4,3)	123,4 (31)	70,3 (18)	185,4 (47)	396	1138
CV, %	32,80	28,80	33,95	40,66	10,09	17,81	17,26

\* Significativo a 5% de probabilidade de erro; \*\* Significativo a 1% de probabilidade de erro; Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, comparando a cultura de inverno não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística; <sup>2</sup> Valores em parênteses relativos ao P total no solo; <sup>3</sup> Valores em parênteses relativos ao P biológico do solo.

Tabela 7 – Fósforo orgânico estimado pelo método da ignição em função de diferentes preparos de solo e culturas de inverno após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Cultura de inverno	Camada de solo, cm				
	0 – 5	5 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40
----- P orgânico total, mg kg <sup>-1</sup> -----					
Aveia	419 (25) abA*	350 aB	353 aB	341 aBC	297 aC
Ervilhaca	428 (24) aA	377 aB	339 aBC	303 aCD	288 aD
Nabo	387 (24) abA	328 aB	337 aB	276 aC	245 aC
Pousio	358 (20) bA	315 aABC	340 aAB	305 aBC	284 aC
Tremoço	388 (23) abA	332 aB	309 aBC	276 aCD	241 aD
Trigo	451 (26) aA	378 aB	357 aBC	321 aCD	294 aD
Mata <sup>1</sup>	399	353	312	276	246
CV% = 9,05					

\* Significativo a 5% de probabilidade de erro; Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando cultura de inverno dentro de cada profundidade, e médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha, comparando a profundidade dentro de cada cultura de inverno, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística.

Tabela 8 – Atividade das enzimas fosfatases ácidas em função de diferentes preparos de solo e culturas de inverno após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Camada de solo	Preparo de solo	Cultura de inverno						Média	Mata <sup>1</sup>
		Aveia	Ervilhaca	Nabo	Pousio	Tremoço	Trigo		
-- cm ---		----- Atividade da fosfatase ácida, $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ -----							
0 – 5	SPD	1077 BC**	1625 A	1074 BC	940 C	1201 B	1190 B	1185 a	1512
	SCC	799 A	741 AB	709 AB	633 B	723 AB	715 AB	720 b	
5 – 10	SPD	597 aBC	648 aABC	559 bBC	545 aC	781 aA	715 aAB		846
	SCC	667 aA	637 aA	685 aA	573 aA	702 aA	686 aA		
10 – 20	SPD	498 b	508 b	464 b	485 a	540 b	556 b		752
	SCC	643 a	643 a	646 a	555 a	658 a	682 a		
	Média	570 <sup>ns</sup>	576	555	520	600	604		
20 – 30	SPD	488	405	407	474	493	519	464 <sup>ns</sup>	666
	SCC	462	430	475	416	524	503	468	
	Média	475 <sup>ns</sup>	417	441	445	508	511		
30 – 40	SPD	448	481	425	436	503	503	466 <sup>ns</sup>	519
	SCC	441	448	389	436	444	400	427	
	Média	445 <sup>ns</sup>	464	407	436	474	444		

DMS camada = 150

CV% = 10,56

\*\* Significativo a 1% de probabilidade de erro; Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando preparo de solo para cada profundidade em cada cultura de inverno, e médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha, comparando a cultura de inverno dentro de cada preparo de solo e em cada profundidade não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>ns</sup> = não significativo; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística.

Tabela 9 – Teor de carbono orgânico total e estoque de carbono do solo em função de diferentes culturas de inverno após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Cultura de inverno	Teor de COT	Camada de solo, cm				
		0 – 5	0 – 10	0 – 20	0 – 30	0 – 40
	----- g kg <sup>-1</sup> -----	----- Estoque de carbono orgânico, Mg ha <sup>-1</sup> -----				
Aveia	21,8 ab*	25,6 ab*	40,1 <sup>ns</sup>	58,3 <sup>ns</sup>	87,5 <sup>ns</sup>	99,4 <sup>ns</sup>
Ervilhaca	20,7 ab	24,9 ab	38,6	55,4	82,7	93,7
Nabo	20,9 ab	25,2 ab	39,0	55,5	84,3	95,3
Pousio	19,9 b	22,1 b	36,3	51,7	80,2	91,3
Tremoço	21,7 ab	24,1 ab	39,5	57,0	85,5	96,5
Trigo	22,3 a	26,5 a	42,3	59,4	89,5	101,6
CV, %	13,51	8,43	10,19	7,90	7,27	7,12

\* Significativo a 5% de probabilidade de erro; Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando cultura de inverno dentro de cada profundidade e comparando preparo de solo para cada profundidade, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>ns</sup> = não significativo; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística.

## 4.4 Discussão

### 4.4.1 Efeito do sistema de preparo de solo

O maior teor de COT e de P total, a maior deposição de resíduos orgânicos e maior atividade microbiana no solo da camada superficial do SPD, comparativamente ao SCC, resultou em maior transformação do P inorgânico adicionado via fertilizantes em formas orgânicas. Esse aumento ocorreu nas formas orgânicas lábeis ( $\text{NaHCO}_3$ ) e moderadamente lábeis ( $\text{NaOH}$  0,1 e 0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ ), e pode ser verificado também no maior teor de P biológico e P orgânico estimado pelo método de ignição. Tais resultados evidenciam que a importância das reações biológicas aumenta no solo da camada superficial do SPD, comparativamente ao SCC, como observado por Rheinheimer e Aanghinoni (2003).

O teor mais elevado de P armazenado na BMS no solo da camada superficial do SPD comparativamente ao SCC resulta do efeito conjunto da menor perturbação do solo no SPD, que favorece o desenvolvimento da biota edáfica, como observado por Carneiro et al. (2004), principalmente de fungos (MOREIRA e SIQUEIRA, 2003), e do efeito *primming* que ocorre no SCC (RHEINHEIMER et al., 2000). Segundo Dakora e Phillips (2002), fungos e plantas são os principais responsáveis pela produção de fosfatase ácida no solo. Além disso, a matéria orgânica atua protegendo as enzimas do solo, mantendo-as em suas formas ativas, pela formação de complexos com compostos húmicos (QUIQUAMPOIX e MOUSAIN, 2005). Tais condições resultaram na maior atividade das enzimas fosfatases ácidas no solo da camada superficial do SPD, comparativamente ao SCC, e na maior atividade dessa enzima no solo da camada 10-20 cm sob SCC somente quando do cultivo de plantas no inverno.

A quantidade de P estocado na BMS no presente trabalho foi maior do que o encontrado por Rheinheimer et al. (2000), Conte et al. (2002), Carneiro et al. (2004), Gatiboni et al. (2008) e Martinazzo et al. (2007), possivelmente devido aos teores mais elevados de COT, que possui estreita relação com o conteúdo de P estocado nesse compartimento (DUDA et al., 2003; ZAMUNER et al. 2008).

Apesar de não existir diferença nos teores de COT entre os sistemas de preparo de solo abaixo de 10 cm de profundidade, existe entrada frequente de resíduo orgânico em subsuperfície através do revolvimento do solo no SCC antes de cada cultivo. Esta operação proporcionou também distribuição do P adicionado via fertilizantes em profundidade,

aumentando os teores de P total no solo das camadas 10-20 e 20-30 cm. Além disso, no SCC existem melhores condições físicas do solo, que permite melhor desenvolvimento radicular das plantas. A maior disponibilidade de P, a incorporação de resíduos orgânicos e possivelmente a maior quantidade de exsudatos radiculares no solo das camadas subsuperficiais do SCC são condições favoráveis ao desenvolvimento da microbiota, e resultou no maior teor de P armazenado na BMS. O maior teor de P orgânico lábil ( $\text{NaHCO}_3$ ) no solo subsuperficial do SCC (10-20 e 20-30 cm) pode também ter origem na maior atividade biológica, tanto de plantas quanto da BMS, que é responsável pela produção de compostos orgânicos fosfatados a partir do P inorgânico (KAMH et al., 1999; BÜNEMANN et al., 2008).

A razão P armazenado na BMS/P orgânico é considerada como indicador da labilidade do P orgânico. No solo da camada 0-5 cm sob vegetação nativa essa razão foi quase o dobro da encontrada no solo cultivado, e o teor de P armazenado na BMS foi 26 vezes o teor de P extraído por RTA (estudo II). Além disso, o solo sob mata nativa apresentou alta atividade das enzimas fosfatases ácidas comparativamente ao solo cultivado, semelhante aos valores encontrados por Conte et al. (2002) em mata nativa no Rio Grande do Sul, como resultado da alta capacidade de fixação de P do solo, do baixo teor de P disponível, e da limitada mineralização biológica da matéria orgânica devido a formação de complexos estáveis de P orgânico com alumínio e ferro ativos (REDEL et al., 2008). O conjunto de tais observações evidencia que nos ecossistemas naturais sob solos altamente intemperizados, a mineralização do P orgânico é o principal processo de disponibilização de fósforo (CONTE et al., 2002; CARNEIRO et al., 2004; FRIZANO et al., 2003; JOHNSON et al., 2003; VINCENT et al., 2010).

A maior parte do fósforo aplicado via fertilizantes em doses racionais, de acordo com as necessidades das plantas e tipo de solo, foi convertida a formas orgânicas, ao invés de ser adsorvido pela fração mineral do solo. O aumento ocorreu nas formas orgânicas moderadamente lábeis, extraídas pelo NaOH, e nas formas não lábeis (resíduo). Redel et al. (2007) também verificaram aumento no teor de P orgânico moderadamente lábil extraído pelo NaOH com o tempo de cultivo (155% em 4 anos), e atribuíram tal resultado à grande formação de complexos de P com substâncias húmicas, sendo considerado o principal dreno do fósforo aplicado via fertilizante.

No presente trabalho houve subestimação do P orgânico do solo estimado pelo método de ignição, que pode ocorrer pela incompleta extração do fósforo liberado durante ignição, ou pela hidrólise do fósforo orgânico durante a extração ácida inicial (TURNER et al., 2005).

Entretanto, a subestimação do P orgânico no solo do presente estudo parece ter ocorrido devido à grande proteção química e física da matéria orgânica. Duas são as evidências que sustentam essa hipótese. A primeira é a inacessibilidade do método de determinação do P orgânico por ignição, uma vez que apenas 36% do P do solo foram acessados com essa metodologia. A outra é que após o uso de um extrator alcalino forte (NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> do fracionamento) grande parte do P orgânico que estava intimamente ligado a fração mineral ou protegida nos microagregados pôde então ser acessada. Isso parece ser possível uma vez que a quantidade de P orgânico extraída no solo a priori e após o fracionamento foi muito similar.

O maior teor de COT no solo das camadas superficiais do SPD comparativamente ao SCC foi resultado do revolvimento mínimo do solo no SPD, onde apenas parte dos resíduos orgânicos fica em contato com o solo, dificultando a sua decomposição pelos microrganismos. Já no SCC, o revolvimento expõe os resíduos orgânicos à maior quantidade de microrganismos, acelerando a sua decomposição. A diferença nos teores de COT apenas no solo da camada superficial (0-10 cm) não foi suficiente para repercutir em maior estoque de carbono no SPD do que no SCC na profundidade de 0-40 cm. Apesar dos teores de COT no solo cultivado (SPD e SCC) serem inferiores aos teores do solo sob vegetação nativa em todas as camadas amostradas, o estoque de carbono até 40 cm obtido no SPD e no solo da mata foi muito parecido (98,7 e 102,9 Mg de carbono ha<sup>-1</sup>). Isso ocorre pela diferença de densidade, pois normalmente o solo cultivado é adensado, o que permite maior quantidade de solo e carbono em um mesmo volume de solo, como alertado por Fernandes e Fernandes (2008).

#### 4.4.2 Efeito do cultivo de diferentes espécies de plantas no inverno

O pousio hibernal durante 23 anos resultou em menor teor de COT do solo devido à menor quantidade de resíduos orgânicos produzidos. Mesmo assim, o teor de COT é bastante elevado. Calegari et al. (2008) relatam que isto ocorre devido às condições de clima com temperaturas amenas e a alta capacidade de proteção física e química do carbono nesse solo, proporcionada pelos elevados teores de argila (720 g kg<sup>-1</sup> de solo), dos quais 68% são minerais 1:1 e 13% são óxidos de ferro.

A maior quantidade de resíduos orgânicos produzidos e maior teor de COT quando do cultivo do solo no inverno favorecem o crescimento e desenvolvimento da BMS. Além disso,

a presença de plantas durante o inverno aumenta a quantidade de raízes no solo, resultando em maior exsudação de compostos orgânicos (SOUZA et al., 2010), que também servem de energia e esqueleto carbonatado à BMS (RHEINHEIMER et al., 2000). Dessa forma, o maior teor de P armazenado na BMS quando do cultivo do solo no inverno possivelmente foi resultado do aumento da população microbiana. As plantas e a BMS são responsáveis pela produção de enzimas fosfatases ácidas no solo, e por isso houve maior atividade dessas enzimas quando do cultivo de plantas durante o inverno no solo das camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm no SPD, e 0-5 cm no SCC). A maior atividade biológica (raízes de plantas e microrganismo do solo) no solo cultivado no inverno proporcionou também maior transformação do P inorgânico adicionado via fertilizantes em formas orgânicas, aumentando o teor de P orgânico lábil em todas as camadas e o teor de P orgânico estimado pelo método da ignição no solo da camada superficial.

A grande exsudação de ácidos orgânicos de baixa relação C/N pelo sistema radicular do tremoço pode ter proporcionado maior estímulo ao crescimento e desenvolvimento da BMS, resultando em maior teor de P armazenado na BMS, comparado ao cultivo das demais espécies de plantas. Além disso, o aumento na atividade microbiana no solo cultivado com tremoço possivelmente proporcionou maior conversão de P inorgânico em formas orgânicas lábeis ( $\text{NaHCO}_3$ ), semelhante ao encontrado por Redel et al. (2007) no solo das camadas superficiais do SPD.

Dentre as plantas cultivadas durante o inverno neste trabalho, apenas o tremoço azul e o nabo forrageiro não são hábeis em realizar associação micorrízicas. Segundo Costa e Lovato (2004), para compensar a inexistência de associação micorrízica tais plantas produzem maior quantidade de enzimas fosfatases ácidas. Isto não foi observado no presente estudo provavelmente devido à condição de alto teor de P disponível, que pode ter induzido a menor produção de fosfatases por essas plantas (BAYON et al., 2006).

#### **4.5 Conclusões**

1. O cultivo do solo com aplicações racionais de fertilizante fosfatado, de acordo com as necessidades das plantas e tipo de solo, mantendo altos teores de carbono orgânico do solo resultou no acúmulo de P na forma orgânica.

2. O cultivo de plantas durante o período hibernar em solo subtropical altamente intemperizado aumenta a importância das reações biológicas do ciclo do P, em especial no SPD, onde grande quantidade de resíduos vegetais é depositada na superfície do solo, aumentando o teor de P orgânico do solo, o teor de P estocado na BMS e a atividade das enzimas fosfatases ácidas.

#### 4.6 Referências

- BAYON, R. C. et al. Soil phosphorus uptake by continuously cropped *Lupinus albus*: A new microcosm design. **Plant and Soil**, v. 283, p. 309–321, 2006.
- BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, p. 319-329, 1982.
- BÜNEMANN, E. K. et al. Microbial synthesis of organic and condensed forms of phosphorus in acid and calcareous soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 40, p. 932-946, 2008.
- CALEGARI, A. **Sequestro de carbono, atributos físicos e químicos em diferentes sistemas de manejo em um Latossolo argiloso do sul do Brasil**. 2007. 191p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade de Londrina. Londrina, 2007.
- CALEGARI, A. et al. Impact of long-term no-tillage and cropping system management on soil organic carbon in an oxisol: a model for sustainability. **Agronomy Journal**, v. 100, p. 1013-1019, 2008.
- CARNEIRO, R. G. et al. Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de Cerrado sob plantio direto e plantio convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 661-669, 2004.
- CHEN, C. R. et al. Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiate pine (*Pinus radiata* D. Don.). **Soil Biology & Biochemistry**, v. 34, p. 487-499, 2002.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre, SBCS/NRS, 2004. 400p.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicações de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 925-930, 2002.

COSTA, A. C. S. **Iron oxide mineralogy of soils derived from volcanic rocks in the Paraná River Basin, Brazil**. 1996. 243p. Tese. (Soil Science PhD) - The Ohio State, 1996.

COSTA, M. D.; LOVATO, P. E. Fosfatases na dinâmica do fósforo do solo sob culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não micorrízicas, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.603-605, 2004.

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**, v. 64, p. 197-214, 1995.

DAKORA, F. D.; PHILLIPS, D. A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. **Plant and Soil**, v. 245, p.35-47, 2002.

DALAL, R. C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, v. 29, p. 83-117, 1977.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, v. 6, p. 82-85, 1977.

DUDA, G. P. et al. Perennial herbaceous legumes as live soil mulches and their effects on C, N and P of the microbial biomass. **Scientia Agricola**, v. 60, p. 139-147, 2003.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo. Corumbá: Embrapa Pantanal, dez. 2008. (Embrapa Pantanal. Comunicado Técnico, 69). Disponível em: <[http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/download.php?arq\\_pdf=COT69](http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/download.php?arq_pdf=COT69)>. Acesso em: 27 fev. 2009.

FRIZANO, J. et al. Labile phosphorus in soils of forest fallows and primary forest in the bragantina region, Brazil. **Biotropica**, v. 35, p. 2-11, 2003.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S. Modificações nas formas de fósforo após a extração sucessiva com os métodos de Mehlich I e II e resina trocadora de ânions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 363-371, 2005.

GATIBONI, L. C., et al. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1085-1091, 2008.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B. Method to measure microbial phosphate in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, p. 377-385, 1982.

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 America Journal**, v. 46, p. 970-976, 1982.

HORST, W. J. et al. Agronomic measures for increasing P availability to crops. **Plant and Soil**, v. 237, p. 211-223, 2001.

JOHNSON, A. H.; FRIZANO, J.; VANN, D. R. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure, **Oecologia** v. 499, p.135-487, 2003.

KAMH, M. et al. Mobilization of soil and fertilizer phosphate by cover crops. **Plant and Soil**, v.211, p. 19-27, 1999.

MARTINAZZO, R. et al. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.563-570, 2007.

MATSUOKA, M.; MENDES, I. C.; LOUREIRO M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, p. 425-433, 2003.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2003. 626p.

MOREL, C.; TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B. Correction for P sorption in the measurement of soil microbial biomass P by CHCl<sub>3</sub> fumigation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 28, p. 1699-1706, 1996.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31-36, 1962.

NZIGUHEBA, G.; BÜNEMANN, E. K. Organic phosphorus dynamics in tropical agroecosystems. In: TURNER B. L.; FROSSARD E.; BALDWIN D. S. (Eds). **Organic Phosphorus in the Environmental**. Ed. 1. CAB International, Wallingford, UK, 2005. p. 243-268.

OBERSON, A. et al. Phosphorus transformations in an Oxisol under contrasting land-use systems: the role of the soil microbial biomass. **Plant and Soil**, v. 237, p. 197–210, 2001.

OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E.; Phosphorus. Methods of Soil Analysis, Part 2. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, Q. R. (Eds). **Chemical and Microbiological Properties**. ed. 1. Soil Science Society of America. Madison, p. 403-430, 1982

QUIQUAMPOIX, H.; MOUSAIN, D. Enzymatic Hydrolysis of Organic Phosphorus. In: TURNER B. L.; FROSSARD E.; BALDWIN D. S. (Eds). **Organic Phosphorus in the Environmental**. 1. ed. CAB International, Wallingford, UK, p. 89-112, 2005

REDEL Y. D. et al. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol, **Geoderma**, v. 139, p. 388–396, 2007.

REDEL, Y. D.; RUBIO, R.; BORIE, F. Phosphorus fractions and phosphatase activity in an Andisol under different forest ecosystems. **Geoderma**, v. 145, p. 216–221, 2008.

RHEINHEIMER, D. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p.589-597, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária. Brasileira**, v. 36, p.151-160, 2001.

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

RHEINHEIMER, D. S. et al. Comparação de métodos de determinação de carbono orgânico total no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 435-440, 2008.

SOLOMON, D. et al. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands, **Geoderma**, v. 105, p. 21–48, 2002.

SOLOMON, D.; LEHMANN J. Loss of phosphorus from soil in semi-arid northern tanzania as a result of cropping: evidence from sequential extraction and  $^{31}\text{P}$ -nmr spectroscopy. **European Journal of Soil Science**, v. 51, p. 699-708, 2000.

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

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 1, p. 301-307, 1969.

TURNER, B. L. et al. Extraction of soil organic phosphorus. **Talanta**, v. 66, p. 294-306, 2005.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Methods of chemical analysis for water and wastes**. Cincinnati: USEPA, 1971.

VINCENT, A. G.; TURNER, B. L.; TANNER, E. V. J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist Forest. **European Journal of Soil Science**, v. 61, p. 48–57, 2010.

ZAMUNER, E. C.; PICONE, L. I., ECHEVERRIA, H. E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices, **Soil & Tillage Research**, v. 99, p. 131–138, 2008.

## **5 ESTUDO II: FORMAS DE FÓSFORO INORGÂNICO NO SOLO SOB DIFERENTES PREPAROS DE SOLO E CULTURAS DE INVERNO POR UM LONGO PERÍODO DE TEMPO**

**Resumo:** O cultivo de plantas com diferentes habilidades de aquisição e utilização de fósforo (P) sob diferentes sistemas de preparo de solo por um longo período de tempo pode alterar a ciclagem e a distribuição das formas de P inorgânico no solo, resultando em maior ou menor eficiência de utilização do P adicionado via fertilizantes. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito de longo período de cultivo de diferentes espécies de inverno sob diferentes sistemas de preparo de solo na distribuição das formas de P inorgânico do solo. Em 1986 foi estabelecido o experimento com seis tratamentos de inverno (tremoço azul, ervilhaca peluda, aveia preta, nabo forrageiro, trigo e pousio) implantados num Latossolo Vermelho Aluminoférrico na região sudoeste do Paraná, sob sistema plantio direto (SPD) e sistema de cultivo convencional (SCC). A adição de fertilizantes fosfatados na linha de semeadura no SPD promoveu aumento de P inorgânico nas formas lábeis e moderadamente lábeis no solo da camada superficial, e o revolvimento do solo no SCC redistribuiu o P aplicado em profundidade, promovendo aumento no teor de P moderadamente lábil no solo das camadas subsuperficiais. A aveia preta e o tremoço azul foram mais eficientes na ciclagem de P, e quando cultivadas sob SPD aumentaram o teor de P lábil no solo das camadas superficiais.

**Palavras-chave:** Sistema Plantio Direto. Sistema de Cultivo Convencional. Labilidade. Fracionamento do Fósforo. Culturas de Cobertura.

### **FORMS OF INORGANIC PHOSPHORUS IN THE SOIL UNDER DIFFERENT WINTER CROPS AND SOIL MANAGEMENT SYSTEM IN A LONG TERM**

**Abstract:** The cultivation of plants with different acquisition skills and use of phosphorus (P) under different management systems for a long period of time may change the cycling and distribution of inorganic P forms in soil, resulting in bigger or smaller efficiency use of P added through fertilizer. The aim of this study was to evaluate the effect of long cultivation period of different winter's species under different systems of soil management in the distribution of the forms of inorganic P of soil. In 1986 was established the experiment with six treatments of winter (blue lupine, hairy vetch, oats, turnip, wheat and fallow) implanted in a Rhodic Hapludox in southern Brazil, under no-tillage (NT) and conventional tillage (CT). The addition of phosphated fertilizers in the row in the NT promoted an increase of inorganic P in labile and moderately labile forms in soil surface layer, and soil disturbance in the CT redistributed P applied in depth, promoting an increasing on the moderately labile P concentration in soil subsurface layers. The oats and blue lupine were more efficient in P cycling, and when grown under NT increased the content of labile P in soil surface layers.

**Key words:** No-tillage. Conventional Tillage. Lability. Fractionation of Phosphorus. Cover Crops.

## 5.1 Introdução

A disponibilidade de fósforo (P) é controlada pela dissolução do fosfato de minerais primários em ecossistemas naturais sobre solos jovens (TIESSEN et al., 1984), mas em solos mais intemperizados a decomposição e mineralização da serrapilheira e da matéria orgânica do solo são as principais fontes, pois o P mineral está retido em formas menos disponíveis (VINCENT et al., 2010). Com a transformação dos ecossistemas naturais em áreas de cultivo são inseridas plantas com alta exigência nutricional, e com habilidades e estratégias de aquisição e utilização de P geralmente inferiores às plantas nativas que se adaptaram às condições ambientais reinantes. Por isso esses ambientes são deficientes de P para a demanda dessas plantas, o que limita a sua produção, havendo a necessidade de fornecer fosfato via fertilizante.

Em sistemas de produção com adubações regulares ocorre aumento do teor de P no solo. As formas em que o fosfato adicionado se acumula dependem da quantidade de P aplicado e exportado, e do tipo de solo e preparo, ocorrendo normalmente nas formas inorgânicas preexistentes no solo (RHEINHEIMER et al., 2000; CONTE et al., 2003; GATIBONI et al., 2007; GATIBONI et al., 2008; WANG et al., 2010; VU et al., 2010). Quando o solo é cultivado por longo período de tempo sob o sistema plantio direto (SPD), ocorre o acúmulo de P no solo da camada superficial (REDEL et al., 2007; ZAMUNER et al., 2008), pois o revolvimento do solo ocorre apenas no sulco de semeadura, e assim a fertilização é feita em volume de solo menor do que no sistema de cultivo convencional (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001). Dessa forma, os sítios de maior afinidade por P vão sendo paulatinamente saturados no solo da camada superficial sob SPD, diminuindo a força de ligação deste e aumentando a sua disponibilidade (RHEINHEIMER et al., 2003).

Devido às diferenças na natureza química e energia de ligação do P no solo, ele pode apresentar capacidades dessortivas distintas. Em métodos de rotina a disponibilidade de P é normalmente estimada por uma única extração do P disponível com extratores químicos, como o Mehlich-1, ou com a resina de troca aniônica (RTA) (CQFS-RS/SC, 2004). Quando a ideia é avaliar o potencial de disponibilidade uma única extração parece ser insuficiente. Nesse sentido, Gatiboni et al. (2002) verificaram que em um solo argiloso, a primeira extração com RTA estimou 37% do P potencialmente disponível, sendo necessárias sete extrações sucessivas para exauri-lo completamente. Rheinheimer et al. (2000) verificaram

que, após dez extrações sucessivas com RTA o P inorgânico extraído pelo NaOH (0,1 e 0,5 mol L<sup>-1</sup>) foi o principal tamponante do P potencialmente disponível, aproximadamente 80%. Por isso, o uso de extratores mais fortes, como o NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, podem oferecer indícios de acumulação ou exaurimento de longo prazo (KUO et al., 2005; GATIBONI et al., 2007; TAKEDA et al., 2009), desde que calibrados convenientemente.

As plantas cultivadas possuem diferentes capacidades de absorção de P do solo, resultado do desenvolvimento de estratégias de aquisição, como alterações na morfologia das raízes (densidade, comprimento, diâmetro, raízes capilares), cuja intensidade pode variar com as espécies, além de associações micorrízicas, alterações no pH da rizosfera e exsudação de fosfatases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular (LAJTHA e HARRISON, 1995; GEORGE et al., 2002; BAYON et al., 2006; WANG et al., 2008; LI et al., 2010; ROSE et al., 2010). Isso pode alterar processos de dissolução/precipitação, adsorção/dessorção, transporte por difusão, contato solo/raiz e mineralização do P (HORST et al., 2001). Contudo, para Rheinheimer e Anghinoni (2001), o cultivo de diferentes espécies de plantas anuais teve pouco efeito na dinâmica das frações inorgânicas de P, restringindo-se ao acúmulo das formas de P mais lábeis nos tratamentos com cultivo apenas de gramíneas sem aplicação de nitrogênio, devido à menor exportação de P pelas baixas produções de grãos.

O presente estudo objetivou avaliar em um solo muito argiloso sob longo período de cultivo com aplicações de doses racionais de fertilizantes fosfatados, de acordo com as necessidades das plantas e tipo de solo, (i) o efeito de diferentes preparos de solo e (ii) o efeito do cultivo de diferentes espécies de plantas no inverno, na distribuição das formas de P inorgânico do solo.

## 5.2 Material e métodos

### 5.2.1 Descrição do local de estudo e histórico da área experimental

O experimento foi instalado na Estação Experimental do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) no município de Pato Branco, região sudoeste do Paraná (52° 41' W e 26° 07' S), sob responsabilidade do pesquisador Dr. Ademir Calegari. A classificação do clima da região é subtropical úmido, Cfb, segundo classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.200 a 1.500 milímetros. O relevo é suave ondulado com pendentes entre 4-7% de declividade, com clima caracterizado por verão fresco, com média do mês mais quente <22 °C e a do mês mais frio <18 °C, sem estação seca definida (CALEGARI, 2006). O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho Aluminoférrico, muito argiloso, formado a partir de derramamento basáltico (Tabela 10).

Tabela 10 – Textura e composição mineralógica do Latossolo Vermelho Aluminoférrico utilizado no experimento.

Horizonte	Textura <sup>1</sup>			Mineralogia <sup>2</sup>						Oxalato <sup>3</sup>		
	Argila	Silte	Areia	1:1 <sup>4</sup>	2:1 <sup>5</sup>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Maghemita	Hematita	Goethita	Gibbsita	Fe	Al
A (0-1 m)	720	140	140	680	132	140	130	510	360	50	55	22
Bw (1-2 m)	-	-	-	710	128	140	120	540	340	20	-	-

<sup>1</sup>Calegari (2006); <sup>2</sup>Costa (1996); <sup>3</sup>Solo da camada 0-40cm; <sup>4</sup>Caulinita e halloisita; <sup>5</sup>Vermiculita e/ou montmorillonita.

A área experimental era coberta por Mata Atlântica até 1976, quando esta foi derrubada, passando-se a cultivar o solo com milho (*Zea mays* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), sob o sistema de cultivo convencional (SCC), com aração e gradagens leves. A partir do inverno de 1986 os tratamentos combinados de diferentes preparos de solo e espécies cultivadas no inverno foram implantados na área experimental. Os tratamentos de inverno foram: tremoço azul (*Lupinus angustifolius* L.), ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth), aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), trigo (*Triticum*

*aestivum* L.), e pousio, implantadas sob SCC, com uma aração e duas gradagens antes de cada cultivo, e sob sistema plantio direto (SPD).

Os tratamentos de inverno foram implantados somente em 12 dos 23 cultivos (1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1992, 1994, 1999, 2000, 2001, 2005 e 2008). Em 1991, 1995, 1996, 1998, 2006 e 2009 cultivaram-se aveia preta, e em 1997, 2002, 2003, 2004 e 2007 foi cultivada aveia preta consorciada com nabo forrageiro, ambos em todas as parcelas, exceto no tratamento pousio. Em 1993, todas as parcelas permaneceram em pousio. As plantas de cobertura foram controladas no estágio de pleno florescimento através de rolo-faca (tremoço, ervilhaca peluda, aveia preta e nabo forrageiro) ou pela aplicação de herbicidas (pousio), sendo que ocasionalmente, após o rolo-faca, o controle da vegetação foi complementado com herbicida. As parcelas com trigo foram colhidas até 1995 (7 cultivos), e seus resíduos deixados na superfície do solo antes do preparo de solo para o cultivo de verão. Nos demais anos o trigo foi manejado como as demais plantas de cobertura. No verão a área toda era cultivada com soja (*Glycine max* L.) ou milho. Durante o período experimental a soja foi cultivada por 13 vezes (1989, 1990, 1991, 1993, 1995, 1997, 1998, 2000, 2001, 2002, 2004, 2005 e 2007) e o milho em 9 (1986, 1987, 1988, 1992, 1994, 1996, 1999, 2003 e 2008). Em 2006 não foi realizado nenhum cultivo de verão.

A adubação foi realizada sempre nos cultivos de verão sendo a mesma quantidade de fertilizante aplicado em todos os tratamentos. Fósforo, potássio e 1/3 do nitrogênio (N) foram aplicados simultaneamente ao plantio, na linha de semeadura, e o restante do N 45 dias após. O total de fertilizantes aplicados durante o período experimental foi 1510 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 805 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 501 kg ha<sup>-1</sup> de N. Durante o período de condução do experimento foi aplicado calcário em superfície 6 vezes, num total de 11,5 Mg ha<sup>-1</sup> (1,0; 2,0; 3,0; 1,5; 2,0; 2,0 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em todas as parcelas, em 1989, 1992, 1995, 1999, 2001 e 2006 respectivamente).

### 5.2.2 Coleta das amostras de solo

As amostras de solo foram coletadas em outubro de 2009, no início da floração da aveia preta. Em cada parcela foram abertas duas trincheiras com pá de corte onde foi coletado o solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 cm. As subamostras das duas trincheiras de cada parcela foram misturadas para compor a amostra da respectiva profundidade.

Também, foi coletada amostra de solo sob mata nativa, em área contigua a área experimental. O solo das amostras foi seco em estufa de circulação forçada de ar a  $\pm 60^{\circ}\text{C}$ , peneirados em malha de 2 e armazenado. Numa trincheira por parcela foram coletadas amostras de solo indeformadas em cada camada, com auxílio de anéis (3 x 6,12 cm), para estimar a densidade do solo.

### 5.2.3 Análises de solo

As formas de P inorgânico do solo foram estimadas pelo fracionamento descrito por Hedley et al., (1982), com as modificações feitas por Rheinheimer (2000). As formas de P foram sequencialmente extraídas pelos seguintes extratores: resina de troca aniônica (RTA) (placas AR 103 QDP 434);  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  à pH 8,5;  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$ ;  $\text{HCl}$  1,0 mol  $\text{L}^{-1}$ ;  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ . Todos os extratores permaneceram em contato com o solo durante 16 horas em agitador tipo ‘sem fim’ (33 rpm), com posterior centrifugação a 2510 g por 30 minutos. O resíduo foi dividido em duas partes, sendo que em uma delas estimou-se o P total pela digestão com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$  na presença de  $\text{MgCl}_2$  saturado (BROOKES e POWLSON, 1982) e na outra estimou-se o P orgânico utilizando o método de ignição (OLSEN e SOMMERS, 1982). O P inorgânico do resíduo foi então obtido pela diferença do P total e do P orgânico do resíduo. O P inorgânico extraído pela RTA e pelo  $\text{NaHCO}_3$  foram considerados formas lábeis. O extraído pelo  $\text{NaOH}$  formas moderadamente lábeis. O extraído pelo  $\text{HCl}$  e o P inorgânico residual foram considerados formas não-lábeis.

A capacidade de dessorção de P foi avaliada por extrações sucessivas com RTA no solo das camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm, acondicionando 0,200 g de cada amostra de solo em tubos *falcon* de 15 mL, em triplicata, no qual se adicionaram 10 mL de água destilada e uma lâmina de RTA saturada com bicarbonato. Após foi agitado por 16 horas, em agitador tipo ‘sem fim’ a  $\pm 25^{\circ}\text{C}$ . As lâminas foram então retiradas e lavadas com jatos de água destilada e depois eluídas em 10 mL de  $\text{HCl}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ . Repetiu-se a operação até que a quantidade de P extraído tornou-se constante e próximo de zero. Com os valores de P dessorvido acumulado ajustou-se a equação de cinética de primeira ordem proposta por McKean e Warren (1996):

$$P \text{ dessorvido} = \beta - (\beta - \alpha)^{-kt}$$

onde  $\beta$  é a quantidade máxima dessorvida ou P potencialmente disponível,  $\alpha$  é a quantidade de P dessorvido na primeira extração,  $k$  é a taxa de dessorção constante, e  $t$  o tempo de extração.

A extração do P por água destilada foi realizada pela agitação de 1,000 g de solo em 10 mL de água destilada por 2 horas em agitador horizontal. O P total foi estimado por digestão com  $H_2SO_4$  e  $H_2O_2$  na presença de  $MgCl_2$  saturado (OLSEN e SOMMERS, 1982).

O P extraído dos extratos ácidos foi determinado conforme metodologia de Murphy e Riley (1962). Nos extratos alcalinos o P inorgânico foi determinado pelo método de Dick e Tabatabai (1977).

Foi realizado um balanço de P no solo considerando a quantidade de P adicionado, a quantidade de P exportado e o teor de P potencialmente disponível para as seguintes combinações: a) aveia/tremoço sob SPD; b) ervilhaca/nabo/pousio sob SPD; c) trigo sob SPD e d) média das culturas sob SCC. O total adicionado foi calculado baseado na quantidade aplicada em cada cultivo de verão e número de cultivos entre 1986 e 2009; o P exportado foi calculado com base na produtividade média de cada cultura em cada caso durante o período experimental e o teor médio de P nos grãos. A quantidade de P potencialmente disponível no solo da camada 0-20 cm foi calculada com base na quantidade de P potencialmente disponível ( $\beta$ ) obtido pela equação de McKean e Warren (1996), densidade do solo e espessura de cada camada. A relação entre o P adicionado e o que permaneceu potencialmente disponível mais o exportado pelos grãos foi considerado como P recuperado. As perdas de P por erosão e a quantidade de P aplicada e exportada no período de cultivo anterior a instalação do experimento (1976 a 1986) não foram consideradas no cálculo.

#### 5.2.4 Análises estatísticas

O modelo estatístico adotado foi um trifatorial com blocos casualizados, e parcelas subdivididas com três repetições. Os sistemas de preparo do solo foram as parcelas principais, as culturas de inverno as subparcelas e as camadas de solo amostradas as subsubparcelas. Quando os efeitos dos tratamentos foram significativos a 5% de probabilidade de erro, as diferenças entre as médias dos sistemas de preparo, das culturas de inverno e das camadas de solo foram comparadas pelo teste de Tukey.

## 5.3 Resultados

### 5.3.1 Efeito do sistema de preparo de solo

O solo da camada 0-5 cm sob SPD apresentou maior teor de P inorgânico recuperado por todos os extratores, comparativamente ao SCC, exceto a fração residual (Tabela 11). No SCC o teor de P extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> no solo da camada 20-30 cm, e o teor de P total no solo das camadas 10-20 e 20-30 cm, foram superiores ao SPD. No SPD o teor de P lábil extraído por RTA no solo da camada 0-5 cm foi 4,4 vezes maior que o teor extraído do solo sob SCC, e pela baixíssima mobilidade vertical, os teores no solo das camadas 10-20 e 20-30 cm foi apenas a metade do teor encontrado no solo sob SCC.

A quantidade de P extraído do solo sucessivamente por RTA diminuiu exponencialmente em todos os casos (Figura 4 e 5). Somente no solo da camada 0-5 cm sob SPD, a quantidade de P potencialmente disponível ( $\beta$ ) foi maior do que no SCC (Tabela 16). Os valores da taxa de dessorção constante (k) foram maiores no solo das camadas inferiores em ambos os sistemas de preparo, e no solo da camada 10-20 cm, foi maior no SPD do que no SCC.

Para obter 95% do total de P dessorvido do solo foram necessárias 10, 7 e 5 extrações com RTA no SPD; 11, 6 e 6 extrações com RTA no SCC e 19, 10 e 5 extrações com RTA no solo sob mata nativa, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, respectivamente. No solo sob vegetação nativa a quantidade de P potencialmente disponível até 20 cm de profundidade foi 17,8 kg ha<sup>-1</sup> (dado não apresentado).

A quantidade de P exportado pelos grãos de milho e soja foi 252 kg ha<sup>-1</sup> no SPD, e 232 kg ha<sup>-1</sup> no SCC, embora não tenha sido observada diferença de produtividade (CALEGARI, 2006). O P teoricamente recuperado (potencialmente disponível + exportado) foi maior no SPD (63%) do que no SCC (48%) (Tabela 12).

O solo cultivado apresentou maior teor de P total que o solo sob vegetação nativa em todas as camadas amostradas. A proporção de P inorgânico em relação à quantidade de P total do solo cultivado foi menor do que no solo da mata, sendo 49 e 57% em média respectivamente.

Tabela 11 – Formas de P inorgânico e P total do solo em função de diferentes preparos de solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Preparo de solo	Camada de solo, cm				
	0 – 5	5 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40
----- P inorgânico extraído com água destilada, mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	1,49 aA**	0,48 aB	0,44 aB	0,29 aB	0,13 aB
SCC	0,48 bA	0,44 aA	0,41 aA	0,30 aA	0,20 aA
Mata	0,75	0,62	0,34	0,12	0,12
CV = 35,48%					
----- P inorgânico extraído por RTA, mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	44,6 (2,4) <sup>2</sup> aA**	11,7 (0,8) aB	3,4 (0,3) aC	1,2 (0,1) aC	0,8 (0,1) aC
SCC	10,6 (0,7) bA	9,3 (0,6) aA	6,4 (0,4) aAB	2,5 (0,2) aB	1,1 (0,1) aB
Mata	11,5 (0,9)	4,4 (0,4)	1,9 (0,2)	1,2 (0,1)	1,0 (0,1)
CV = 31,41%					
----- P inorgânico extraído por NaHCO <sub>3</sub> 0,5 mol L <sup>-1</sup> , mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	11,6 (0,6) <sup>2</sup> aA	5,7 (0,4) aB	3,6 (0,3) aBC	2,9 (0,2) aC	2,6 (0,2) aC
SCC	5,7 (0,4) bA	5,3 (0,4) aAB	4,6 (0,3) aAB	3,4 (0,3) aAB	3,1 (0,3) aB
Mata	8,4 (0,7)	5,1 (0,4)	3,2 (0,3)	2,8 (0,3)	3,0 (0,3)
CV = 20,66%					
----- P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup> , mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	59,8 (3,2) <sup>2</sup> aA**	37,2 (2,5) aB	30,8 (2,4) aC	24,6 (2,1) bD	22,7 (2,0) aD
SCC	36,4 (2,4) bA	35,5 (2,4) aA	33,9 (2,4) aA	28,7 (2,2) aB	25,8 (2,2) aB
Mata	42,2 (3,3)	30,4 (2,6)	27,9 (2,5)	26,8 (2,5)	27,3 (2,6)
CV = 16,03%					
----- P inorgânico extraído por HCl 1,0 mol L <sup>-1</sup> , mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	16,8 (0,9) <sup>2</sup> aA*	5,5 (0,4) aB	3,0 (0,2) aB	2,4 (0,2) aB	2,4 (0,2) aB
SCC	4,5 (0,3) bA	4,2 (0,3) aA	3,8 (0,3) aA	2,9 (0,2) aA	2,4 (0,2) aA
Mata <sup>1</sup>	2,7 (0,2)	3,7 (0,2)	2,1 (0,2)	2,8 (0,3)	1,4 (0,1)
CV = 28,55%					
----- P inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup> , mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	101,3(5,4) aA*	93,6 (6,3) aAB	88,3 (6,8) aB	83,1 (7,0) aB	85,6 (7,6) aB
SCC	86,8 (5,7) bA	87,1 (5,9) aA	88,5 (6,2) aA	83,9 (6,5) aA	87,5 (7,6) aA
Mata	113,3 (8,9)	96,1 (8,1)	94,8 (8,5)	93,4 (8,7)	98,5 (9,5)
CV = 13,00%					
----- P inorgânico residual, mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	555,3 (29)	542,6 (36)	546,5 (42)	524,5 (44)	511,3 (45)
SCC	531,8 (35)	562,0 (38)	548,8 (38)	519,8 (40)	533,1 (46)
Média	543,6 <sup>ns</sup>	552,3	547,7	522,2	522,2
Mata	531,9 (42)	508,3 (43)	495,9 (44)	476,0 (44)	512,5 (49)
CV = 9,98%					
----- P geoquímico, mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	789 (42) aA**	696 (47) aB	676 (52) aBC	639 (54) aC	625 (56) aC
SCC	676 (45) bAB	703 (48) aA	686 (48) aAB	641 (50) aB	653 (57) aAB
Mata	710 (56)	648 (54)	626 (56)	603 (56)	644 (62)
CV = 8,50%					
----- P total, mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	1887 aA**	1488 aB	1308 bC	1188 bD	1125 aD
SCC	1514 bA	1472 aAB	1435 aB	1289 aC	1155 aD
Mata	1268	1189	1118	1074	1039
CV = 6,07%					

\* Significativo a 5% de probabilidade de erro; \*\* Significativo a 1% de probabilidade de erro; Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando preparo de solo para cada profundidade, e médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha, comparando a profundidade dentro de cada preparo de solo não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística; <sup>2</sup> Valores em parênteses são relativos ao P total no solo; ns = não significativo.

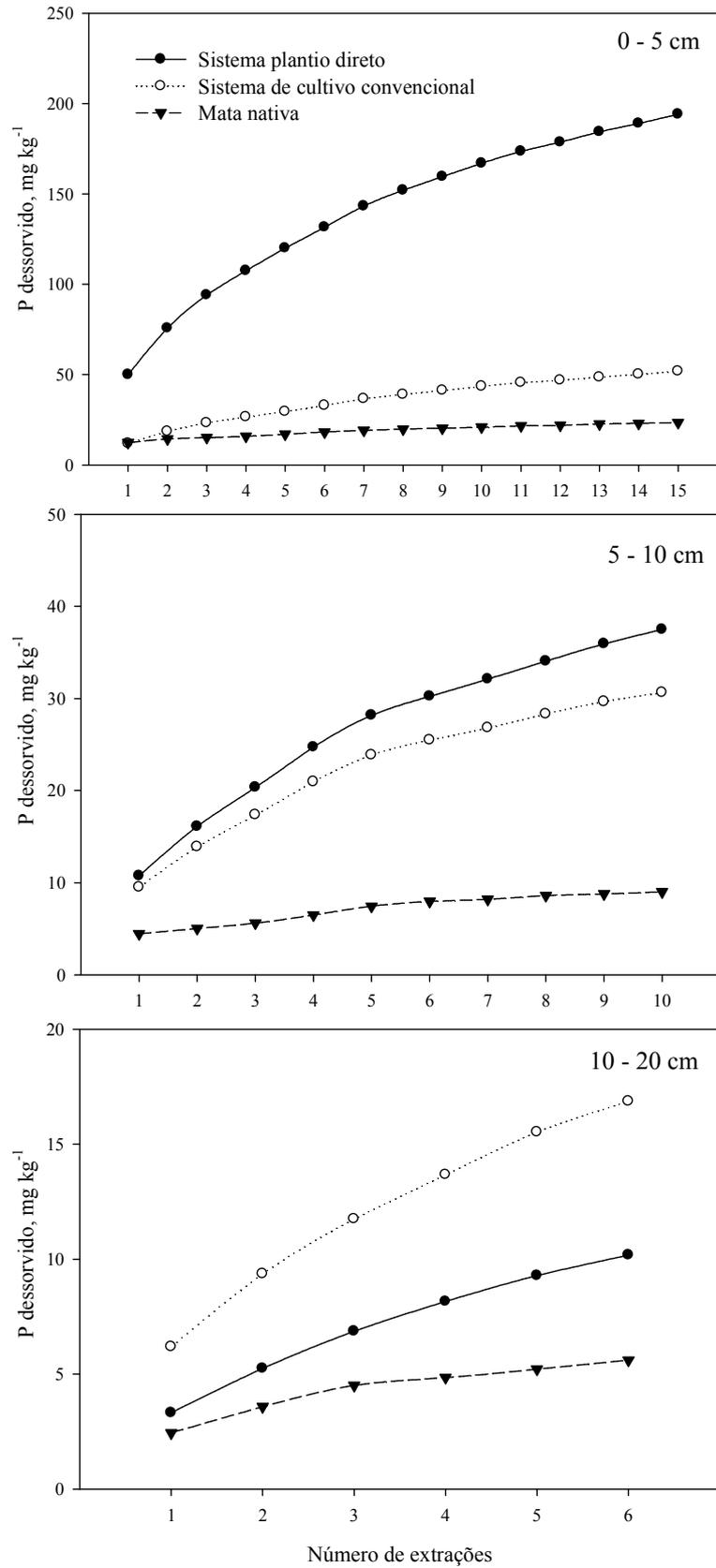


Figura 4 – Dessorção de P por extrações sucessivas com RTA de diferentes profundidades do solo sob sistema plantio direto, sistema de cultivo convencional e mata nativa.

Tabela 12 - Balanço de P em função de diferentes preparo de solo e culturas de inverno após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Preparo	Cultura de inverno	Cultura de grãos	Número de cultivos	Produtividade média <sup>1</sup>	P				
					Adicionado <sup>2</sup>	Exportado <sup>3</sup>	Disponível <sup>4</sup>	Recuperado <sup>5</sup>	
					kg ha <sup>-1</sup>				
SPD	Aveia preta Tremoço azul	Milho	9	6359	270	126			
		Soja	13	2651	390	134			
	Total				660	260	197	457	69
SPD	Ervilhaca peluda Nabo forrageiro Pousio	Milho	9	6089	270	121			
		Soja	13	2582	390	131			
		Total				660	252	141	393
SPD	Trigo	Milho	9	5806	270	115			
		Soja	13	2529	390	128			
		Trigo	7	1800	0	35			
		Total				660	278	123	402
SCC	Média <sup>6</sup>	Milho	9	5717	270	113			
		Soja	13	1974	390	119			
		Total				660	232	84	316

<sup>1</sup> Dados de produtividade obtidos de Calegari (2006); <sup>2</sup> Quantidade de P aplicado via fertilizante no período de 1986 a 2009 (19,1 kg ha<sup>-1</sup> de P/cultivo de milho ou soja); <sup>3</sup> Quantidade de P exportado pelos grãos, considerando teor de 2,2, 3,9 e 2,8 g de P kg<sup>-1</sup> grãos de milho, soja e trigo, respectivamente (CQFS-RS/SC, 2004); <sup>4</sup> P disponível no solo da camada 0-20 cm = dessorção máxima de P com RTA, considerando a densidade e profundidade em cada camada; <sup>5</sup> P recuperado = P exportado + P dessorvido com RTA; <sup>6</sup> Média de todos os tratamentos de inverno.

### 5.3.2 Efeito do cultivo de diferentes espécies de plantas no inverno

O solo da camada 0-5 cm sob SPD cultivado com tremoço azul e com aveia preta no inverno apresentou maior teor de P extraídos por água destilada, RTA, NaHCO<sub>3</sub> e HCl, comparativamente aos demais tratamentos de inverno. No solo da camada 5-10 cm, somente com o cultivo do tremoço azul foi possível detectar maiores teores de P extraído por RTA e por HCl comparativamente as demais culturas de inverno (Tabela 13 e 14). O tremoço azul também propiciou maior recuperação de P extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, independente do preparo de solo e da camada amostrada (Tabela 15), comparado aos demais cultivos de inverno. Contudo, o cultivo de diferentes espécies de plantas não alterou o teor das formas de P de labilidade inferior (NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> e fração residual), nem o teor total de P do solo.

Tabela 13 – Fósforo extraído com água destilada e fósforo extraído por RTA em função de diferentes preparos de solo e rotação de culturas após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Camada	Sistema de preparo	Cultura de inverno						Média	Mata <sup>1</sup>
		Aveia	Ervilhaca	Nabo	Pousio	Tremoço	Trigo		
--- cm ---		----- P extraído com água destilada, mg kg <sup>-1</sup> -----							
0 – 5	SPD	2,33 A**	1,24 B	1,37 B	1,00 B	2,08 A	0,92 B	1,49 a	0,75
	SCC	0,47 A	0,46 A	0,44 A	0,46 A	0,52 A	0,56 A	0,48 b	
5 – 10	SPD	0,40	0,43	0,49	0,37	0,70	0,51	0,48 <sup>ns</sup>	0,62
	SCC	0,51	0,51	0,50	0,20	0,54	0,37	0,44	
	Média	0,45 <sup>ns</sup>	0,47	0,50	0,29	0,62	0,44		
10 – 20	SPD	0,64	0,31	0,46	0,28	0,41	0,52	0,44 <sup>ns</sup>	0,34
	SCC	0,65	0,41	0,44	0,29	0,39	0,28	0,41	
	Média	0,65 <sup>ns</sup>	0,36	0,45	0,28	0,40	0,40		
20 – 30	SPD	0,50	0,12	0,46	0,12	0,25	0,28	0,29 <sup>ns</sup>	0,12
	SCC	0,42	0,22	0,28	0,24	0,32	0,33	0,30	
	Média	0,46 <sup>ns</sup>	0,17	0,37	0,18	0,28	0,30		
30 – 40	SPD	0,20	0,05	0,18	0,06	0,21	0,07	0,13 <sup>ns</sup>	0,12
	SCC	0,39	0,14	0,16	0,23	0,16	0,11	0,20	
	Média	0,29 <sup>ns</sup>	0,10	0,17	0,15	0,18	0,09		
		DMS camada = 0,38						CV % = 35,48	
		----- P extraído por RTA, mg kg <sup>-1</sup> -----							
0 – 5	SPD	50,6 B**	41,9 C	36,9 C	37,4 C	63,7 A	36,8 C	44,6 a	11,5
	SCC	9,9 A	8,1 A	12,8 A	9,7 A	12,5 A	10,8 A	10,6 b	
5 – 10	SPD	11,6 aB	7,5 aB	10,6 aB	9,9 aB	19,0 aA	11,6 aB		4,4
	SCC	7,6 aA	8,9 aA	12,0 aA	9,3 aA	10,1 bA	7,7 aA		
10 – 20	SPD	4,0	1,6	3,6	1,9	6,8	2,4	3,4 <sup>ns</sup>	1,9
	SCC	4,7	5,7	7,9	6,4	7,1	6,8	6,4	
	Média	4,3 <sup>ns</sup>	3,7	5,8	4,2	7,0	4,6		
20 – 30	SPD	1,9	0,9	1,0	0,8	2,1	0,6	1,2 <sup>ns</sup>	1,2
	SCC	1,6	2,3	2,8	2,4	3,6	2,0	2,5	
	Média	1,7 <sup>ns</sup>	1,6	1,9	1,6	2,9	1,3		
30 – 40	SPD	0,5	0,9	1,2	0,5	1,3	0,6	0,8	1,0
	SCC	0,9	1,5	1,1	0,8	1,4	0,7	1,1	
	Média	0,7 <sup>ns</sup>	1,2	1,2	0,6	1,4	0,6		
		DMS camada = 6,6						CV % = 31,41	

\*\* Significativo a 1% de probabilidade de erro; Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando preparo de solo para cada profundidade em cada cultura de inverno, e médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha, comparando a cultura de inverno dentro de cada preparo de solo e em cada profundidade não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>ns</sup> = não significativo; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística.

Tabela 14 – Fósforo inorgânico extraído por  $\text{NaHCO}_3$  e fósforo extraído por  $\text{HCl}$  do solo em função de diferentes preparos de solo e rotação de culturas após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Camada	Sistema de preparo	Cultura de inverno						Média	Mata <sup>1</sup>
		Aveia	Ervilhaca	Nabo	Pousio	Tremoço	Trigo		
----- P inorgânico extraído por $\text{NaHCO}_3$ 0,5 mol L <sup>-1</sup> à pH 8,5, mg kg <sup>-1</sup> -----									
0 – 5	SPD	14,1 A*	10,9 B	11,3 B	11,6 B	11,9 AB	9,6 B	11,6 a	8,4
	SCC	5,3 A	5,6 A	5,2 A	6,4 A	5,5 A	6,6 A	5,7 b	
5 – 10	SPD	5,8	5,8	5,2	4,7	6,5	6,0	5,7 <sup>ns</sup>	
	SCC	4,6	5,8	6,1	4,7	6,2	4,5	5,3	5,1
	Média	5,2 <sup>ns</sup>	5,8	5,7	4,7	6,4	5,3		
10 – 20	SPD	2,7	3,3	4,5	2,9	4,3	4,1	3,6 <sup>ns</sup>	3,2
	SCC	4,0	5,0	5,0	4,4	5,2	4,4	4,6	
	Média	3,4 <sup>ns</sup>	4,1	4,8	3,6	4,7	4,2		
20 – 30	SPD	2,4	3,2	3,3	2,2	2,9	3,4	2,9 <sup>ns</sup>	2,8
	SCC	2,9	3,9	3,1	3,9	3,8	3,0	3,4	
	Média	2,6 <sup>ns</sup>	3,5	3,2	3,0	3,4	3,2		
30 – 40	SPD	1,4	3,0	3,6	2,8	2,3	2,6	2,6 <sup>ns</sup>	3,0
	SCC	2,5	3,9	3,2	3,5	3,2	2,5	3,1	
	Média	1,9 <sup>ns</sup>	3,5	3,4	3,2	2,7	2,5		
								DMS camada = 2,3	CV % = 20,66
----- P extraído por $\text{HCl}$ 1,0 mol L <sup>-1</sup> , mg kg <sup>-1</sup> -----									
0 – 5	SPD	19,2 AB*	13,2 C	18,5 B	14,6 C	21,9 A	13,7 C	16,8 a	2,7
	SCC	5,7 A	3,1 A	4,9 A	3,6 A	4,2 A	5,7 A	4,5 b	
5 – 10	SPD	6,7 aAB	3,6 aB	5,2 aB	3,6 aB	8,0 aA	5,9 aAB		3,7
	SCC	5,3 aA	2,9 aA	4,4 aA	4,4 aA	3,8 bA	4,3 aA		
10 – 20	SPD	4,0	1,7	2,3	2,5	3,8	3,6	3,0 <sup>ns</sup>	2,1
	SCC	4,6	2,5	4,7	3,4	3,7	4,1	3,8	
	Média	4,3 <sup>ns</sup>	2,1	3,5	2,9	3,8	3,8		
20 – 30	SPD	4,2	1,2	1,6	2,8	2,0	2,7	2,4 <sup>ns</sup>	2,8
	SCC	3,8	2,4	2,8	2,8	3,0	2,6	2,9	
	Média	4,0 <sup>ns</sup>	1,8	2,2	2,8	2,5	2,6		
30 – 40	SPD	4,0	1,3	2,0	2,5	2,3	2,1	2,4 <sup>ns</sup>	1,4
	SCC	3,0	3,2	1,7	2,9	1,6	2,0	2,4	
	Média	3,5 <sup>ns</sup>	2,2	1,8	2,7	1,9	2,1		
								DMS camada = 3,1	CV % = 28,55

\* Significativo a 5% de probabilidade de erro; Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando preparo de solo para cada profundidade em cada cultura de inverno, e médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha, comparando a cultura de inverno dentro de cada preparo de solo e em cada profundidade não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>ns</sup> = não significativo; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística.

Tabela 15 – Formas de fósforo inorgânico e fósforo total do solo em função de diferentes culturas de inverno no solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Cultura de inverno	Forma de fósforo inorgânico				Fósforo total
	NaOH 0,1	NaOH 0,5	Resíduo	Geoquímico	
	----- P inorgânico, mg kg <sup>-1</sup> -----				
Aveia	31,3 b**	85,7 <sup>ns</sup>	499,7 <sup>ns</sup>	636,6 <sup>ns</sup>	1332 <sup>ns</sup>
Ervilhaca	32,6 b	96,6	565,4	711,1	1442
Nabo	34,0 b	85,7	550,5	689,0	1270
Pousio	31,3 b	82,3	542,1	672,6	1434
Tremoço	41,8 a	95,4	542,2	702,8	1403
Trigo	30,3 b	85,6	525,6	658,9	1435
<i>Média</i>	33,5 (2,4) <sup>2</sup>	88,6 (6,4)	537,6 (39)	678,5 (49)	1386
Mata <sup>1</sup>	30,9 (2,7)	99,2 (8,7)	504,9 (44)	646,1 (57)	1138
CV, %	17,16	23,25	15,90	14,05	17,26

\*\* Significativo a 1% de probabilidade de erro; Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna, comparando a cultura de inverno não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística; <sup>2</sup> Valores em parênteses são valores relativos em relação ao P total; ns = não significativo.

No SPD a quantidade de P potencialmente disponível foi maior no solo das camadas 0-5 e 5-10 cm quando do cultivo de tremoço azul e aveia preta, e menor no solo da camada 0-5 cm quando do cultivo de trigo, comparativamente aos demais tratamentos de inverno (Tabela 16). A taxa de dessorção constante não diferiu em função das culturas de inverno.

Tabela 16 – Dessorção máxima com RTA ( $\beta$ ) e taxa de dessorção constante (k) em função de diferentes preparo de solo e culturas de inverno após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Camada	Preparo	Cultura de inverno						Média	Mata <sup>1</sup>
		Aveia	Ervilhaca	Nabo	Pousio	Tremoço	Trigo		
--- cm ---		----- $\beta$ , mg kg <sup>-1</sup> -----							
0 – 5	SPD	256,7 A**	199,0 B	194,6 B	220,4 B	283,0 A	164,7 C	219,7 a	27,6
	SCC	60,4 A	51,2 A	60,1 A	70,8 A	66,0 A	70,9 A	63,2 b	
5 – 10	SPD	62,5a AB	26,5a C	34,9 aBC	40,9 aABC	70,4 aA	29,5 aC		10,9
	SCC	30,1 bA	38,8 aA	35,1 aA	37,2 aA	37,1 bA	31,3 aA		
10 – 20	SPD	25,6	8,9	14,1	9,9	18,3	11,8	14,8 <sup>ns</sup>	6,2
	SCC	19,8	25,0	27,2	22,2	21,8	28,0	24,0	
	Média	22,7 <sup>ns</sup>	16,9	20,6	16,0	20,1	19,9		
		DMS camada = 24,7							CV = 18,73%
		----- k, dia <sup>-1</sup> -----							
0 – 5	SPD	0,0055	0,0052	0,0056	0,0054	0,0055	0,0053	0,0054 aC**	0,0038
	SCC	0,0041	0,0046	0,0043	0,0040	0,0053	0,0041	0,0044 aB	
	Média	0,0048 <sup>ns</sup>	0,0049	0,0049	0,0047	0,0054	0,0047		
5 – 10	SPD	0,0079	0,0088	0,0080	0,0065	0,0074	0,0064	0,0075 aB	0,0062
	SCC	0,0085	0,0078	0,0095	0,0083	0,0077	0,0080	0,0083 aA	
	Média	0,0082 <sup>ns</sup>	0,0083	0,0088	0,0074	0,0075	0,0072		
10 – 20	SPD	0,0129	0,0079	0,0077	0,0068	0,0104	0,0106	0,0094 aA	0,0187
	SCC	0,0120	0,0058	0,0082	0,0086	0,0091	0,0060	0,0079 bA	
	Média	0,0124 <sup>ns</sup>	0,0069	0,0079	0,0077	0,0097	0,0083		
									CV = 26,87%

\*\* Significativo a 1% de probabilidade de erro; Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando preparo de solo para cada profundidade em cada cultura de inverno, e médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha, comparando a cultura de inverno dentro de cada preparo de solo e em cada profundidade não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>ns</sup> = não significativo; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística.

## 5.4 Discussão

### 5.4.1 Efeito do sistema de preparo do solo

A aplicação anual de fertilizantes fosfatados na linha de semeadura, sem revolvimento do solo, resultou no maior teor de P total e de todas as formas de P inorgânico, exceto a fração recalcitrante não lábil, no solo da camada superficial, comparativamente ao SCC. No SPD ocorrem também menores perdas de solo e P por erosão, e o P “garimpado” pelas plantas de camadas mais profundas acumula na superfície após a decomposição dos seus resíduos (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001), o que deve ter contribuído para os resultados obtidos.

Os sítios de troca do solo capazes de adsorver P são finitos e possuem diferente afinidade pelo íon fosfato. No SPD a aplicação de fosfato solúvel na linha de semeadura cria uma região de saturação dos sítios mais reativos, onde grande parte do fosfato aplicado é adsorvida com baixa energia, podendo tornar-se disponível facilmente. Nessa microrregião existe aumento do pH, deprotonação dos grupos funcionais de superfície, criação de cargas negativas e diminuição das positivas (YU, 1997), tornando-os menos reativos. Além disso, o teor de carbono orgânico total no solo da camada superficial do SPD é mais elevado, podendo haver diminuição dos sítios de adsorção de P através da competição exercida pelos ácidos orgânicos de baixo peso molecular (JONES, 1998; REDEL et al., 2007). O conjunto de tais fatores resulta em menor energia de retenção do fosfato quando o solo fertilizado não é revolvido e explica o maior teor de P extraído por água, RTA e bicarbonato (formas lábeis de P), no solo da camada 0-5 cm sob SPD, comparativamente ao SCC. Nesse sentido, na desorção de P do solo com RTA, Rheinheimer et al (2003) observaram que a primeira extração retira o fosfato adsorvido com menor energia e à medida que esse se esgota, as quantidades removidas tornam-se pequenas, porque a energia de ligação do fosfato com os colóides aumenta, originando a curva que decai exponencialmente com o número de extrações sucessivas, como observado no presente trabalho. Apesar de aumentar a disponibilidade de P para as plantas, a acumulação de fosfato na superfície do solo sob SPD gera grande risco ambiental de eutrofização dos corpos d'água, devido ao carreamento de partículas coloidais ricas em P por escoamento superficial (PANUELAS et al., 2009).

A aplicação de fertilizantes no solo sob SPD permite que a concentração de P na região de influência da difusão dos produtos de reação solo-fertilizante no solo da superfície seria suficiente para que ocorra a neoformação de fosfatos de cálcio secundários de baixa solubilidade, devido às frequentes aplicações de calcário em superfície realizadas no presente experimento (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001), explicando o maior teor de P extraído por HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>, comparativamente ao solo revolvido.

O frequente revolvimento do solo realizado antes de cada cultivo no SCC distribuiu o P aplicado de forma mais uniforme, em volume maior de solo, resultando no aumento do teor de P total no solo das camadas 10-20 e 20-30 cm, comparativamente ao SPD. Dessa forma, no SCC ocorre saturação dos sítios de maior afinidade por P em subsuperfície, porém, em magnitude muito inferior a saturação do solo da camada superficial do SPD. Todavia, foi suficiente para aumentar o teor de P moderadamente lábil extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> no solo da camada 20-30 cm. A mesma relação pode ser estendida ao teor de P extraído por RTA, que no solo das camadas 10-20 e 20-30 cm sob SCC foi o dobro do que no SPD, apesar de não diferirem estatisticamente. Isto demonstra que o P adsorvido no solo subsuperficial sob SCC possui menor energia de ligação do que no solo sob SPD. Entretanto, a maior entrada de P em subsuperfície no SCC não foi suficiente para alterar o teor de P de formas de menor labilidade extraídos por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> e na fração residual.

A comparação do balanço teórico de P entre os sistemas de preparo de solo, indicam que em solos fertilizados por vários anos sob o SPD, o P que não é exportado pelas colheitas permanece no solo em formas mais potencialmente disponíveis que no solo sob SCC, como observado também por Rheinheimer et al (2000). Isso ocorre porque além da distribuição do P em volume maior de solo no SCC, ocorre maior perda de solo e P por erosão, e no presente estudo houve ainda menor exportação de P pelos grãos.

O aumento no teor de P total com diminuição da proporção de P inorgânico no solo cultivado, comparado ao solo sob mata nativa, indica que o P aplicado via fertilizante não está se acumulando em formas inorgânicas.

#### 5.4.2 Efeito do cultivo de diferentes espécies de plantas no inverno

O maior teor de P em formas lábeis no solo das camadas superficiais do SPD com o cultivo da aveia e do tremoço não pode ser atribuído à menor exportação de P pela produção

de grãos das culturas de verão, como relatado por Rheinheimer e Anghinoni (2001). Nesse trabalho a quantidade de grãos de milho (8 cultivos) e soja (9 cultivos) produzidas no solo sob SPD não variaram com a espécie de planta cultivada no inverno (CALEGARI, 2006). No entanto, a aveia preta produziu grande quantidade de massa durante o período de 1986 a 2005, que no somatório dos 11 anos em que foram cultivadas todas as espécies de inverno, acumulou  $15 \text{ Mg ha}^{-1}$  de resíduos a mais do que as outras espécies cultivadas (CALEGARI, 2006), que devem ter ciclado maior quantidade de P, do que se pode inferir a razão do maior teor de P em formas lábeis no solo das camadas superficiais do SPD.

O tremoço é conhecido por excretar grande quantidade de ácidos orgânicos como citrato, malato e fumarato, mesmo em condições de disponibilidade de P relativamente altas (BAYON et al., 2006), que promovem mobilização de P pela troca de ligante e/ou pela dissolução e ocupação dos sítios de adsorção. Isto implica no acesso de formas de P inorgânico inacessíveis a outras plantas. Dessa forma, o tremoço também cicla grandes quantidades de P, o que pode ter aumentando o teor de P nas formas lábeis no solo das camadas superficiais do SPD. Já no SCC, o revolvimento distribuiu os resíduos orgânicos em profundidade, com as conseqüentes reações do P com o solo após sua mineralização, e por isso não se observou maior teor de P nas formas lábeis com o cultivo da aveia e do tremoço.

A grande produção de ácidos orgânicos do tremoço pode ser também a explicação para os maiores teores de P no solo extraídos pelo NaOH  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ . Além disso, a produção de exsudatos radiculares de baixa relação C/N pelo tremoço pode ter favorecido a população microbiana do solo, que também são responsáveis pela produção de ácidos orgânicos (JONES, 1998). A decomposição dos ácidos orgânicos no solo é normalmente rápida, mas quando eles são ligados aos grupos funcionais da fase mineral a sua decomposição pode ser muito mais lenta (JONES et al., 2003). Dessa forma, a maior exsudação de ácidos carboxílicos pelo tremoço e possivelmente pela biomassa microbiana do solo com o passar dos cultivos, pode ter mobilizado P de formas menos disponíveis (NaOH  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  e a fração residual), aumentando o teor de P extraídos pelo NaOH  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ .

Entre as plantas cultivadas no inverno sob SPD, quando comparado a quantidade de P potencialmente disponível no solo da camada 0-5 cm, é possível verificar três grupos distintos: o solo cultivado com aveia e tremoço, que apresentou maior quantidade de P potencialmente disponível; seguido pelo solo cultivado com nabo, ervilhaca e mantido sob pousio; e o solo cultivado com trigo, que por sua vez, apresentou o menor teor de P potencialmente disponível entre as plantas cultivadas. No entanto, a quantidade de P teoricamente recuperada (potencialmente disponível + exportado) do solo cultivado com trigo

foi muito semelhante à quantidade recuperada do solo com o cultivo de nabo, ervilhaca e pousio (61 e 60% respectivamente), provavelmente por causa da exportação de P pela colheita de 7 cultivos de trigo entre 1986 e 1995.

## 5.5 Conclusões

1. A adição de fertilizantes fosfatados na linha de semeadura no SPD promoveu aumento de P inorgânico nas formas lábeis e moderadamente lábeis no solo da camada superficial, e o revolvimento do solo no SCC redistribuiu o P aplicado em profundidade, promovendo aumento no teor de P moderadamente lábil no solo das camadas subsuperficiais.
2. A aveia preta e o tremoço azul foram mais eficientes na ciclagem de P, e quando cultivadas sob SPD aumentaram o teor de P lábil no solo das camadas superficiais.

## 5.6 Referências

BAYON, R. C. et al. Soil phosphorus uptake by continuously cropped *Lupinus albus*: A new microcosm design. **Plant and Soil**, v. 283, p. 309–321, 2006.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. C. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 32, p. 671-674, 1982.

CALEGARI, A. **Sequestro de carbono, atributos físicos e químicos em diferentes sistemas de manejo em um Latossolo argiloso do sul do Brasil**. 2006. 191p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade de Londrina. Londrina, 2006.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre, SBCS/NRS, 2004. 400p.

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**, v. 27, p.893-900, 2003.

COSTA, A. C. S. **Iron oxide mineralogy of soils derived from volcanic rocks in the Paraná River Basin, Brazil**. 1996. 243p. Tese. (Soil Science PhD) - The Ohio State, 1996.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, v. 6, p. 82-85, 1977.

GATIBONI, L. C., et al. Quantificação do fósforo disponível por extrações sucessivas com diferentes extratores em latossolo vermelho distroférico, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1023-1029, 2002.

GATIBONI, L. C. et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 691-699, 2007.

GATIBONI, L. C., et al. Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1753-1761, 2008.

GEORGE, T. S. et al. Changes in phosphorus concentrations and pH in the rhizosphere of some agroforestry and crop species. **Plant and Soil**, v. 246, p. 65-73, 2002.

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 America Journal**, v. 46, p. 970-976, 1982.

HORST, W. J. et al. Agronomic measures for increasing P availability to crops. **Plant and Soil**, v. 237, p. 211-223, 2001.

JONES, D. L. Organic acids in the rhizosphere - a critical review. **Plant and Soil**, v. 205, p. 25-44, 1998.

KUO, S.; HUANG, B.; BEMBENEK, R. Effects of long-term phosphorus fertilization and winter cover cropping on soil phosphorus transformations in less weathered soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 41, p. 116-123, 2005.

LAJTHA, K.; HARRISON, A. F. Strategies of phosphorus acquisition and conservation by plant species and communities. In: TIESSEN, H (Ed). **Phosphorus in the global environmental: transfers, cycles and management**. Ed. 1. Chichester, U.K: Wiley, 1995. p. 139-147.

LI, H. et al. Phosphorus uptake and rhizosphere properties of intercropped and monocropped maize, faba bean, and white lupin in acidic soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 46, p. 79-91, 2010.

McKEAN, J.; WARREN, G. P. Determination of phosphate desorption characteristics in soils using successive resin extractions. **Communications in Soil Science Plant Analysis**, v. 27, p. 2397-2417, 1996.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31-36, 1962.

OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E.; Phosphorus. Methods of Soil Analysis, Part 2. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, Q. R. (Eds). **Chemical and Microbiological Properties**. ed. 1. Soil Science Society of America. Madison, 1982 p. 403-430.

PANUELAS, J. et al. Increased eutrophication and nutrient imbalances in the agricultural soil of NE Catalonia, Spain. **Journal of Environmental Biology**, v. 30, p. 841-846, 2009.

REDEL Y. D. et al. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol, **Geoderma**, v. 139, p. 388–396, 2007.

RHEINHEIMER, D. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 345-354, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p.151-160, 2001.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, v.33, p.1053-1059, 2003.

ROSE, T. J.; HARDIPUTRA, B.; RENGEL, Z. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. **Plant Soil**, v. 326, p. 159–170, 2010.

TAKEDA, M. et al. Phosphorus transformation in a soybean-cropping system in Andosol: effects of winter cover cropping and compost application. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 85, p. 287–297, 2009.

TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of American Journal**, v. 48, p. 853–858, 1984.

VINCENT, A. G.; TURNER, B. L.; TANNER, E. V. J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist Forest. **European Journal of Soil Science**, v. 61, p. 48–57, 2010.

VU, D. T.; TANG, C.; ARMSTRONG, R. D. Transformations and availability of phosphorus in three contrasting soil types from native and farming systems: A study using fractionation and isotopic labeling techniques, **Journal of Soils and Sediments**, v. 10, p.18–29, 2010.

WANG, J. et al. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-years superphosphate application. **Pedosphere**, v. 20, p. 304–310, 2010.

WANG, X. et al. Phosphorus acquisition characteristics of cotton (*Gossypium hirsutum* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.) and white lupin (*Lupinus albus* L.) under P deficient conditions. **Plant and Soil**, v. 312, p. 117–128, 2008.

YU, T. R. **Chemistry of variable charge soils**. 1. ed. New York, Oxford University Press, 1997. 505p.

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, p. 131–138, 2008.

## 6 CONCLUSÕES GERAIS

1. A maior parte do fosfato aplicado via fertilizantes em doses racionais, de acordo com as necessidades das plantas e o tipo de solo, foi convertida em formas orgânicas pelas plantas e pela biomassa microbiana do solo, ao invés de ser adsorvido pela fração mineral do solo.
2. A aplicação de fosfato no solo sob SPD criou forte gradiente de disponibilidade de P em profundidade, e no solo da camada superficial promoveu aumento do teor de P em formas orgânicas e inorgânicas, lábeis e moderadamente lábeis, comparativamente ao SCC.
3. O cultivo do solo com plantas durante o período hibernar aumenta a importância das reações biológicas do ciclo do P, em especial no SPD, onde grande quantidade de resíduos vegetais é depositada na superfície do solo, apresentando maior teor de P orgânico, P estocado na BMS e atividade das enzimas fosfatases ácidas.
4. O cultivo de plantas com grande produção de biomassa, como a aveia preta, e de plantas capazes de adquirir P de formas de menor labilidade, como o tremoço azul, sob o SPD, aumentou o teor de P inorgânico lábil no solo das camadas superficiais, devido à maior quantidade de P reciclado. O mesmo, porém, não ocorre quando da incorporação dos resíduos culturais pelo revolvimento do solo no SCC, pois após ser mineralizado, o P segue a mesma rota de adsorção do P em solução, sendo retido com forte energia de ligação nesse sistema.

## APÊNDICES

APÊNDICE 1 – Densidade do solo em função de diferentes preparos de solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Preparo	Camada de solo, cm				
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40
	----- Densidade do solo, g cm <sup>-3</sup> -----				
SPD	1,01 aC**	1,27 aA	1,29 aA	1,16 aB	1,07 aC
SCC	1,08 aC	1,18 bAB	1,22 aA	1,21 aA	1,14 aBC
Mata <sup>1</sup>	0,68	0,70	0,75	0,81	0,84
					CV = 6,36%

\*\* Significativo a 1% de probabilidade de erro; Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando preparo de solo para cada profundidade, e médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha, comparando a profundidade dentro de cada preparo de solo não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística.

APÊNDICE 2 – Valores de pH em água e índice SMP, teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) trocáveis do solo em função de diferentes preparos de solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Preparo	Camada de solo, cm				
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40
----- pH H <sub>2</sub> O (1:1) -----					
SPD	5,56 aA**	5,54 aA	5,34 aB	5,17 aC	5,14 bC
SCC	5,08 bC	5,09 bC	5,15 bBC	5,27 aAB	5,34 aA
Mata <sup>1</sup>	4,53	4,43	4,43	4,42	4,46
CV = 2,69%					
----- Índice SMP (1:1:0,5) -----					
SPD	5,93 aA**	5,99 aA	5,92 aA	5,91 aA	5,94 bA
SCC	5,70 bB	5,76 bB	5,79 bB	5,97 aA	6,04 aA
Mata <sup>1</sup>	4,99	5,03	5,14	5,25	5,27
CV = 1,77%					
----- Ca trocável, cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	4,9 aA**	3,9 aB	2,8 aC	1,8 bD	1,4 bE
SCC	2,4 bA	2,4 bA	2,5 aA	2,2 aA	1,9 aB
Mata <sup>1</sup>	1,3	0,4	0,2	0,1	0,1
CV = 15,02%					
----- Mg trocável, cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	2,4 aA**	1,8 aB	1,5 aC	1,2 aD	1,0 aD
SCC	1,2 bA	1,2 bA	1,2 bA	1,2 aA	1,1 aA
Mata <sup>1</sup>	1,4	0,8	0,6	0,4	0,3
CV = 16,29%					
----- Al trocável, cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	0,1 bC**	0,1 bC	0,3 aB	0,5 aA	0,6 aA
SCC	0,5 aA	0,6 aA	0,5 aA	0,4 aB	0,3 bB
Mata <sup>1</sup>	2,7	3,5	3,5	3,4	3,1
CV = 44,64%					

\*\* Significativo a 1% de probabilidade de erro; Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando preparo de solo para cada profundidade, e médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha, comparando a profundidade dentro de cada preparo de solo não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística.

APÊNDICE 3 – Teor de potássio (K) extraído por Mehlich-1, capacidade de troca de cátions efetiva ( $CTC_{efetiva}$ ), capacidade de troca de cátions à pH 7,0 ( $CTC_{pH7,0}$ ), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m) do solo em função de diferentes preparos de solo após 23 anos de cultivo, em Latossolo Vermelho Aluminoférrico da região sudoeste do Paraná.

Preparo	Camada de solo, cm				
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40
----- K disponível por Mehlich-1, mg kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	174 MA <sup>2</sup>	114 A	88 A	48 M	31 B
SCC	164 MA	113 A	115 A	62 A	34 B
Mata <sup>1</sup>	88 A	58 M	38 B	26 B	21 B
----- $CTC_{efetiva}$ , cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	7,8 aA <sup>**</sup>	6,2 aB	4,8 aC	3,6 aD	3,0 aE
SCC	4,6 bA	4,4 bAB	4,5 aA	3,9 aB	3,3 aC
Mata <sup>1</sup>	5,7	4,9	4,3	4,0	3,6
CV = 11,61%					
----- $CTC_{pH7,0}$ , cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----					
SPD	12,6 aA <sup>**</sup>	10,6 aB	9,5 aC	8,0 aD	7,2 aE
SCC	10,2 bA	9,7 bA	9,7 aA	8,2 aB	7,3 aC
Mata <sup>1</sup>	17,1	14,6	12,6	11,1	10,6
CV = 7,32%					
----- V, % -----					
SPD	62 aA <sup>**</sup>	57 aA	48 aB	39 aC	34 aC
SCC	39 bA	40 bA	42 aA	43 aA	41 aA
Mata <sup>1</sup>	18	9	7	6	5
CV = 12,01%					
----- m, % -----					
SPD	1 bC <sup>**</sup>	3 bC	8 aB	15 aA	18 aA
SCC	12 aA	13 aA	12 aA	11 aA	10 bA
Mata <sup>1</sup>	47	72	80	85	86
CV = 44,94%					

<sup>\*\*</sup> Significativo a 1% de probabilidade de erro; Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando preparo de solo para cada profundidade, e médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha, comparando a profundidade dentro de cada preparo de solo não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey; <sup>1</sup> Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos, e não participaram da análise estatística; <sup>2</sup> Interpretação dos teores de K extraído por Mehlich-1, segundo a CQFS-RS/SC (2004): MA = muito alto, A = alto, M = médio, B = baixo.