

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

**Mayara Regina Fornari**

**SOLOS COM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E ROTAÇÃO DE  
CULTURAS EM LONGO PRAZO: FLUTUAÇÕES NAS FRAÇÕES DE  
FÓSFORO**

Santa Maria, RS

2017

**Mayara Regina Fornari**

**SOLOS COM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E ROTAÇÃO DE  
CULTURAS EM LONGO PRAZO: FLUTUAÇÕES NAS FRAÇÕES DE FÓSFORO**

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  
2017

**Mayara Regina Fornari**

**SOLOS COM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E ROTAÇÃO DE  
CULTURAS EM LONGO PRAZO: FLUTUAÇÕES NAS FRAÇÕES DE FÓSFORO**

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**.

**Aprovada em 27 de fevereiro de 2017:**

---

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

---

**Prof. Dra. Maria Alice Santanna dos Santos (CCNE -UFSM)**

---

**Prof. Dr. Tales Tiecher (Agronomia - UFRGS)**

Santa Maria, RS  
2017.

*Dedico aos meus pais, Ana Simone e Valdecir, e minha irmã Emilly, por serem meu alicerce, meu porto seguro, por todo o incentivo, paciência e muito amor na realização deste trabalho.*

**Ofereço à Deus!!!**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais Valdecir e Ana Simone por todo o apoio que sempre me deram. Mesmo longe, sei que vocês estavam do meu lado a cada nova conquista, a cada “queda”, a cada elogio, a cada erro, a cada disciplina vencida. Obrigada por tudo, vocês “são as batidas fortes do meu coração”. A minha irmanzinha Emilly, pela parceria, amizade e todo o amor. A toda minha família que de uma forma ou outra sempre se fez presente.

Ao professor Danilo e à professora Maria Alice pelas orientações, pela amizade, pelos conselhos, pelos “puxões de orelha”. Por esses quatro anos de convivência, que me mostraram que existem muitas oportunidades e novos caminhos. Obrigada mesmo, pois sem o apoio de vocês certamente não teria terminado o meu trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo. Ao governo (Lula e Dilma), à Universidade Federal de Santa Maria, aos professores e funcionários do programa de pós-graduação em Ciências do Solo, o meu “muito obrigada”. Ao Finamor (*in memoriam*) por toda a paciência e dedicação ao laboratório.

Ao Instituto de Pesquisa Agronômica do Estado do Paraná pelo empenho de sua direção e seus servidores que implantaram e conduziram por três décadas o experimento objeto de estudo neste trabalho, bem como aos funcionários que também ajudaram nas coletas (principalmente ao Luís). À Dr<sup>a</sup> Janaína, pela sua disponibilidade durante as coletas. Agradecimento especial ao pesquisador Ademir Calegari, idealizador e responsável pelo experimento até sua aposentadoria, e à pesquisadora Lutécia Beatriz dos Santos Canalli, atual coordenadora do experimento, por toda a ajuda nesses dois anos de trabalho.

Não posso deixar de agradecer ao pessoal do LFQS, de um modo geral: obrigada a todos. Ao José (Baiano), ao Gilmar, ao Mohsin, ao Alexandre, ao Alex, ao Ivan e à Daniela pela ajuda nas coletas, pela parceria na longa jornada de Santa Maria a Pato Branco e em todo o andamento da pesquisa. À Marília, por todo o apoio e ajuda na hora da escrita: obrigada por não me deixar desistir, obrigada Mah!!! Um grande

obrigado ao Tales, por aceitar o convite de ser membro da banca e pelas suas colaborações de sempre.

Um agradecimento especial aos bolsistas de iniciação científica, que ajudaram por muitos dias nos peneiramentos das amostras úmidas aos procedimentos de análise: Eduardo Alves, Hélien Setim, Diego Coppetti, Teles Tronco, Uilian Rodrigues, Camila Maia, Diogo Alves, Giulia, Richard Coelho e tantos outros que de alguma forma me ajudaram. Queria agradecer também aos colegas que estiveram comigo nessa jornada, que me apoiaram, que trocaram conhecimento, que me abraçaram nas horas mais críticas: Jocelina Vargas, Fabiane Medeiros, Graciela, Roque, Marcos Bender, Piccin, De Conti, Alessandra Bacca, Carina, Gerson, Lucas Teles, Lueni, Lucas Ciotti, Daniela Herzog, Juliana Lorrensi, Luís Antônio, Alan Batistão, Gabriel, Patrick e Anderson Marques.

Aos meus amigos de longa data, que sempre estiveram junto em todas as horas, nas comemorações dos resultados, na hora do desespero, na hora da crise, na hora do apoio, na hora boa e na hora ruim: Helena Oliveira, Regina Stacke, Tiarles, Pedro Feltrin, Juliana Ferrari, Cristina Tabarelli, Bruna Canova, Bruno Hennemann, Darliana, Danaila, Ana Bacca, Tiago Rupullo (*in memoriam*), Nicolas, Verônica, Leticia Adamy, Thaís Adamy, Sérgio e Jussara Adamy. E a todos os outros, pois senão ficaria escrevendo ainda algumas páginas...

À “minha pequena” por ter me ensinado muito nesses anos, e que com certeza será um dos maiores laços que terei aqui em Santa Maria. Obrigada por tudo, minha amada Rafa.

*"No meio da confusão, encontre a simplicidade. A partir da discórdia, encontre a harmonia. No meio da dificuldade reside a oportunidade." Albert Einstein*

## RESUMO

### SOLOS COM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO E ROTAÇÃO DE CULTURAS EM LONGO PRAZO: FLUTUAÇÕES NAS FRAÇÕES DE FÓSFORO

AUTORA: Mayara Regina Fornari

ORIENTADOR: Dr. Danilo Rheinheimer Dos Santos

Os efeitos de diferentes preparos de solo e de plantas cultivadas na dinâmica do fósforo no solo ainda não estão totalmente esclarecidos, especialmente em solos altamente intemperizados sob condições subtropicais, como os da região Sul do Brasil. Somando-se a esse cenário, ocorre o declínio das reservas de matéria-prima para a produção de fertilizante fosfatados. Assim, tem se acentuado a busca por alternativas para aumentar a capacidade de produção e melhorar as condições físicas, biológicas e químicas do solo, de maneira econômica e sustentável. O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência do Sistema Plantio Direto (SPD) e do Sistema Cultivo Convencional (SCC), ambos já consolidados, aliados a diferentes plantas de coberturas de inverno, nas frações de P num Latossolo Vermelho muito argiloso. A área experimental está localizada na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR, em Pato Branco, Paraná. As parcelas principais tiveram como tratamento as plantas de cobertura: azevém (*Lolium multiflorum* L.), centeio (*Secale cereale* L.), ervilhaca comum (*Vicia sativa* L.), ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth) + aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), pousio e trigo (*Triticum aestivum* L.), enquanto nas sub-parcelas foram utilizados dois sistemas de preparo do solo: SPD e SCC. As coletas ocorreram em três períodos distintos: pós-colheita do milho (safra 2014-2015), no florescimento das plantas de cobertura (2015) e no florescimento da soja (safra 2015-2016). A profundidade coletada foi de 0 a 0,10 m. A análise química das diferentes frações de P foi realizada com os seguintes métodos: P potencialmente disponível, por Mehlich 1 e resina trocadora de ânions (RTA); P armazenado na Biomassa Microbiana do Solo (BMS), através da fumigação com clorofórmio; P moderadamente lábil, pelo extrator NaOH 0,5 mol l<sup>-1</sup>, P orgânico total (Po Total), pela ignição a 550°C em mufla e posterior extração com ácido sulfúrico; P total (P Total), pelo método de digestão em bloco; P inorgânico total (Pi Total), pela diferença entre o P Total e Po Total. Quando comparado ao SCC, o SPD apresentou as maiores médias de P extraído em todas frações analisadas. As parcelas cultivadas com trigo tiveram as menores médias de P disponível por Mehlich (7,9 mg kg<sup>-1</sup>) e de P estocado na BMS (30,8 mg kg<sup>-1</sup>). O P orgânico (Po), tanto no SCC quanto no SPD, correspondeu a 30% do P total. Concluiu-se que, o cultivo do solo sem revolvimento, com plantas hibernais e com altas produtividades do solo, parte do P inorgânico aplicado se acumula em formas orgânicas moderadamente lábeis.

**Palavras-chave:** Sistema de plantio direto. Sistema de cultivo convencional. Plantas hibernais



## ABSTRACT

### SOILS WITH DIFFERENT SYSTEMS OF MANAGEMENT AND ROTATION OF LONG-TERM CULTURES: FLOATINGS IN PHOSPHORUS FRACTIONS

AUTHOR: MAYARA REGINA FORNARI

ADVISER: DR. DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS

An exploration for economical and sustainable alternatives, to maximize the use of phosphorus present in soil has emphasized against the decline in phosphate fertilizer production reserves. Different physical and chemical characteristics of the soil can be affected by soil preparation and planting of different crops in crop rotation system. However, their effects on soil phosphorus dynamics are not fully clarified, especially in highly weathered regions such as southern Brazil. The objective of this work was to evaluate the influence of the No Tillage System (NTS) and Conventional Tillage System (CTS), associated with different winter cover crops on phosphorus fractions in very clayey oxisol. The experimental area is located at the Experimental Station of the Agronomic Institute of Paraná, in Pato Branco-Paraná. The main plots were treated with different cover crops: ryegrass (*Lolium multiflorum* L.), rye (*Secale cereale* L.), common vetch (*Vicia sativa* L.), hairy vetch (*Vicia villosa* Roth) + black oat (*Avena strigosa* Schreb), forage turnip (*Raphanus sativus* L.), wheat and fallow, while (*Triticum aestivum* L.), in subplots two soil preparation systems (NTS and CTS) were used. Soil samples were collected from 0 to 0.10m depth with three distinct periods: corn post-harvest (2014-2015), flowering of cover crops (2015) and soybean flowering (2015-2016). The methodologies used for the analyzes were: potentially available P by Mehlich 1 and anion exchange resins (AER); stored P in soil microbial biomass (SMB) through fumigation with chloroform; NaOH (0.5 mol l<sup>-1</sup>) extractable P, total organic P (Po) by ignition at 550 ° C in muffle furnace and subsequent extraction with sulfuric acid; Total P (P<sub>total</sub>) by the block digestion method; Total inorganic P (Pi) by difference between P Total and Po total. The NTS in relation to CTS had the highest averages of P extracted in all fractions analyzed. Wheat had the lowest averages of available P by Mehlich (7.9 mg kg<sup>-1</sup>) and P stored in the SMB (30.8 mg kg<sup>-1</sup>). The organic P (Po) in both SCC and SPD corresponded to 30% of total P. It was concluded that the cultivation of the soil no tillage with hibernal plants and with high yields of soil, part of the P inorganic applied can accumulate in the form of moderately labile organic.

**Keywords:** No tillage system. Conventional tillage system. Winter crops.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 . Competição entre ácidos orgânicos (AO) e fósforo (P) pelos sítios de adsorção nos colóides do solo (GUPPY et al., 2005).....20
- Figura 2.. Localização do experimento na Estação Experimental do Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR, na região Sudoeste do Paraná. ....27
- Figura 3. Visão geral da localização do experimento instalado na Estação Experimental do Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR, região Sudoeste do Paraná. Fonte: Google Earth.....27
- Figura 4. Precipitação total (mm) e médias da temperatura máxima e mínima (°C) mensal no período de outubro 2015 a março 2016 em Pato Branco - PR. ....32
- Figura 5. Média das frações de P obtidas entre o sistema de plantio, época de coleta e rotação de cultura na camada de 0 a 0,1 m num Latossolo Vermelho do estado do Paraná, cultivado sob sistema de cultivo convencional (SCC) e sistema de plantio direto (SPD) por longo período.....53
- Figura 6. Análise de regressão da interação entre o P estocado na biomassa microbiana do solo (BMS) e o fósforo orgânico total (Po Total). ....53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Textura e composição mineralógica do Latossolo Vermelho Aluminoférrico utilizado no experimento. ....	26
Tabela 2. Culturas estabelecidas sob sistema de lantio direto e sistema de cultivo convencional e aplicação de calcário, no decorrer de 30 anos na área experimental sob um Latossolo Vermelho Aluminoférrico situado na região Sudoeste do Paraná (Adaptado de Calegari, 2006;.....	29
Tabela 3. Produção de fitomassa seca da parte aérea das plantas cultivadas durante 29 anos, sob sistema de plantio direto (SPD) e sistema de cultivo convencional (SCC) .....	30
Tabela 4. Caracterização químico-física de amostras de solo coletadas na camada de 0-10 cm de um Latossolo Vermelho cultivado sob sistema de plantio direto (SPD) e sistema de cultivo convencional (SCC) por 29 anos (Pato Branco-PR/2015) .....	38
Tabela 5. Fósforo prontamente disponível extraído por Mehlich 1 e por resina trocadora de ânion (RTA). Fósforo armazenado na biomassa microbiana (P microbiano) (mg kg <sup>-1</sup> ) no solo na camada de 0,10 m num Latossolo Vermelho do estado do Paraná, cultivado sob Sistema de cultivo convencional (SCC) e sistema de plantio direto (SPD) por longo período .....	41
Tabela 6. Fósforo armazenado na biomassa microbiana (mg kg <sup>-1</sup> ) no solo na camada de 0,10 m num Latossolo Vermelho do estado do Paraná, cultivado sob Sistema de cultivo convencional (SCC) e sistema de plantio direto (SPD) por longo período. ...	44
Tabela 7. P orgânico e inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol l <sup>-1</sup> no solo da camada de 0-10 cm num Latossolo Vermelho do estado do Paraná, cultivado sob sistema de cultivo convencional (SCC) e sistema plantio direto (SPD) por longo período. ....	47

## LISTA DE SIGLAS

Ácidos orgânicos - AO

Adenosina Trifosfato - ATP

Área de superfície de contato - ASE

Biomassa Microbiana do Solo - BMS

Capacidade de Troca de Cátions - CTC

Carbono Orgânico – CO

Carbono Orgânico Total– COT

Clima temperado úmido com verão temperado - Cfb

Horizonte diagnóstico Latossólico-Bw

Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR

Matéria Orgânica do Solo - MOS

Sistema de Cultivo Convencional - SCC

Sistema Plantio Direto - SPD

Tampão Santa Maria - TSM

Laboratório de Química e Fertilidade do Solo- LQFS

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1.	INTEMPERISMO E AS FORMAS DE FÓSFORO .....	16
2.2.	MANEJO DO SOLO E ROTAÇÃO DE CULTURAS AFETAM A DISTRIBUIÇÃO DAS FORMAS DE FÓSFORO .....	20
3.	HIPÓTESE.....	24
4.	OBJETIVOS.....	25
4.1	GERAL.....	25
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
5.	MATERIAL E MÉTODOS.....	26
5.1.	DESCRIÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL EM ESTUDO .....	26
5.2.	MANEJO DA ÁREA EXPERIMENTAL NAS SAFRAS 2014 - 2016 .....	31
5.3.	COLETA DO SOLO .....	32
5.4.	ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICAS .....	33
5.5.	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	35
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	37
6.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO SOLO APÓS 29 ANOS DE EXPERIMENTO.....	37
6.2	FÓSFORO PRONTAMENTE DISPONÍVEL.....	39
6.3	FÓSFORO ARMAZENADO NA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO ....	42
6.4	FRAÇÕES DE FÓSFORO ORGÂNICO E INORGÂNICO NO SOLO .....	46
6.5	FORMAS DE FÓSFORO NO SOLO .....	51
7.	CONCLUSÕES.....	54
8.	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	55
9.	REFERÊNCIAS .....	56
	APÊNDICES .....	68

## 1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é o décimo primeiro elemento químico mais abundante na crosta terrestre (0,112% - LEE, 1999), sendo considerado como essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Nos tecidos vegetais encontra-se o P na estrutura das membranas celulares, no material genético e nos armazenadores de energia, como os fosfolipídios, os ácidos nucléicos e a adenosina trifosfato (ATP). O manejo do solo pode ser limitante na produtividade agrícola e influenciar a utilização dos fertilizantes fosfatados, pois pode alterar a dinâmica de adsorção do P no solo.

Grupos funcionais existentes nas arestas das argilas silicatadas (silanol e aluminol) e grupos R-OH dos oxihidróxidos de Ferro (Fe) e Alumínio (Al) podem facilmente adsorver o P, deixando-o indisponível para as plantas, principalmente em solos mais intemperizados, como os Latossolos. Com revolvimento do solo, técnica utilizada no sistema de cultivo convencional (SCC), novos sítios de adsorção podem ser expostos, aumentando o contato entre os grupos funcionais dos colóides do solo e o íon ortofosfato, bem como a distribuição do P em profundidade. O resultado disso é a menor disponibilidade de P para as culturas (RHEINHEIMER et al., 2008a). A partir de 1970, nas lavouras na região Sul do Brasil começou-se a introduzir o sistema de plantio direto (SPD), o qual preconiza manter o solo sempre coberto por plantas em desenvolvimento e/ou por resíduos vegetais. Essa prática conservacionista visa melhorar a qualidade dos solos e minimizar as perdas de nutrientes por erosão (MUZILLI, 1981, 1983; ANGHINONI, 2007; ALBUQUERQUE et al., 2013; TIVET et al., 2013).

A maneira como aplica-se o fertilizante no solo também é importante. A adição de fertilizantes fosfatados na linha de semeadura é feita para que os sítios de adsorção com alta afinidade por P nesses locais sejam gradualmente saturados e em consequência, a dessortividade nas superfícies dos colóides seja muito maior quando comparada com a situação em que a mesma dose de fertilizante é homogeneizada em todo o volume de solo (RHEINHEIMER et al., 2008a). Adicionalmente, a manutenção da palhada na superfície do solo proporciona o acúmulo de matéria orgânica, decorrentes do aporte de fitomassa seca da parte aérea (GUBIANI, 2013).

Isso resulta em benefícios ao solo, como maior atividade microbiana, maior mineralização dos nutrientes e, conseqüentemente, maior probabilidade de estabilidade microbiológica (MELO JÚNIOR et al, 2011; BORTOLETI JUNIOR et al, 2015).

A biomassa microbiana do solo (BMS) é responsável pela mineralização das frações orgânicas do solo, por meio da síntese e exsudação de fosfatases, transformando o P orgânico (Po) em P inorgânico (Pi), forma assimilável pelas plantas. A velocidade de mineralização pode sofrer interferências devidas às estruturas dos radicais orgânicos em que os grupamentos de fosfato estão ligados, sendo diferente para cada espécie de planta. Todavia, a quantidade e a qualidade dos resíduos culturais sobre o solo influenciam na variação da sua taxa de decomposição (RHEINHEIMER et al. 2000, MARTINAZZO et al., 2007; MACHADO et al., 2012).

Tiecher (2011) apresenta de forma sintética as diferentes estratégias utilizadas pelos micro-organismos e plantas para acessarem formas de baixa disponibilidade. Entre elas, destacam-se a solubilização intermediada pela liberação de CO<sub>2</sub>, ácidos orgânicos quelantes e ácidos inorgânicos (HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), além da presença de transportadores de alta afinidade (EPSTEIN, 1975; ROSS et al., 1995).

As estratégias de obtenção de P pelas espécies de plantas de cobertura do solo e a dinâmica dos seus resíduos vegetais quando mineralizados têm alterando a ciclagem de nutrientes e, por conseguinte, a sua disponibilidade no solo, principalmente nas camadas superficiais (SHIRADO e TAQUES, 2016). Pode-se assim melhorar a eficiência de utilização do P, principalmente àquele adicionado via fertilizante. A utilização de diferentes espécies de plantas de cobertura do solo sob o SPD pode ser a alternativa para melhorar a utilização de fertilizantes fosfatados e aumentar a produtividade. Além da melhoria das condições físicas, biológicas e químicas do solo, esse tipo de manejo leva ao aumento da produção e à diminuição da taxa de erosão e assoreamentos de rios. Por isso, o objetivo desse trabalho foi avaliar as diferentes frações de P orgânico e inorgânico presentes em um solo classificado como muito argiloso, que foi submetido por um longo período (30 anos) a diferentes rotações de culturas, sob os sistemas de manejo SPD e SCC consolidados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. INTEMPERISMO E AS FORMAS DE FÓSFORO

Os solos são originados das interações entre os processos (adição, translocação, transformação ou remoção de materiais) e os fatores de formação (clima, relevo, organismos, material de origem, tempo e ação antrópica - TIESSEN et al., 1984). As rochas e os minerais primários, que estão em desequilíbrio termodinâmico sob ação do intemperismo, tendem a se transformar em materiais mais estáveis, avançando desde a formação de saprólito até a geração dos solos (NAHON, 1991).

Os minerais secundários formados, conhecidos como argilominerais do solo, são constituídos por tetraedros e octaedros de silício (Si), Al e outros cátions. As ligações de Silanol (Si-O) e Aluminol (Al-O) presentes na sua constituição têm alto grau de covalência. A presença de prótons, oriundos do intemperismo, rompe as ligações Al-O, com conseqüente liberação dos tetraedros de Si, processo conhecido como dessilicação. Esse processo tem diferentes graus de reações e interações e, assim dá origem a diferentes produtos finais (MELFI e PEDRO, 1977).

A dessilicação pode ocorrer parcialmente, formando argilominerais 1:1 a partir de argilominerais 2:1. Em regiões de clima quente e úmido e com intensa força do intemperismo, geralmente a reação de dessilicação ocorre de forma total, levando à recristalização do Fe e Al em forma de óxidos, processo conhecido como ferralitização ou alitização (MELFI e PEDRO, 1977). Os óxidos mais comuns no solo são a goethita ( $\alpha\text{FeOOH}$ ), a hematita ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e a gibbsita ( $\alpha\text{Al}(\text{OH})_3$ ). As condições ambientais e as concentrações de Fe e Al presentes durante a formação dos óxidos são os principais fatores que irão determinar qual estrutura será formada. Concomitantemente com a formação dos óxidos, pode ocorrer a percolação de cátions de elementos que estão neutralizando as cargas dos argilominerais, como cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e sódio (Na). Entre os solos formados nessas condições, destacam-se os Latossolos.



Os Latossolos no Brasil ocupam a área de 2.681.588,69 km<sup>2</sup>, distribuídos em 31% do território nacional, sendo que no estado do Paraná essa é a principal classe de solo (EMBRAPA, 2006; LIMA et al, 2012). Devido a sua gênese, os Latossolos apresentam características decorrentes de intenso intemperismo, tais como alta profundidade e homogeneidade no perfil, baixa capacidade de troca de cátions (CTC) e baixa fertilidade natural.

O intemperismo também é responsável pela solubilização do mineral primário rico em P, a apatita, liberando ortofosfato para a solução do solo. O fosfato na solução do solo é instantaneamente adsorvido aos grupos funcionais dos argilominerais do tipo 1:1 e dos óxidos de Fe e Al (BECK e SANCHES, 1994; NOVAIS e SMYTH, 1999; RHEINHEIMER et al., 2008a; MELLO e PEREZ, 2009; GATIBONI et al., 2013).

Na superfície dos colóides inorgânicos do solo há presença de sítios ativos (OH e OH<sub>2</sub><sup>+</sup>) que são trocados pelo orbital doador de elétrons do Oxigênio (O<sup>-</sup>) que apresenta desbalanço de carga na estrutura do ortofosfato. Posteriormente, uma ligação de caráter predominantemente covalente, com alta energia, é formada entre o fosfato e as partículas coloidais do solo, conferindo-lhe estabilidade na fase sólida. Esse tipo de adsorção ocorre na camada de Stern<sup>1</sup> e, é conhecida como quimiossorção ou adsorção específica do fosfato (BARROW, 1983).

A adsorção do P no solo também pode ter diferentes níveis de energia, dependendo da quantidade de ligações formadas entre o fosfato e os orbitais receptores dos metais da superfície dos óxidos de Fe e Al, podendo ser monodentada, bidentada ou binuclear. Quando os íons ortofosfatos já adsorvidos nos colóides deslocam para a solução do solo outra molécula de água e/ou grupo hidroxila monocoordenado, forma-se um complexo binuclear, aumentando a quantidade de moléculas em solução e a desordem do meio; neste caso o complexo formado é mais estável e apresenta menor dessortividade (YU, 1997). Essas interações variam com o pH, com a força iônica do meio, com o cátion acompanhante e, especialmente, com o tipo de mineral adsorvente (CASAGRANDE et al., 2003).

---

<sup>1</sup> Nesta teoria, assume-se que existem duas camadas: uma mais próxima à superfície, chamada de camada de Stern, onde os íons ficam adsorvidos, e outra composta pelos outros íons com interações eletrostáticas formando uma camada difusa (ALLEONI e CAMARGO, 1994).

Assim, mesmo que as concentrações de P total dos solos sejam altas, somente uma quantidade muito pequena, que está adsorvida com baixa energia de ligação (monodentadas) é passível de ser desorvida, correspondente aos P inorgânico (Pi) moderadamente lábeis (NOVAIS e SMITH, 1999; PAVINATO e ROSOLEM, 2008; RHEINHEIMER et al., 2008a). Essa fração é chamada de fator quantidade (Q) e está em equilíbrio com o P presente na solução do solo, fator intensidade (I). Quando o Q não se faz suficiente para sustentar a demanda de absorção pelas plantas, o solo pode se tornar um dreno de P (NOVAIS e SMYTH, 1999). Destarte, são utilizados fertilizantes fosfatos como estratégia para aumentara capacidade de Q em repor o I (NOVAIS e SMYTH, 1999; RHEINHEIMER et al., 2008a).

A presença de micro-organismos no solo também atua como um dreno do fosfato liberado pelo intemperismo, o qual passa a ser armazenado na biomassa microbiana do solo (BMS). De modo análogo, as plantas, ao absorverem o fosfato da solução do solo, também o incorporam em esqueletos carbonados. Essas duas frações, ao serem reprocessadas por meio de sínteses e exsudatos da biota microbiana, podem resultar na liberação de Pi, mas também de fragmentos de esqueleto carbonado contendo P (ROSS et al., 1995). As três frações são denominadas de fósforo orgânico (Po). A mineralização do Po pode ser uma importante fonte de P às plantas, principalmente em solos com alto potencial de adsorção do P.

A BMS também exerce um papel fundamental na imobilização do P nas suas células, sendo considerado um reservatório de P lábil, prevenindo que o P seja adsorvido pelos colóides inorgânicos do solo por períodos prolongados (NZIGUHEBA e BÜNEMANN, 2005). Posteriormente, atua como uma fonte de P, pois, com a morte e a lise das células da BMS, são liberados diversos nutrientes para o solo. A liberação de nutrientes ocorre de forma sincronizada com a demanda das plantas (CONTE et al., 2002; MARTINAZZO et al., 2007; RHEINHEIMER et al., 2008a). Indicadores como a BMS podem revelar alterações na qualidade e nas propriedades biológicas do solo, pois os micro-organismos são sensíveis às variações climáticas e ao próprio manejo adotado (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006; MARTINAZZO et al., 2007). A BMS também pode ser afetada pela qualidade e quantidade de resíduos vegetais depositados sobre o solo

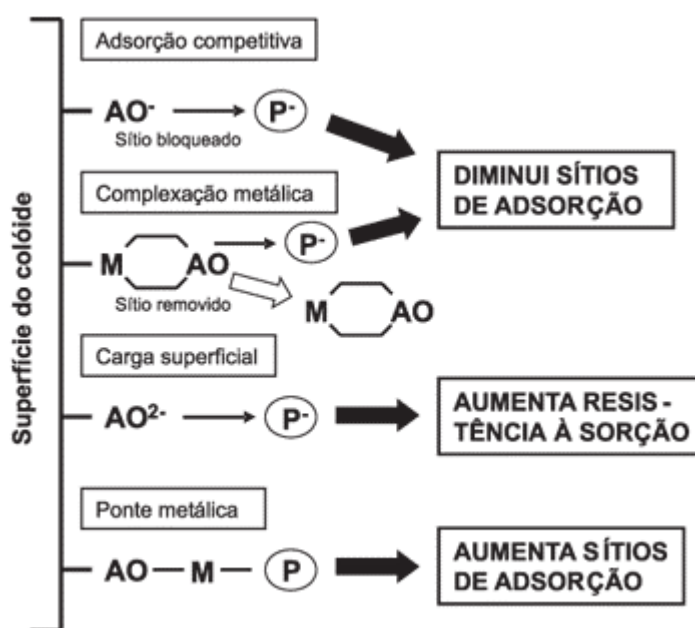
Os resíduos vegetais que foram depositados no solo começam a fazer parte da matriz, constituindo a matéria orgânica do solo (MOS), caracterizada por apresentar uma natureza complexa e variada. Sua composição inclui a celulose, as hemiceluloses, a lignina e as proteínas, sendo que cada um desses componentes sofre alterações diferenciadas no solo. A celulose e as hemiceluloses são degradadas rapidamente, enquanto que a lignina é degradada lentamente, devido à complexibilidade de sua estrutura. Através da decomposição dos resíduos orgânicos, os nutrientes começam a ser liberados no solo e tornam-se disponíveis para a cultura sucessora (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006).

As formas de Po são muito importantes para a mineralização e a dinâmica da disponibilidade das formas Pi (CROSS e SCHLESINGER, 1995; GATIBONI et al., 2005; TIECHER, 2012a). O Po no solo é encontrado em diversas formas, como nos fosfatos de inositol (10-80% do Po total), os fosfolípidos (0,5-7%), os ácidos nucleicos (3%) e outros ésteres-fosfato (> 5%), (DALAL, 1977; MARTINAZZO et al., 2007). A labilidade do Po está diretamente relacionada à suscetibilidade da quebra de ligação entre o radical orgânico no qual o fosfato está ligado. Compostos que possuem alta carga residual, como os fosfatos monoésteres, são fortemente adsorvidos aos colóides inorgânicos. Essas ligações podem formar compostos organometálicos com os óxidos resultando em complexos de alta recalcitrância e de difícil acesso às plantas e aos micro-organismos (STEWART e TIESSEN, 1987; SPOSITO, 1989; RHEINHEIMER et al. 2002). Essas características diminuem a adsorção específica de P. No entanto, os fosfatos diésteres são bastante suscetíveis ao ataque microbiano (GATIBONI et al., 2008).

Os ácidos orgânicos (AO), oriundos da decomposição da MOS ou da exsudação radicular, são solúveis e apresentam-se em grande parte como ânions nos pHs usuais do solo. Esses AO competem com o fosfato pelos sítios de adsorção e podem manter o nutriente em solução ou adsorvido a sítios com menor afinidade pelo fosfato e, portanto, mais acessível às plantas. As reações de dissolução e de complexação entre os metais presentes na superfície dos colóides do solo e os AO reduzem o número de sítios ativos, liberando mais P para a solução (Figura 1). O efeito negativo que a MOS pode causar à disponibilidade de P no solo ocorre quando há formação de pontes de ligações metálicas do tipo matriz-AO-M, o que aumenta os sítios de adsorção de P,

diminuído a disponibilidade desse nutriente (ANDRADE et al., 2003; GUPPY et al., 2005).

**Figura 1.** Competição entre ácidos orgânicos (AO) e fósforo (P) pelos sítios de adsorção nos colóides do solo (GUPPY et al., 2005)



## 2.2. MANEJO DO SOLO E ROTAÇÃO DE CULTURAS AFETAM A DISTRIBUIÇÃO DAS FORMAS DE FÓSFORO

Os processos de adsorção – dessorção do  $P_i$  e de mineralização - imobilização do  $P_o$  são afetados por diversos fatores, tais como mudança do manejo, diferentes doses e fontes de fosfato aplicados, taxa exportada pela colheita, diferentes plantas de cobertura e diferentes tipos de solos (RHEINHEIMER, 2000; CONTE et al., 2002; MARTINAZZO et al., 2007; TIECHER, 2011; OLIVEIRA et al., 2011, CASALI, 2012; COSTA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2014).

A conversão de sistemas naturais como as matas e os campos nativos em áreas cultivadas altera profundamente a dinâmica do P no solo. Nos sistemas naturais há maior equilíbrio entre a ciclagem do P e a absorção pelas plantas, o que pode regular inclusive a produtividade, mantendo-a equilibrada sem a adição de fertilizantes fosfatados (MARTINAZZO et al., 2007). Oliveira (2012) observou que a adição de fertilizantes fosfatados em sistemas com pastagem naturais e com baixo teor de P alterou a dinâmica do P no solo: os processos de adsorção – dessorção tornaram-se mais importantes do que a mineralização – imobilização das frações orgânicas.

No Sul do Brasil, a transformação dos biomas naturais, em especial a Mata Atlântica e a Floresta Ombrófila Mista, em lavouras sob sistema de cultivo convencional (SCC) não foi acompanhada por nenhuma preocupação com a conservação do solo e da água pelos agricultores. Os solos estavam sendo constantemente erodidos, perdendo sua camada fértil, mudando suas características químicas, físicas e biológicas e os rios, sendo assoreados (CALEGARI, 2007; CALEGARI et al, 2008; CARDOSO et al., 2013). Além disso, o revolvimento do solo aumentava as deficiências de P, uma vez que o íon ortofosfato consegue se adsorver aos colóides inorgânicos com maior facilidade devido à exposição dos novos sítios ativos, tornando-se cada vez menos disponível para as culturas (FRAGA e SALCEDO, 2004). Nesse sistema, potencializa-se o contato dos resíduos das culturas e da BMS, provocando aumento na mineralização do Po (LISBOA et al., 2012).

Somente depois de décadas de manejo totalmente inadequado e das suas consequências catastróficas, é que as instituições de pesquisas, os agricultores e suas associações e os órgãos que subsidiavam as atividades agrícolas começaram a se preocupar com práticas conservacionistas. Mesmo com todos os problemas ainda persistentes no SPD, a adição de fertilizantes realizada na linha de semeadura, minimizando o revolvimento do solo e mantendo os resíduos vegetais sobre a superfície, trouxeram ganhos significativos na manutenção do P no solo em formas mais biodisponíveis. Tais mudanças fizeram com que P fosse saturado paulatinamente nos sítios de adsorção, concentrando-se no local da semeadura. Consequentemente, frações são retidas com menor energia de ligação e a dessortividade do P para a solução do solo é maior, mantendo os teores e a disponibilidade às plantas (RHEINHEIMER et al., 2000; RHEINHEIMER e

ANGHINONI, 2001; RHEINHEIMER et al., 2008a; CONTE et al., 2003; GATIBONI et al., 2007; ZAMUNER et al., 2008).

O manejo de diferentes espécies de plantas em consórcio e/ou solteiras também altera a dinâmica do P no solo, podendo ser uma das alternativas para a minimizar ou reverter o processo de empobrecimento do solo (HORST et al, 2001). Entre as espécies mais difundidas no Brasil, têm-se as Poaceae: o azévem (*Lolium multiflorum* L.), aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), centeio (*Secale cereale* L.), trigo (*Triticumaestivum* L.), as Fabaceae: ervilhaca comum (*Vicia sativa* L.), ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth), e Brassicaceae como o nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L). As gramíneas são principalmente utilizadas quando o objetivo é manter a cobertura do solo por maiores períodos, visto que os resíduos culturais são lentamente mineralizados em relação aos das leguminosas, e esses são utilizados quando prevê-se sua incorporação no solo (AMBROSANO et al., 2014). Em suma, os resíduos vegetais apresentam uma variação na sua composição, tanto quantitativa como qualitativamente.

As raízes das plantas absorvem o P da solução quase que exclusivamente por difusão (aproximadamente 93%) e o íon ortofosfato apresenta baixa mobilidade em água, o coeficiente de difusão é  $8,9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  a 25 °C (BARBER, 1995). Assim, as principais estratégias usadas pelas plantas para melhor se nutrirem de fosfato em solos com baixa disponibilidade são: o aumento da relação entre a raiz e a parte aérea, aumentando a taxa de absorção por unidade de raiz; o aumento dos pelos radiculares em quantidade, forma ou espessura para ter um maior volume de solo explorado; a exsudação radicular de fosfatases e compostos orgânicos; a associação com outros micro-organismos, em especial, com os fungos micorrízicos, onde as hifas são responsáveis por ampliar a área radicular ou conseguir provocar a quebra de compostos orgânicos, e conseqüentemente provocar a liberação do fosfato. Além disso, as plantas podem sincronizar suas taxas de crescimento e de translocação do P em função da sua disponibilidade no solo, bem como aumentar a longevidade das folhas. Essas habilidades variam com a espécie vegetal, as características do solo e o ambiente em que a planta está inserida. (LONERAGAM e ASHER, 1966; LAJTHA e HARRISON, 1995; HORST et al., 2001; BAYON et al., 2006; WANG et al., 2008; RICHARDSON et al., 2009ab; KUNZE et al., 2011).

A quantidade de P que é absorvido, e a forma em que ele é acumulado no tecido vegetal devem ser consideradas, pois quando esse resíduo vegetal for adicionado ao solo isso pode interferir nas frações de P. A velocidade de liberação desse nutriente dos resíduos culturais durante sua decomposição também depende da localização e da forma em que esses nutrientes se encontram no tecido (GIACOMINI et al., 2003). Trabalho realizado com  $^{32}\text{P}$  mostrou que as plantas de cobertura utilizadas como adubação verde (aveia preta, milho, nabo forrageiro e crotalária) sofreram processo desmineralização, servindo como fontes de P para a cultura subsequente (MARSOLA, 2008).

O uso e o manejo do solo alteram a qualidade física, química e biológica do solo. A adoção de manejo conservacionista diminui os danos causados pelo impacto da gota da chuva, atenua as oscilações térmicas do solo das camadas superficiais, protegendo a biota e diminuindo a evaporação. As melhorias nas propriedades físicas do solo se refletem na mineralização e imobilização dos compostos orgânicos e, conseqüentemente, na liberação dos nutrientes. As plantas aportam inúmeros benefícios ao solo e o solo beneficia o crescimento das plantas e dos micro-organismos. Porém, são necessários vários anos para que esses efeitos sejam consolidados, em especial, ao longo do perfil do solo (AMABILE e CARVALHO, 2006; CALEGARI, 2008; CALEGARI, 2014; CARVALHO et al., 2014). Existe também o efeito do estágio de desenvolvimento da planta na BMS, denominado de sincronismo, que é evidenciado quando é observado durante um período curto de amostragem.

### **3.HIPÓTESE**

Os mecanismos de transformações do fósforo no solo envolvem processos químicos (adsorção – dessorção) e biológicos (mineralização – imobilização), mediados pelos organismos. Sendo assim, as transformações do fósforo representam um sistema complexo, controlado por reações químicas e interferências microbiológicas. A adição contínua e prolongada de resíduos vegetais sobre a superfície do solo manejado sob o sistema plantio direto, principalmente quando utilizadas plantas de cobertura hibernais em sucessão às culturas comerciais, altera profundamente a magnitude desses dois processos, comparativamente ao uso do sistema de cultivo convencional. Dessa forma, espécies de plantas que deixam maior quantidade de resíduos na superfície do solo e espécies que apresentam sistema radicular mais agressivo e com capacidade de crescer em profundidade em sistema plantio direto proporcionam maior acúmulo de fósforo na biomassa microbiana e ao mesmo tempo possibilitam maior ocupação dos sítios dos grupos funcionais dos colóides inorgânicos pelos compostos orgânicos, inclusive pelo fósforo orgânico, diminuindo a energia de adsorção do fosfato adicionado via fertilizantes. Isso aumenta sensivelmente a quantidade de fósforo inorgânico passível de ser dessorvido das partículas coloidais inorgânicas do solo, tornando-se disponível às plantas e à biota do solo.

A quantidade de fósforo armazenado na biomassa microbiana do solo varia a curto prazo, em decorrência do estágio de desenvolvimento da planta e da deposição dos resíduos na superfície do solo.



## 4.OBJETIVOS

### 4.1 GERAL

Avaliar as alterações nas frações de fósforo do solo, em especial aquele armazenado na biomassa microbiana, provocadas pelo uso contínuo e por longo prazo, de diferentes tipos de plantas de coberturas hibernais, associadas ao sistema plantio direto e sistema de cultivo convencional num Latossolo Vermelho aluminoférrico muito argiloso.

### 4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a quantidade de fósforo estocado pela biomassa microbiana do solo quando este é submetido a diferentes sistemas de preparo de solo e cultivado com diferentes espécies de plantas durante o inverno, em experimento de longa duração (três décadas).
- Monitorar as flutuações nas quantidades de fósforo armazenado na biomassa microbiana do solo em curto prazo (um ano).
- Avaliar a capacidade do solo em disponibilizar o fosfato adicionado via fertilizante (biodisponibilidade), bem como a distribuição das formas de fósforo inorgânico e orgânico no solo quando este é cultivado por um longo período com diferentes sistemas de manejo do solo e rotação de culturas.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1. DESCRIÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL EM ESTUDO

O presente estudo foi desenvolvido na área experimental da Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR, no município de Pato Branco, região fisiográfica denominada Terceiro Planalto Paranaense (52° 41' W e 26° 07' S - Figura 2 e 3).

O solo foi formado a partir de derramamento basáltico e é classificado como Latossolo Vermelho Aluminoférrico muito argiloso (EMBRAPA, 2006 - Tabela 1). Segundo a classificação de Koppen, o clima da região é subtropical úmido, Cfb, com precipitação média anual de 1.200 a 1.500 mm. O relevo é suave ondulado com declividade entre 4 a 7%. O clima é caracterizado por verão fresco, com média do mês mais quente de 22 °C e a do mês mais frio de 18 °C, sem estação seca definida (CALEGARI, 2006).

**Tabela 1.** Textura e composição mineralógica do Latossolo Vermelho Aluminoférrico utilizado no experimento.

Horizonte	Textura			Mineralogia <sup>1</sup>							Oxalato <sup>2</sup>	
	Argila	Silte	Areia	1:1 <sup>3</sup>	2:1 <sup>4</sup>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Magnetita	Hematita	Goethita	Gibbsita	Fe	Al
	----- g kg <sup>-1</sup> -----											
A (0–1 m)	703	150	150	680	132	140	130	510	360	50	55	22
Bw (1–2 m)	-	-	-	710	128	140	120	540	340	20	-	-

<sup>1</sup>Costa (1996); <sup>2</sup>Solo da camada 0-40cm; <sup>3</sup>Caulinita e Halloisita; <sup>4</sup>Vermiculita e/ou Montmorillonita.

**Figura 1.** Localização do experimento na Estação Experimental do Insituto Agrônômico do Paraná - IAPAR, na região Sudoeste do Paraná.



**Figura 2.** Visão geral da localização do experimento instalado na Estação Experimental do Insituto Agrônômico do Paraná - IAPAR, região Sudoeste do Paraná. Fonte: Google Earth.



No ano de 1976 a Floresta Ombrófila Mista da área em estudo foi derrubada para a implantação de cultivos de milho (*Zeamays* L.) e feijão (*Phaseolusvulgaris* L.) no verão. Ambas as espécies foram cultivadas durante 10 anos sob SCC, sendo que o solo era preparado com uma aração e duas gradagens leves, sempre antes de cada cultivo.

A partir do inverno de 1986, instalou-se o experimento com o delineamento experimental em blocos ao acaso, em sistema fatorial de parcelas subdivididas, com três repetições. As espécies de coberturas hibernais alocadas nas parcelas principais (20 m x 12 m) e os sistemas de preparo do solo nas sub-parcelas (20 m x 6 m). As 36 parcelas principais do experimento consistem em: aveia preta (*Avena strigosa*Schreb), azevém (*Loliummultiflorum* L.), centeio (*Secalecereale* L.), ervilhaca comum (*Vica sativa* L.), ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth), nabo forrageiro IPR116 (*Raphanussativus* L.), tremoço azul (*Lupinusangustifolius* L.), trigo (*Triticumaestivum* L.), ervilhaca peluda + aveia preta IPR61, tremoço azul + aveia preta IPR61, pousio<sup>2</sup> e pousio limpo. As sub-parcelas correspondem aos dois sistemas de manejo do solo: SPD e SCC. Nas sub-parcelas sob o SCC o solo foi preparado antes de cada plantio das espécies de inverno e de verão, através de uma aração e duas gradagens.

As plantas de cobertura de inverno foram implantadas em 18 dos 35 cultivos realizados (Tabela 2), tendo sido controladas no estágio de pleno florescimento através de rolo-faca, exceto no pousio, o qual recebeu aplicações de herbicidas. As parcelas com trigo foram colhidas até 1995 (sete cultivos) e os resíduos, deixados na superfície do solo. Nos outros anos, o trigo foi manejado como as demais plantas de cobertura. No verão toda a área foi cultivada com soja (*Glycinemax* L.) ou milho (Tabela 2).

---

<sup>2</sup> Período de interrupção temporária de atividades ou usos agrícolas, pecuários ou silviculturais para possibilitar a recuperação da capacidade de uso ou da estrutura física do solo, deixando sob a vegetação espontânea (IAP)

**Tabela 2.** Culturas estabelecidas sob Sistema de plantio direto e Sistema de cultivo convencional e aplicação de calcário, no decorrer de 30 anos na área experimental sob um Latossolo Vermelho Aluminoférrico situado na região Sudoeste do Paraná (Adaptado de Calegari, 2006;

Ano	Espécies de inverno	Culturas de verão	Calcário (aplicação)**
1986	*Todas as espécies	Milho	-
1987	*Todas as espécies	Milho	-
1988	*Todas as espécies	Milho	-
1989	*Todas as espécies	Soja	1000 kg ha <sup>-1</sup>
1990	*Todas as espécies	Soja	-
1991	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja	-
1992	*Todas as espécies	Milho	2000kg ha <sup>-1</sup>
1993	Pousio em todas as parcelas	Soja	-
1994	*Todas as espécies	Milho	-
1995	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja	3000 kg ha <sup>-1</sup>
1996	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Milho	-
1997	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja	-
1998	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja	-
1999	*Todas as espécies	Milho	1500kg ha <sup>-1</sup>
2000	*Todas as espécies	Soja	-
2001	*Todas as espécies	Soja	2000 kg ha <sup>-1</sup>
2002	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja	-
2003	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Milho	-
2004	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja	-
2005	*Todas as espécies	Soja	-
2006	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	-----	2000 kg ha <sup>-1</sup>
2007	*Todas as espécies	Soja	-
2008	*Todas as espécies	Milho	-
2009	Aveia preta + nabo em todas parcelas (exceto pousio)	Soja	2000 kg ha <sup>-1</sup>
2010	Aveia preta + Ervilhaca peluda em todas as parcelas (exceto pousio)	Milho	-
2011	Todas espécies de inverno	Milho	2000 kg ha <sup>-1</sup>
2012	Todas espécies de inverno	Milho	-
2013	Todas espécies de inverno	Soja	-
2014	Todas espécies de inverno	Milho	-
2015	Todas espécies de inverno	Soja	2000 kg ha <sup>-1</sup>
2016	Todas espécies de inverno		

\* tremço azul, nabo forrageiro, aveia preta, ervilhaca comum e trigo.

\*\* Superficial no sistema de plantio direto e incorporado no sistema de cultivo convencional

(Dados IAPAR – Pato Branco)

As quantidades de corretivos da acidez do solo e dos nutrientes N, P e K foram definidas de acordo com as recomendações técnicas usadas pelo IAPAR (IAPAR, 2003). As aplicações dos fertilizantes foram feitas sempre no período do verão com as mesmas quantidades em todos os tratamentos.

A produção de fitomassa seca da parte aérea das plantas de cobertura hiberna foram monitoradas durante os 29 anos de instalação do experimento, mantendo o histórico da área, conforme a Tabela 3.

**Tabela 3.** Produção de fitomassa seca da parte aérea das plantas cultivadas durante 29 anos, sob sistema de plantio direto (SPD) e sistema de cultivo convencional (SCC)

Produção de fitomassa seca da parte aérea (Mg ha <sup>-1</sup> )								
Tratamento de inverno	Planta de cobertura de inverno		Resíduos das culturas de verão		Total		Média Anual	
	SPD	SCC	SPD	SCC	SPD	SCC	SPD	SCC
Centeio	111,3	100,7	116	111	229,3	211,7	8,8	8,1
Ervilhaca Comum	110,3	99,6	121,3	112	231,6	211,6	8,9	8,1
Nabo Forrageiro	105,4	86,9	120,7	117,4	226,1	204,3	8,7	7,8
Trigo	99,5	88,4	110	104,8	209,5	193,2	8	7,4
Pousio	46,8	36,1	112,9	109,8	159,7	145,9	6,1	5,6

## 5.2. MANEJO DA ÁREA EXPERIMENTAL NAS SAFRAS 2014 - 2016

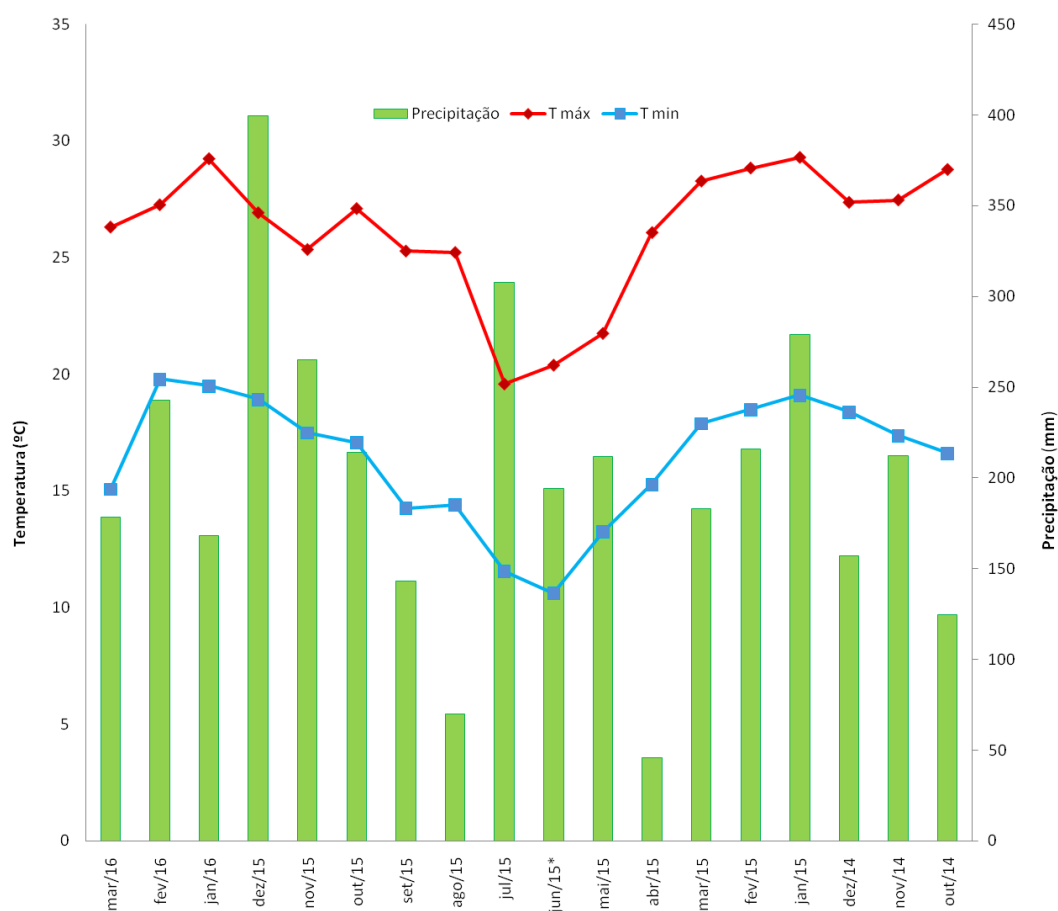
Os cultivos e épocas avaliados pelo presente trabalho de Dissertação foram os seguintes: milho (safra 2014/2015), plantas hibernais (2015) e soja (safra 2015/2016).

O milho DEKALB 240 VT PRO3 foi plantado no dia 08 de outubro de 2014, num espaçamento 0,8 m, com densidade de 6 sementes/m linear, juntamente com a adubação de 300 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 04-30-10. Durante o seu crescimento, foram feitas aplicação de cloreto de potássio (100 kg ha<sup>-1</sup>) e dos herbicidas: atrazina, gramocil, glifosato. Aplicou-se também o produto comercial Penergetic® P e K em todas as parcelas analisadas, conforme indicação do fornecedor. A área da mata também recebeu a aplicação do produto Penergetic® P e K no mesmo período que as parcelas.

No início do mês de maio ocorreu o plantio das plantas de cobertura hibernais do solo. Novamente aplicou-se o produto comercial Penergetic® P e K em todas as parcelas conforme indicação do fornecedor. Na época do pleno florescimento das plantas de cobertura passou-se o rolo faca nas parcelas e, posteriormente, foi feita a aplicação de glifosato para obter-se a dessecação total da área.

No dia 24 de novembro de 2016 ocorreu o plantio da soja (Syngenta PR PRO2) safra 2015/2016 num espaçamento de 0,45m com 13 sementes/mlinear junto com a adubação de base (200 kg ha<sup>-1</sup>) do formulado 0-20-20. Foi aplicado calcário dolomítico após 15 dias da germinação da soja, com uma dosagem de 2000 kg ha<sup>-1</sup>. Durante o desenvolvimento da cultura também foram realizadas aplicações do herbicida glifosato, além de fungicidas e inseticidas para controle de pragas. Aplicou-se o produto comercial conforme indicação do fornecedor em todas as parcelas.

Durante o período experimental foram coletados dados de temperatura e precipitação por meio de estação meteorológica instalada ao lado da área experimental em estudo (Figura 4).



**Figura 3.** Precipitação total (mm) e médias da temperatura máxima e mínima (°C) mensal no período de outubro 2015 a março 2016 em Pato Branco - PR.

\*Média dos últimos 30 anos

Fonte: Estação Meteorológica do IAPAR

### 5.3. COLETA DO SOLO

Para o presente estudo foram coletadas amostras de solo somente nas parcelas contendo azevém, centeio, ervilhaca comum, nabo forrageiro, trigo, consórcio de ervilhaca peluda com aveia preta e pousio. O solo foi coletado em três épocas: após o ciclo da cultura do milho (março de 2015), no florescimento das espécies hibernais (setembro 2015) e na floração da soja (fevereiro de 2016).



A amostragem de solo foi realizada através da abertura de trincheiras e pá de corte, coletando-se a camada de 0 a 0,10 m sempre no mesmo local em cada parcela tendo como base os marcos de identificação e a utilização de trenas. Coletou-se três amostras em cada sub-parcela totalizando 6 nas parcelas principais. Também se coletou amostras de solo sob mata nativa em área contígua à área experimental.

Após a coleta, o solo foi acondicionado em caixas de isopor à temperatura de 4°C e transportado para o Laboratório de Química e Fertilidade do Solo (LQFS) do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

#### 5. 4. ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICAS

O solo coletado (ainda com a umidade de campo) foi tamisado em malha 185  $\mu\text{m}$ . O P armazenado na biomassa microbiana foi estimado pelo método de fumigação-extração adaptado (HEDLEY e STEWART, 1982; BROOKES et al., 1982; MOREL et al., 1996). O solo foi pesado em 4 conjuntos de tubos falcons: no primeiro conjunto (PA) recebeu o tratamento de fumigação em superfície saturada de clorofórmio em estufa a vácuo à temperatura de 25°C; o segundo (PB) não recebeu tratamento algum, para poder obter-se a comparação entre o fumigado e o não fumigado; ao terceiro conjunto (PC) foi adicionada solução de 50 mg l<sup>-1</sup> de P, junto com o extrator para a determinação da capacidade de adsorção de P pelo solo; o último conjunto foi utilizado para a determinação da umidade do solo, permanecendo em estufa para a secagem. A extração dos três conjuntos foi através do NaHCO<sub>3</sub> 0,5M a pH 8,5. Após a extração, as amostras foram centrifugadas 2500 g por 15 minutos e filtradas em filtros qualitativos para a remoção de partículas de matéria orgânica. Do extrato filtrado foi retirada uma alíquota de 3 ml e colocada em tubos de digestão aos quais se adicionou posteriormente 5 ml da solução de persulfato de amônio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) 7% (m/v) e 0,5 ml de solução de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 1:1(v/v). Os tubos foram tampados com papel alumínio e submetidos a digestão na autoclave durante 2 horas, a 1 atm, segundo a metodologia USEPA

(1971). A determinação da concentração de P presente em cada conjunto de amostra de solo foi realizada segundo Murphy e Riley (1977).

O conteúdo de P armazenado na BMS foi estimado através da equação (1):

$$P \text{ armazenado na BMS} = \frac{50(PA - PB)}{0,40(PC - PB)} \quad (1)$$

Onde o fator  $50/(PC - PB)$  representa o ajuste da capacidade de adsorção do solo, visto que foi adicionado  $50 \text{ mg l}^{-1}$  de padrão de P (MOREL et al., 1996). Já o fator 0,4 é usado porque se assume que apenas 40% do P microbiano é liberado como  $P_i$  pelo  $\text{CHCl}_3$  (BROOKES et al., 1982). Os resultados foram expressos em relação ao solo seco.

Para as demais análises de extração de P, o solo coletado foi seco em estufa a  $40^\circ\text{C}$ , moído com auxílio de um rolo e tamisado em malha de 2mm. Determinaram-se as quantidades de P extraídas pelo método de Mehlich1 (MEHLICH, 1953) e pela resina de troca aniônica - RTA (placas AR 103 QDP 434 - GATIBONI, 2003). O P presente nos extratos foi determinado pela metodologia descrita por Murphy e Riley (1977).

O teor de P extraído por  $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$  ( $P_i$  e  $P_o$ ) foi obtido através do contato entre o extrator e 0,5 g de solo durante 16 horas em agitador tipo 'sem fim' (33 rpm), com posterior centrifugação a 3000 g por 15 minutos. O P total ( $\text{NaOH}$ ) foi estimado através da digestão de 3 ml de cada extrato em autoclave como já descrito (USEPA, 1971). A determinação da concentração de P foi feita conforme a metodologia de Murphy e Riley (1962). O  $P_i$  ( $\text{NaOH}$ ) desses extratos foi determinado pelo método de Dick e Tabatabai (1977), sendo o  $P_o$  ( $\text{NaOH}$ ) obtido pela diferença entre P total digerido e o  $P_i$  ( $\text{NaOH}$ ).

O P total foi estimado pela metodologia proposta por Olsen e Sommers (1982), através da digestão do solo em bloco com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), na presença de cloreto de magnésio saturado ( $\text{MgCl}_2(\text{sat})$ ). A estimativa do teor de  $P_o$  total no solo coletado foi feita calculando-se a diferença entre o P extraído da amostra ignificada a  $550^\circ\text{C}$  por duas horas e da não ignificada. Em

ambas foi utilizado como extrator  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $0,25 \text{ mol l}^{-1}$  (OLSEN e SOMMERS, 1982). Já o Pi total foi determinado pela diferença entre o Po e o P total.

Na coleta pós colheita do milho foram analisados os teores de N total do solo, obtidos por meio de digestão, segundo a metodologia de TEDESCO (1995). O carbono orgânico total (COT) foi determinado através do método de Mebius no bloco (YEOMANS e BREMNER, 1988; adaptado por RHEINHEIMER et al., 2008b). As concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis foram extraídos com  $\text{KCl}$   $1 \text{ mol l}^{-1}$  e determinadas por absorção atômica (TEDESCO, 1995). O  $\text{K}^+$  trocável foi extraído por solução Mehlich1 e determinado por fotometria de chama, conforme Tedesco (1995). O teor de  $\text{Al}^{3+}$  trocável foi extraído com solução de  $\text{KCl}$   $1 \text{ mol l}^{-1}$  e determinado por titulação com  $\text{NaOH}$  (TEDESCO, 1995). Os valores de pH em água (relação 1:1) e, posteriormente, a estimativa da acidez potencial pelo TSM (Tampão Santa Maria -TOLEDO et al., 2012) foram realizados para as três coletas do presente estudo (apêndice 3). Para a determinação do H+Al utilizou-se a seguinte equação (2):

$$\text{H} + \text{Al} (\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = \frac{e^{(10,665-1,1483\text{TSM})}}{10} \quad (2)$$

A superfície específica do solo foi determinada pela técnica de isoterma de BET, usando equipamento Quantachrome, modelo NOVA 3200E.

## 5.5. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

O modelo estatístico adotado foi um trifatorial, onde os sistemas de preparo do solo foram as parcelas principais, a época coletada, as subparcelas e as culturas de inverno, as subsub-parcelas. 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. Foi desconsiderado o teste F. Os valores para P

microbiano e P Mehlich não seguem uma distribuição normal e foram apresentados em escala. As relações de causa-efeito entre as formas de P analisadas foram avaliadas pelo coeficiente de correlação de Pearson a 5% de probabilidade de erro.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO SOLO APÓS 29 ANOS DE EXPERIMENTO

Na coleta pós colheita do milho, 29 anos de SPD e 39 anos de SCC, as médias dos valores de nitrogênio total ( $N_t$ ) e COT do solo foram superiores nas amostras da mata ( $N_t$ : 0,29% - COT: 3,60%) e naquelas sob SPD ( $N_t$ : 0,29% - COT: 3,55%), quando comparadas com a média desses dois elementos nos solos sob SCC, respectivamente ( $N_t$ : 0,20% - COT: 2,70% - Tabela 4).

Esses dados são similares aos encontrados por Gubiani (2015) nos solos coletados entre 0 a 0,10 m na mesma área experimental aos 26 anos de cultivo (Mata  $N_t$ : 0,47% - COT: 5,01%, SPD  $N_t$ : 0,26% - COT: 3,26% e SCC  $N_t$ : 0,19% - COT: 2,60% - Tabela 4). Os valores de N e COT obtidos nos solos da mata foram inferiores aos encontrados por Gubiani (2015). No entanto, a tendência de melhoria do solo sob SPD permanece em ambos os trabalhos. Assim, a adoção do SPD está recuperando o estoque original de N e C dos solos. A maior quantidade de COT encontrado nos solos de SPD, em relação SCC, na camada de 0 a 0,10 m, está relacionada com o acúmulo de resíduos culturais sobre a superfície durante o longo período do experimento.

Os teores de  $K^+$  disponível obtidos na camada 0 a 0,1 m nos sistemas convencional ( $0,32 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e direto ( $0,32 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) foram 2,6 vezes maiores que a média encontrada no solo da mata ( $0,12 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  - Tabela 4), mas entre os manejos não houve diferença significativa.

Os teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  no solo sob SPD ( $15,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e  $4,85 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente) foram superiores àqueles no solo sob SCC ( $9,95 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e  $3,55 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente) e no solo coletado na mata ( $5,70 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e  $2,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  - Tabela 4). Esses valores são atribuídos à fertilização e à correção da acidez, através da aplicação de calcário na camada superficial do solo. Essa prática agrícola resulta na maior concentração de cálcio e magnésio na camada entre 0 a

0,1 m, o que leva a maiores teores de CTC (capacidade de troca de cátion) efetiva,  $CTC_{pH7}$ , saturação de bases (S) e saturação da  $CTC_{pH7}$  por bases (V%) no SPD em relação ao SCC e à mata (Tabela 4).

A média do teor de  $Al^{3+}$  obtido nos solos amostrados sob SPD ( $0,35 \text{ cmol}_c\text{cm}^{-3}$ ) foi superior em 1,57 vezes à média encontrada no SCC ( $0,55 \text{ cmol}_c\text{cm}^{-3}$  - Tabela 4). Além disso, a aplicação de calcário em superfície no sistema plantio direto (sem incorporação) junto ao maior acúmulo da matéria orgânica aumenta a quantidade de sítios de adsorção de cátions no solo, formando complexos organometálicos, diminuindo a disponibilidade do  $Al^{3+}$  (ALLEONI et al, 2010). A correção da acidez do solo, que está sendo realizada desde o ano de 1989, mantém as concentrações de  $Al^{3+}$  baixas, propiciando um ambiente em que o desenvolvimento radicular pode ocorrer sem restrições (GONZATTO, 2014). Os valores de pH foram maiores no SPD (5,21) que no SCC (5,04). Os valores de H+Al no solo não apresentaram diferenças entre os sistemas de manejo, mas ambos foram inferiores ao valor análogo da mata, devido às aplicações de calcário que foram realizadas durante todo o período do experimento (FREIRIA et al., 2008).

**Tabela 4.** Caracterização químico-física de amostras de solo coletadas na camada de 0-10 cm de um Latossolo Vermelho cultivado sob sistema de plantio direto (SPD) e sistema de cultivo convencional (SCC) por 29 anos (Pato Branco-PR/2015)

	N	COT	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al	CTC <sub>e</sub>	CTC <sub>pH7</sub>	S	V%	ASE	pH
	----- %	-----	mg kg <sup>-1</sup>	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----							m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>		
SCC	0,20b	2,70b	90,9a	9,95b	3,55b	0,55b	9,38a	14,28b	23,45b	13,73b	58,6b	44,0a	5,0b
SPD	0,29a	3,55a	110,9a	15,7a	4,85a	0,35a	9,72a	21,18a	30,21a	20,83a	69,0a	42,0a	5,2a
Mata*	0,29	3,60	50,4	5,70	5,40	0,90	14,57	12,13	25,79	11,23	25,8	44,3	4,5

<sup>3</sup> Os valores de mata nativa não foram utilizados na estatística. Letras maiúsculas iguais não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% para o tratamento de manejo. COT: Carbono Orgânico Total; ASE: Área Superficial Específica; CTC<sub>e</sub>: CTC<sub>efetiva</sub>

A média da área superficial específica (ASE) apresentou valores muito próximos entre a mata e os dois manejos de solos (Mata:  $44 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  – SPD:  $42 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  – SPP:  $44 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  – Tabela 4). Sabe-se que a ASE é influenciada principalmente

pelas argilas constituintes do solo e pela presença de matéria orgânica no solo (NETO et al., 2004). Considerando que o solo da área é uniforme (Latosolo Vermelho), as variações da ASE seriam resultado da presença da matéria orgânica diferenciada nos diferentes manejos. No entanto, mesmo com valores de COT inferiores no SCC, os valores de ASE não apresentaram diferença significativa entre os sistemas de manejos.

## 6.2 FÓSFORO PRONTAMENTE DISPONÍVEL

Antes da instalação do experimento, a concentração de P disponível no solo da mata mantinha-se equilibrada, devido à decomposição da serrapilheira da mata (Mehlich 1: 3,93 mg kg<sup>-1</sup> - RTA: 5,7 mg kg<sup>-1</sup>). Quando a área experimental começou a ser cultivada, houve decréscimo da entrada de resíduos orgânicos no solo, favorecendo as interações do P com os colóides do solo, resultando em maior adsorção e indisponibilidade do nutriente. Para reverter esse efeito, fontes de P são adicionadas via fertilizantes em doses maiores do que a capacidade de dreno do solo. Considerando a média de todas as parcelas de cultivo (Tabela 5), após 30 anos da instalação do experimento, observa-se um aumento significativo do P disponível no solo cultivado (Mehlich 1: 9,63 mg kg<sup>-1</sup> e RTA: 12,06 mg kg<sup>-1</sup>), em relação ao solo da mata. Essa alteração está relacionada com a aplicação anual de fertilizantes, os quais atuam como fonte de ortofosfato para a solução do solo, de forma que o nutriente possa ser absorvido pelas plantas. O P que não é exportado pela colheita fica nas frações deste elemento no solo.

O teor de P disponível estimado pelo Mehlich 1 e pela RTA foi maior no SPD (Mehlich 1: 13,86 mg kg<sup>-1</sup> -RTA: 18,00 mg kg<sup>-1</sup>) do que no SCC (Mehlich 1: 5,0 mg kg<sup>-1</sup> - RTA: 7,9 mg kg<sup>-1</sup> – Tabela 5). O revolvimento do solo no SCC expõe novos sítios de adsorção de P, aumentando a energia de ligação entre eles e, conseqüentemente, diminuindo a disponibilidade para as plantas. O SCC também distribui o P em profundidade, resultando em teores inferiores de Pi na camada superficial (0-0,1 m) em relação ao SPD. O P do solo pode ser erodido quando acumulado na superfície do solo, porém em quantidades menos significativas (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001). No SPD, o não revolvimento do solo e a

manutenção da palhada em superfície permitem o acúmulo dos fertilizantes fosfatados aplicados nas camadas superficiais (RHEINHEIMER, 2000). Com isso, ocorre a saturação dos sítios mais ávidos por P e o nutriente remanescente é redistribuído em outras frações em que é retido com menor energia e, por isso, resulta em maior capacidade de dessorção, aumentando a sua disponibilidade (BARROW et al., 1998; RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001). Há um outro fator que deve ser considerado: no SPD ocorre um aumento de COT na superfície e conseqüentemente há maiores concentrações de ácidos orgânicos de baixo peso molecular oriundos da decomposição da MOS. Esses AO podem competir com sítios ativos dos colóides inorgânicos do solo, diminuindo a adsorção de P (JONES, 1998).

Pelo Manual de adubação e calagem (CQFS-RS/SC 2016), a média do valor de P extraído no SCC é classificada como baixa para cultivos de grãos e pastagens, visto que o solo é classe 1 (>60% de argila). Em relação ao SPD, o valor passa a ser classificado como muito alto. Assim, podemos reafirmar que no SPD a quantidade de P disponível é maior do que no SCC.

O teor de P disponível não apresentou diferença entre as épocas de avaliação de desenvolvimento das culturas (pós colheita milho: 9,45 mg kg<sup>-1</sup> Mehlich 1 - 12,81 mg kg<sup>-1</sup> RTA; florescimento das plantas hibernais: 9,63mg kg<sup>-1</sup> Mehlich 1 - 12,57 mg kg<sup>-1</sup> RTA; florescimento da soja: 9,15 mg kg<sup>-1</sup> Mehlich 1 - 13,41 mg kg<sup>-1</sup> RTA), conforme mostra a Figura 5. Após o plantio da soja todas as parcelas foram calcareadas, visando a correção da acidez do solo cultivado. No entanto, os valores de pH das parcelas não sofreram alterações significativas (Apêndice 1) resultando na manutenção das concentrações do P disponível.

Os valores de P extraídos por RTA no solo variaram significativamente considerando a interação entre o sistema de preparo e as plantas de cobertura. Os valores de Mehlich 1 não apresentaram nenhuma interação estatística entre sistema de cultivo, época de coleta e plantas de cobertura do solo.

O cultivo de centeio no inverno resultou em maior teor de P disponível pelo método de Mehlich 1 (10,76 mg kg<sup>-1</sup>) em todas as coletas, comparado às demais rotações de culturas (Tabela 5). Isso pode ser devido à alta concentração de P na



forma inorgânica no tecido dessa planta, associada com sua rápida taxa de liberação (CASALI et al., 2011)

**Tabela 5.** Fósforo prontamente disponível extraído por Mehlich 1 e por resina trocadora de ânion (RTA). Fósforo armazenado na biomassa microbiana (P microbiano) (mg kg<sup>-1</sup>) no solo na camada de 0,10 m num Latossolo Vermelho do estado do Paraná, cultivado sob Sistema de cultivo convencional (SCC) e sistema de plantio direto (SPD) por longo período

	EXTRATORES	
	Mehlich 1	RTA
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----	
<b>MANEJO</b>		
SCC	5 B <sup>1</sup>	7,9 B <sup>2</sup>
SPD	13,9 A	18 A
<b>ÉPOCA</b>		
Após colheita milho	9,8 a	12,8 a
Florescimento plantas	9,4 a	12,6 a
Florescimento soja	9 a	13,4 a
<b>ROTAÇÃO</b>		
Pousio	10,8 <i>ab</i>	13,1 <i>a</i> <sup>2</sup>
Azevém	9,7 <i>ab</i>	13,1 <i>a</i>
Centeio	10,8 <i>a</i>	13 <i>a</i>
Ervilhaca comum	8,1 <i>b</i>	10,3 <i>b</i>
Ervilhaca peluda e Aveia preta	9,7 <i>ab</i>	13,7 <i>a</i>
Nabo	8,9 <i>ab</i>	14 <i>a</i>
Trigo	7,9 <i>b</i>	13,1 <i>a</i>
Mata nativa <sup>3</sup>	4,6	5,7

<sup>1</sup> transformação em log(x) para todos os dados da coluna do extrator. <sup>2</sup> dados não homogêneo. <sup>3</sup> Os valores de mata nativa não foram utilizados na estatística. Letras maiúsculas iguais não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% para o tratamento de manejo; letras minúsculas iguais não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% para o tratamento de época; letras minúsculas em itálico não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% para o tratamento de rotação. Estatística apresentada no anexo 2

O cultivo de trigo e ervilhaca comum no inverno resultou nos menores teores de P disponível no solo extraído por Mehlich 1 (7,88 mg kg<sup>-1</sup> e 8,14 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente), quando comparado às demais rotações. O sistema radicular do trigo permite explorar grandes áreas de solo e assim absorver mais P e diminuir os teores desse nutriente na solução do solo (WANG et al., 2008; VU et al., 2010).

Entretanto, para o P extraído por RTA, apenas o solo sob cultivo hiberna com ervilhaca comum ( $10,30 \text{ mg kg}^{-1}$ ) foi menor (Tabela 5) em relação as outras culturas. A ervilhaca comum apresenta elevada concentração de P no tecido e alta taxa de decomposição, entretanto nesse caso o P mineralizado não está disponível (CASALI, 2012).

### 6.3 FÓSFORO ARMAZENADO NA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO

A média de P armazenado pela BMS coletada na mata natural, nas três épocas de coleta (pós colheita milho:  $37,66 \text{ mg kg}^{-1}$ ; florescimento das plantas hibernais:  $38,23 \text{ mg kg}^{-1}$ ; florescimento da soja:  $44,9 \text{ mg kg}^{-1}$ ), foi de  $40,28 \text{ mg kg}^{-1}$  (Tabela 6). Esse valor é, aproximadamente, oito vezes superior à quantidade de P extraído pelos extratores Mehlich 1 ou Resina (Tabela 5), mostrando que o P estocado na BMS é um importante compartimento de P no solo (MARTINAZZO et al., 2007). O local de coleta da mata representa um sistema em equilíbrio homeostático, os solos amostrados apresentaram baixa variação entre as distintas épocas de coletas, sendo que a variação entre as amostragens é de  $\pm 6,73 \text{ mg kg}^{-1}$  (Tabela 6). O equilíbrio entre a absorção de nutrientes pelas plantas e a atividade microbiana (mineralização- imobilização) nos solos da mata ocorrem em um ciclo fechado, resultando na conservação do P. Ou seja, as perdas ou ganhos que ocorrem em curto período de tempo são mínimos (SOLOMON et al., 2002). Ainda, a absorção do P proveniente da decomposição da serrapilheira ocorre tão rapidamente e perto das raízes que pouco pode ser absorvido pelos óxidos de Fe e Al (VINCENT et al. 2010). É importante ressaltar que a mata está localizada sobre um solo classificado como Latossolo extremamente argiloso e intemperizado, no qual há menor disponibilidade de  $P_i$ , em função do elevado teor de óxidos aí presentes. Assim, as formas orgânicas de P são extremamente importantes para a dinâmica de disponibilidade para as plantas nesse ambiente (TIECHER, 2011).

Após a destruição da mata nativa para a produção de grãos sob o SCC, a dinâmica do P no solo se altera. No caso desse experimento, isso ocorreu em 1976. O revolvimento intensivo e constante do solo por mais de 40 anos, mesmo

considerando que se trata de um solo extremamente argiloso e com predominância de óxidos de Fe que protege fisicamente e quimicamente o CO do solo, diminuindo pela metade a quantidade de P armazenado na biomassa microbiana. Essa característica foi constatada somente nos solos sob SCC coletados no florescimento das plantas hibernais e da soja, sendo esses 56% e 72% menores do que aqueles da mata, respectivamente. Mas estatisticamente não se observa relação entre a época amostrada e o sistema de manejo ( $p < 0,05$  - Apêndice 3).

A área experimental foi manejada durante 10 anos unicamente sob SCC de forma intensiva, com revolvimento do solo através de arações e gradagens e com plantio de milho e feijão. A partir do ano de 1986, parte das parcelas passaram a ser manejadas com SPD. Após 30 anos de SPD, essas áreas possuem aproximadamente 2 vezes mais P armazenado na BMS do que nas áreas sob SCC ( $23,3 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Além disso, esses valores são maiores (pós colheita do milho:  $75,7 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ou muito próximos ( $33,8 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $36,7 \text{ mg kg}^{-1}$ ) àqueles obtidos na mata nativa. Em ambientes com maior acúmulo de resíduos orgânicos e menor perturbação no solo, a populacional da microbiana é ampliada e o desenvolvimento da biota do solo é favorecido (RHEINHEIMER, 2000; CARNEIRO et al., 2004). Esse aumento resulta na formação de um estoque de P microbiano maior, de modo que a liberação do P orgânico oriundo da decomposição dos resíduos vegetais deixados em superfície é favorecida (LOPES et al., 2004).

A imobilização momentânea do P na biomassa dos micro-organismos retarda a adsorção específica e de alta energia do P nos argilominerais do solo (RHEINHEIMER et al., 2000, CONTE, 2001; ZAMUNER et al., 2008). Entretanto, após a lise das células microbianas, o P pode ir para a solução do solo e ser absorvido pelas plantas. As perdas de P por erosão em SPD bem manejados são baixas, devido à adubação fosfatada localizada, ao acúmulo de matéria orgânica e ao aumento da BMS do solo, resultando na acumulação do P orgânico na camada superficial.

**Tabela 6.** Fósforo armazenado na biomassa microbiana ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) no solo na camada de 0,10 m num Latossolo Vermelho do estado do Paraná, cultivado sob Sistema de cultivo convencional (SCC) e sistema de plantio direto (SPD) por longo período.

ROTAÇÃO DE CULTURA								
	Pousio	Azevém	Centeio	Ervilhaca Comum	Ervilhaca peluda e Aveia preta	Nabo	Trigo	Mata <sup>1</sup>
-----mg kg <sup>-1</sup> -----								
ÉPOCA DE COLETA								
Após colheita milho	45,9aA	64,8aA	58,8aA	55,6aA	74,4aA	61,4aA	46,8aA	37,7
Florescência hibernal	17,0bC	22,9bAB	27,9bAB	20,6bBC	22,4bABC	38,8aA	25,7bABC	38,2
Florescimento soja	20,5aB	29,9bAB	23,5bAB	39,26aA	27,3 bAB	17,4bB	19,8bB	45,0
MANEJO								
SCC	18,0bA	28,2bA	25,3bA	25,7bA	30,6bA	26,3bA	19,2bA	
SPD	40,0aA	50,2aA	48,1aA	51,3aA	52,2aA	52,1aA	42,4aA	

<sup>1</sup>Valores obtidos no solo da mata são apenas comparativos e não participaram da análise estatística. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, comparando cultura de inverno em cada época de amostragem e manejo. Médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha, comparando a época de amostragem e o sistema de manejo dentro de cada cultura de inverno,

O estoque de P microbiano variou estatisticamente entre as três épocas de coleta, sendo que a maior média foi encontrado após a colheita do milho ( $58,2 \text{ mg kg}^{-1}$  - Tabela 6. Essas diferenças observadas no P armazenado na BMS entre as três épocas podem estar relacionadas com o fato das plantas absorverem mais P da solução do solo na época do florescimento, período de maior atividade metabólica, o que diminui o P disponível próximo à rizosfera (MARTINAZZO et al., 2007; DANTAS, 2016). Devido ao momento fisiológico das plantas, o crescimento resulta em elevada demanda de P, levando a quantidade acumulada na biomassa a ser reduzida, fenômeno conhecido como sincronismo. Ou seja, a alta demanda biológica resulta na diminuição das concentrações de P disponíveis no solo. Isto provoca um aumento na atividade da fosfatase ácida (SPEIR e ROSS, 1981. COSTA e LOVATO, 2004; DICK, 1994; ALLISON et al, 2007), promovendo a hidrólise de fosfatos ligados à fração orgânica (KLOSE e TABATABAI, 1999), o que leva à mineralização da BMS, diminuindo quantitativamente seus teores. A

seguir, após o período de crescimento e colheita, a população microbiana aumenta exponencialmente, armazenando grande quantidade de P.

Quando as plantas das culturas hibernais foram relacionadas com as épocas de amostragem não se observou interação estatística significativa ( $p < 0,05$ ). No solo que no período de inverno foi mantido com vegetação espontânea, nos três períodos coletados, obteve-se uma das menores médias de P estocado na BMS (média de  $27,8 \text{ mg kg}^{-1}$ ), comparativamente aos solos com as espécies cultivadas. Esse resultado pode estar associado às menores quantidades de MOS (na superfície ou incorporada) depositadas anualmente no caso do solo com vegetação espontânea, o que diminui a atividade dos micro-organismos e os teores de P estocado na BMS. Pode-se também relacionar esse resultado a menores taxas de inóculos de fungos micorrízicos no solo, devido à pequena quantidade de plantas que germinam nesse período (TIECHER, 2011).

Na parcela com trigo no período hibernal, o solo apresentou menores valores de P estocado na BMS (média de  $30,8 \text{ mg kg}^{-1}$ ) em relação às outras plantas de cobertura. Atribui-se esses valores às menores taxas de palhada fornecida anualmente pela cultura, na média histórica do experimento (Tabela 3), e às baixas concentrações de P presente nos tecidos das plantas, o que aumenta a relação C:P e diminui a taxa de imobilização do resíduo (CASALI, 2012).

A qualidade da fitomassa de cada cultura é importante para a atividade da BMS e influencia na decomposição dos resíduos orgânicos. No presente estudo, não se observou diferenças significativas nos teores de P estocado na BMS entre os cultivos de gramíneas e de leguminosas; porém, a maior média desse parâmetro foi encontrada na associação entre ambas as famílias, no consórcio ervilhaca peluda + aveia preta na coleta de solo realizada na época posterior à colheita do milho. Nesse caso, no SPD obteve-se uma média de P estocado na BMS de  $93,2 \text{ mg kg}^{-1}$  e no SCC de  $55,5 \text{ mg kg}^{-1}$ . A taxa de decomposição dos resíduos culturais depende da localização e da forma em que o P se encontra no tecido vegetal, sendo que a maior parte está sob formas minerais dentro dos vacúolos das suas células (MARSCHNER, 1995; GIACOMINI et al., 2003; MARSOLA, 2008). Deve-se levar em conta que os resíduos têm diferentes relações C:N e diferentes taxas de decomposição. Estudo realizado num Argissolo Vermelho avaliando aveia preta,

ervilhaca, nabo forrageiro e seus consórcios, revelam que após 15 dias da colheita, 40% do P nos resíduos de ervilhaca foram degradados (GIACOMINI et al., 2003). O mesmo autor também encontrou valores superiores a 90% de P na palhada da aveia após 15 dias de colheita, indicando uma decomposição mais lenta. O consórcio proporciona uma decomposição mais uniforme dos resíduos em curto e longo prazo.

#### 6.4 FRAÇÕES DE FÓSFORO ORGÂNICO E INORGÂNICO NO SOLO

O solo sob vegetação natural (Tabela 7) tem valor elevado de Po extraído por NaOH ( $389,5 \text{ mg kg}^{-1} \text{ Po NaOH}$ ), e sua média é 2,64 vezes maior que o teor do Pi ( $147,3 \text{ mg kg}^{-1} \text{ Pi NaOH}$ ). Considerando o P total no solo em estudo, a fração orgânica (Po Total) é de suma importância para o ambiente, visto que chega a ser 34,3% da quantidade de P presente no solo. A maior parte dos nutrientes minerais se encontra armazenada na vegetação (biomassa), o que explica também os baixos teores que se obtém para P disponível (LUIZÃO e SCHUBART, 1987).

Quando o ecossistema natural da área em estudo passou a ser cultivado sob o sistema convencional, as formas de Po (P estocado na BMS, Po NaOH e Po Total) sofreram declínio devido ao maior contato com a BMS, resultando em maior decomposição da serrapilheira, concomitantemente com as novas exposições de sítios ativos de adsorção (SOLOMON et al. 2002; CONTE et al. 2002). Após 40 anos de intenso cultivo convencional, pode-se observar uma regeneração nos teores de P orgânico de labilidade moderada, extraído por NaOH, o qual é duas vezes superior à fração inorgânica. A fração orgânica (Po NaOH) representa o P ligado aos compostos orgânicos como os diéster, os fosfonatos, os polifosfatos e principalmente os fosfatos monoéster (RHEINHEIMER et al., 2002). Os últimos são compostos caracterizados por sua capacidade de interagir com as partículas coloidais do solo através de ligações de alta energia, dificultando a sua mineralização pelos micro-organismos (GATIBONI, 2003). Já o P inorgânico (Pi NaOH) é aquele que está adsorvido principalmente na caulinita e nos óxidos de Fe e Al com ligações do tipo monodentada e/ou bidentada.

**Tabela 7.** P orgânico e inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol l<sup>-1</sup> no solo da camada de 0-10 cm num Latossolo Vermelho do estado do Paraná, cultivado sob sistema de cultivo convencional (SCC) e sistema plantio direto (SPD) por longo período.

	EXTRATORES			
	Po - NaOH	Pi - NaOH	Po-Total	Pi – Total
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----			
<b>MANEJO</b>				
SCC	276,7 B	126,7 B	370,6 B	856,3 B
SPD	363,8 A	210,7 A	462,9 A	1047,5 A
<b>ÉPOCA</b>				
Após colheita milho	319,0 Ab	179,5 a	437,5 a	964,4 ab
Florescimento plantas	330,1 A	161,8 b	408,6 b	902,3 bc
Florescimento soja	311,6 B	164,9 ab	404,1 b	989,0 a
<b>ROTAÇÃO</b>				
Pousio	304,4 <i>ab</i>	171,8 <i>ab</i>	396,9 <i>cd</i>	969,7 <i>abc</i>
Azevém	329,4 <i>a</i>	159,2 <i>ab</i>	423,7 <i>abc</i>	858,4 <i>c</i>
Centeio	327,6 <i>a</i>	168,3 <i>ab</i>	408,5 <i>bcd</i>	892,6 <i>c</i>
Ervilhaca Comum	333,3 <i>a</i>	169,4 <i>ab</i>	434,7 <i>ab</i>	919,5 <i>bc</i>
Ervilhaca Peluda + Aveia preta	325,3 <i>a</i>	184,4 <i>a</i>	410,9 <i>bcd</i>	910,6 <i>bc</i>
Nabo	293,2 <i>b</i>	151,2 <i>b</i>	394,3 <i>d</i>	1021,9 <i>ab</i>
Trigo	328,5 <i>a</i>	176,7 <i>ab</i>	448,1 <i>a</i>	1090,7 <i>a</i>
Mata nativa	389,5	147,3	435,6	832,0

Letras maiúsculas iguais não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% para o tratamento de manejo; letras minúsculas iguais não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% para o tratamento de época; letras minúsculas em itálico não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% para o tratamento de rotação.

Em relação ao teor total de P no SCC, o Pi (856,3 mg kg<sup>-1</sup>) foi superior ao Po (370,6 mg kg<sup>-1</sup>), demonstrando que a maior fração de P ainda se encontra ligada aos colóides inorgânicos do solo, com alta energia de ligação. Após 30 anos sob sistema conservacionista, pode-se observar que a média da fração orgânica total chega a ser 30,6% do P no solo, valor próximo àquele encontrado na mata nativa (34,3%). Para a fração Po NaOH, sua média foi superior em 1,73 vezes à forma inorgânica do P no solo.

As quatro frações analisadas de P (Po NaOH, Pi NaOH, Po Total e Pi Total – Tabela 7) tiveram valores significativamente maiores nos solos sob SPD, em relação àqueles sob SCC. Atribuiu-se esse resultado ao não revolvimento do solo no SPD e ao P adicionado via fertilizantes, o qual permanece na linha de semeadura. Assim, os sítios ativos dos colóides inorgânicos do solo sob SPD foram gradualmente saturados (principalmente a superfície dos óxidos de Fe e Al) durante

os 30 anos do sistema de plantio. Somando-se a isso, no SCC o revolvimento de grandes volumes de solo (aproximadamente 0 a 0,20 m de profundidade) distribui o P ao longo do perfil (RHEINHEIMER et al., 2008a), não permitindo o acúmulo de P nas camadas superficiais do solo.

Concomitantemente, o SPD promove maior acúmulo de matéria orgânica na superfície do solo por um longo período (GUBIANI, 2015) e uma maior atividade da BMS, podendo resultar na formação de complexos de P com substâncias húmicas, atuando como um dreno do fosfato (REDEL et al., 2007). Isso justificaria os maiores valores obtidos para ambas as formas de P orgânico no SPD (Po NaOH: 363,8 mg kg<sup>-1</sup> – Po Total: 462,9 mg kg<sup>-1</sup>), quando comparado ao SCC (Po NaOH: 276,7 mg kg<sup>-1</sup> – Po Total: 856,3 mg kg<sup>-1</sup>). Resultados similares foram observados no trabalho de Tiecher (2011), na mesma área experimental, com amostras de solos coletadas após 23 anos de cultivo.

Em ambos os sistemas, altos índices de resíduos vegetais são anualmente depositados no solo, resultando em maior transformação de P inorgânico em frações orgânicas de P de diferentes labilidades, das quais as principais são a fração moderadamente lábil extraída por NaOH e as formas mais recalcitrantes (P orgânico total). Outrossim, a utilização de fertilizantes fosfatados anualmente faz com que o P se acumule no solo sob formas inorgânicas, provocando o tamponamento de P da solução do solo, o que faz com que a fração orgânica desse nutriente passe a ser menos utilizada, permitindo que se acumule. Isto se deve, basicamente, ao fato de as quantidades de P adicionadas como fertilizantes serem superiores àquelas exportadas pelos grãos (NOVAIS e SMITH, 1999).

Em relação à época de amostragem, pode-se perceber uma diferença significativa nas frações Pi NaOH extraídas do solo coletado na época do florescimento das culturas de inverno e do solo amostrado na pós-colheita do milho, que foram de 161,8 mg kg<sup>-1</sup> e 179,5 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Essa variação também foi observada no Po Total, cujo valor no solo coletado no período da pós-colheita do milho foi maior do que aquele correspondente ao solo amostrado na época do florescimento das plantas de inverno. Em relação aos fatores, houve diferença estatística significativa apenas entre o sistema de preparo e a rotação de



culturas para o Pi NaOH e o Po NaOH. A época não foi relevante nas interações estatísticas.

As plantas de cobertura na área experimental foram manejadas através do rolo-faca no período de inverno, com a finalidade de interromper o seu ciclo de desenvolvimento. Assim a palhada permanecia depositada na superfície do solo sob SPD, mas era incorporada ao solo durante o plantio sob sistema de cultivo convencional. As plantas foram utilizadas como uma fonte de nutrientes para biota do solo antes do plantio da safra de verão, de modo a aumentar o teor de MOS (GUBIANI, 2015).

Com relação às parcelas cultivadas com diferentes plantas de cobertura, foi no solo sob pousio (em que ocorre vegetação espontânea) que se observou o menor teor de Po (Po NaOH: 304,4 mg kg<sup>-1</sup> – Po Total: 396,9 mg kg<sup>-1</sup>), sendo que o segundo menor valor desse parâmetro foi obtido no solo com nabo forrageiro (Po NaOH: 293,2 mg kg<sup>-1</sup> – Po Total: 394,3 mg kg<sup>-1</sup>). Observa-se assim que, em sistemas a longo prazo, o P acumula-se nas formas orgânicas, quando se tem acúmulo de resíduo vegetal no solo proveniente das plantas de cobertura hibernais. Cabe notar que o nabo apresenta baixa produção de resíduo cultural anualmente (Tabela 3). O solo sob o cultivo de nabo forrageiro no período hibernal, além de apresentar baixas concentrações de Po NaOH e Po Total, também apresentou o menor valor de Pi NaOH em relação às outras culturas (151,2 mg kg<sup>-1</sup>), bem como uma elevada concentração de Pi total (1021,9 mg kg<sup>-1</sup>). Essa cultura possui sistema radicular pivotante e agressivo, além de alta taxa de decomposição da fitomassa seca da parte aérea (CASALI, 2012). Marsola (2008) em seu estudo também relatou que os resíduos de nabo forrageiro aumentaram expressivamente as formas de P lábeis no solo, em função de apresentarem maior teor de P no tecido vegetal. No presente estudo observou-se que a média de P disponível por RTA (P lábil) nesse caso (14,0 mg kg<sup>-1</sup>) foi superior aos valores desse parâmetro nas demais culturas. Pode-se atribuir esse resultado à alta concentração de P existente no tecido vegetal do nabo forrageiro e à sua posterior decomposição. Quando o Pi é liberado no solo, grande parte dele fica adsorvido nos óxidos de Fe Al, com alta energia de ligação.

No solo sob a cultura hiberna do trigo pode-se observar estreita relação entre diferentes frações de P, quais sejam: o P potencialmente disponível extraído por Mehlich 1, o P estocado na BMS, Po e Pi extraídos por NaOH e os teores Po total e Pi total (Tabelas 5, 6, 7). Há maior acúmulo nas formas de P moderadamente lábeis (Po NaOH: 328,5 mg kg<sup>-1</sup> – Pi NaOH: 176,7 mg kg<sup>-1</sup>) e não lábeis no solo (Po Total: 448,1 mg kg<sup>-1</sup> – Pi Total: 1090,7 mg kg<sup>-1</sup>), teores que são estatisticamente superiores àqueles das outras culturas. O resultado pode ser explicado através do sistema radicular da planta do trigo que explora grande volume de solo, absorvendo grandes quantidades de P. Nos seus tecidos vegetais, acumula-se P nas formas não lábeis para os micro-organismos decompositores, mesmo com adições anuais de fertilizantes. Segundo Casali, 2012, as baixas concentrações de P nos tecidos das plantas favorecem a maior imobilização do resíduo. Esse autor relata, em seu estudo na mesma área experimental aos 25 anos sob SPD, que o cultivo de trigo transformou o P adicionado via fertilizantes em formas mais recalcitrantes de P para a BMS (REDEL et al., 2007). Além disso, na média histórica do experimento (Tabela 3), a cultura do trigo apresentou baixas taxas de palhada fornecida anualmente em relação às outras culturas.

Nas outras gramíneas empregadas no estudo, pode-se observar comportamento diferente. Na parcela com cultivo de centeio no período hiberna, o solo apresentou a menor média de P inorgânico total (892,6 mg kg<sup>-1</sup>) em relação às demais culturas, bem como um alto valor na média de P orgânico extraído por NaOH (327,6 mg kg<sup>-1</sup>). A cultura de centeio possui um sistema radicular fasciculado, com grande densidade e distribuição uniforme no solo, favorecendo a distribuição dos exsudados, transformando grande parte do P em frações moderadamente lábeis orgânicas (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011). No solo sob a cultura hiberna de aveia, também pode-se observar um comportamento parecido com aquele do centeio, em que a média de P orgânico extraído por NaOH foi de 329,4 mg kg<sup>-1</sup> e a de Pi total, de 858,4 mg kg<sup>-1</sup>.

Já no solo sob ervilhaca comum no período hiberna, observou-se altas médias de Po extraído por NaOH e de Po total, em relação às demais plantas de cobertura, correspondentes a 333,3 mg kg<sup>-1</sup> e 434,74 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. No estudo de Casali (2012), a ervilhaca apresentou maior concentração de P no tecido

e altos valores de P solúvel em água, indicando a facilidade da migração do P do resíduo para o solo e uma alta taxa de decomposição do fitomassa seca. Assim, o P liberado pode ser complexado pelos esqueletos orgânicos presentes no solo, visto que essa cultura também apresentou menores teores de P disponível (Mehlich 1 e RTA – Tabela 5) do que as outras culturas estudadas.

No entanto, alguns dos efeitos provocados nas formas de P no solo pelas plantas de cobertura podem ter sido mascarados, devido ao bom manejo da área experimental e à adição de 200 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduos culturais durante os 30 anos de SPD e os 40 anos do SCC. Além disso, no solo sob SCC, ocorre aumento da interação do P com a fase mineral, o que pode limitar alguns dos efeitos dos resíduos das plantas, principalmente nas formas de P solúveis.

## 6.5 FORMAS DE FÓSFORO NO SOLO

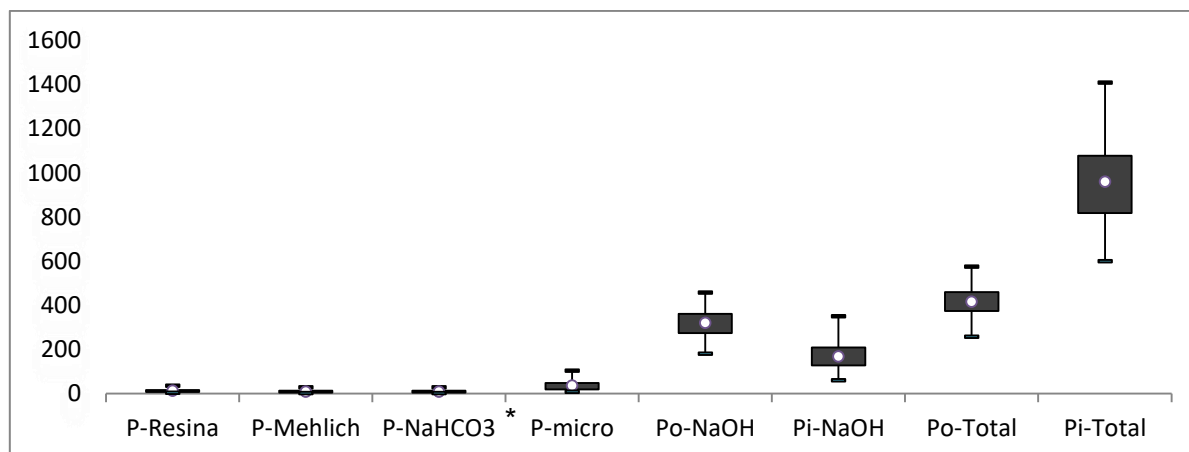
Na figura 5 são apresentadas as diferentes frações extraídas de P no presente estudo realizado num Latossolo Vermelho com diferentes rotações de culturas hibernais, 30 anos sob SPD e 40 anos sob SCC. As frações consideradas lábeis ou disponíveis (P Mehlich, P Resina, P Microbiano e P NaHCO<sub>3</sub>) têm menor representabilidade no teor total de P, mas são de extrema importância para o desenvolvimento das culturas. Os teores de Po extraído por NaOH e Po total são de grande magnitude em relação às concentrações totais de P no solo. A fração moderadamente lábil orgânica está ligada principalmente a monoéster de P e se sobressai em relação às frações inorgânicas extraídas também pelo NaOH. Na análise estatística, a correlação (Apêndice 3) entre o P Mehlich 1 e o Pi NaOH e entre o P Mehlich 1 e o Po NaOH apresentaram-se moderadamente positivas ( $r=0,694$ ,  $r=0,70$  respectivamente,  $\rho<0,05$ ). Assim, o P moderadamente lábil atua potencialmente como uma fonte quando a demanda da cultura é superior ao P adicionado, ou como um dreno de P da solução, quando o fosfato adicionado (via fertilizantes) é superior à demanda da planta e o P se acumula de forma moderadamente lábil no solo (TIESSEN et al., 1992).

Entretanto, a maior fração encontrada foi a do fosfato ligada aos óxidos de Fe e Al e caulinita (Pi Total), a qual chega a corresponder em média a 70% do P total. Um resultado similar também foi encontrado por Teles et al (2017) (TELES, 2014) num Nitossolo vermelho. O dado obtido no presente estudo pode ser atribuído à mineralogia do solo (Tabela 1), que apresenta altas concentrações de hematita, goethita ( $510 \text{ g kg}^{-1}$  e  $360 \text{ g kg}^{-1}$  – Tabela 1) e argilominerais 1:1 (Caulinita e Halloisita -  $680 \text{ g kg}^{-1}$ )

No SPD, após 30 anos, grande parte do fosfato adicionado via fertilizantes foi convertido, sob ação dos exsudados das raízes, das associações micorrízicas e da biomassa microbiana, em formas orgânicas que apresentam menor labilidade. Esse resultado também foi observado por Tiecher et al. (2012a), na mesma área experimental.

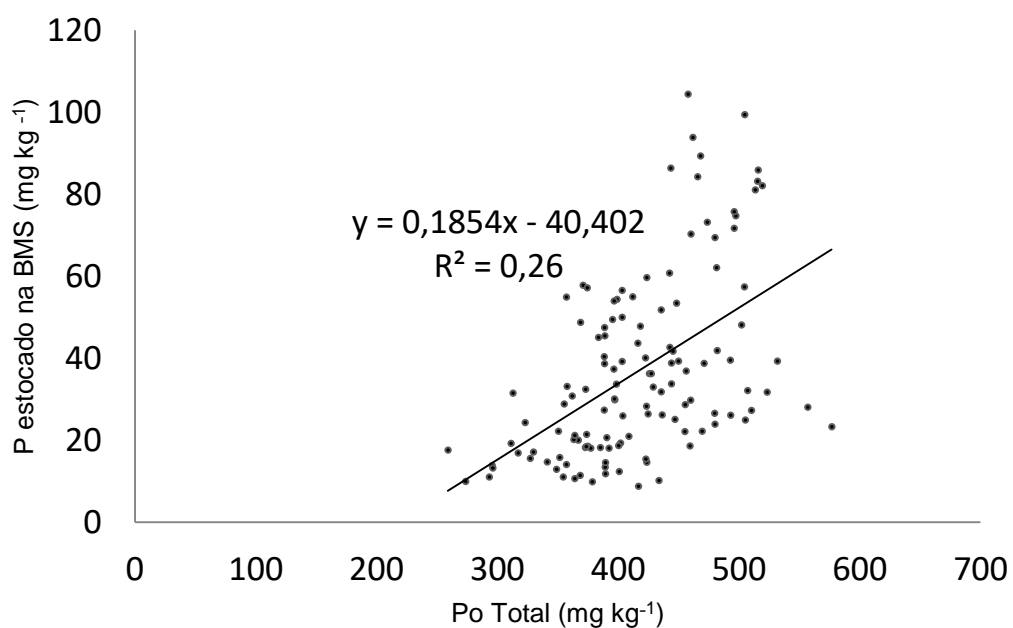
A correlação entre o P armazenado na biomassa microbiana e o P orgânico é apresentada na Figura 6. Essa relação é considerada como um indicador da labilidade das frações orgânicas de P, isto é, de sua habilidade em estar potencialmente disponível para as plantas. Isso é um fator importante, principalmente em solos com frações orgânicas superiores à inorgânica, como na mata nativa e no SPD consolidado (CONTE et al., 2002). Entretanto, no presente estudo esse indicador apresentou uma relação moderada positiva ( $r= 0,51$ ,  $\rho < 0,05$ ). Isto mostra que não é a quantidade de Po total do solo que determina a quantidade de P armazenado na biomassa microbiana, mas sim o sincronismo entre a disponibilidade imediata de carbono (especialmente ao sistema radicular) e a demanda do P pela planta (COSTA e LOVATO, 2004).

**Figura 4.** Média das frações de P obtidas entre o sistema de plantio, época de coleta e rotação de cultura na camada de 0 a 0,1 m num Latossolo Vermelho do estado do Paraná, cultivado sob sistema de cultivo convencional (SCC) e sistema de plantio direto (SPD) por longo período.



\* Dados não apresentados no trabalho

**Figura 5.** Análise de regressão da interação entre o P estocado na biomassa microbiana do solo (BMS) e o fósforo orgânico total (Po Total).



## 7. CONCLUSÕES

1. A adoção do sistema plantio direto por um longo período possibilitou aumento na quantidade de fósforo armazenado na biomassa microbiana, comparativamente ao sistema convencional, em que há revolvimento intensivo do solo.
2. As quantidades de fósforo armazenado na biomassa microbiana *parecem* flutuar em decorrência da demanda das plantas, atingindo valores mínimos no pleno florescimento e máximo após a maturação e consequente adição da palhada ao solo. Não há relação entre as quantidades totais de fósforo orgânico com a quantidade de fósforo armazenada na biomassa microbiana.
3. O revolvimento intenso do solo para implantação das culturas distribui o fósforo aplicado em toda massa de solo permitindo que fosfato entre em contato com novos sítios de adsorção das partículas coloidais inorgânicas, aos quais fica fortemente ligado. Consequentemente, diminui a quantidade de fósforo prontamente disponível em relação sistema plantio direto.
4. Mesmo com a utilização de diferentes plantas de cobertura de inverno por um longo período de tempo, o efeito na alteração das quantidades de fósforo presentes em diferentes frações, inclusive na quantidade armazenada na biomassa microbiana, foi muito pequeno ou ausente.

## 8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Ao longo do desenvolvimento deste estudo identificaram-se questões que permitiriam o desenvolvimento de outros trabalhos para ampliar o entendimento do fenômeno estudado.

Entre estas podemos citar a inclusão da aveia preta e do tremoço azul entre as plantas de cobertura estudadas, pois segundo a literatura, essas culturas apresentam boa ciclagem de fósforo.

O estudo com fósforo “marcado” ( $^{32}\text{P}$ ) também pode ser um excelente auxiliar para a interpretação de resultados, visto que permitiria o acompanhamento da ciclagem do fósforo no sistema solo-planta.

Outra linha de investigação complementar poderia envolver a realização de análises de fracionamento de fósforo nos tecidos vegetais. Assim, poderia ser estudada a dinâmica do elemento nos diferentes tecidos das plantas de cobertura, identificando a estrutura na qual o nutriente é armazenado e como ele é decomposto no solo.

Além disso, o estudo das frações de P poderia ser estendido a toda a camada “arável” do solo (0 – 0,20 m), já que as raízes conseguem se desenvolver nessa profundidade. Poderia também ser feita a estratificação da camada superficial do solo, por exemplo coletar-se amostras de 0,02 m em 0,02 m nos primeiros 0,10 m, para tentar-se observar algum efeito das plantas de cobertura.

## 9. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. W., SANTOS, J. R., MOURA FILHO, G REIS, L. S. **Plantas de cobertura e adubação nitrogenada na produção de milho em SPD**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2013. P 721-726.

ALLEONI, L. R. F., CAMARGO, O.A. **Modelos de dupla camada difusa de Gouy-Chapman e Stern aplicados a latossolos ácidos paulistas**. Sci. Agr., Piracicaba, SP. 1994. p 315-320

ALLEONI, L.R.F., CAMBRI, M.A., CAIRES, E.F., GARBUIO, F.J. **Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils**. Soil Science Society of America Journal. 74, 2010.

ALLISON, V.J., CONDRON, L.M., PELTZER, D.A.; RICHARDSON, S.J., TURNER, B.L. **Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence**. Soil Biol. Biochem. 39. 2007. P.1770-1781.

AMABILE, R.F.; CARVALHO, A.M de. **Histórico da adubação verde**. In: CARVALHO, A. M. de; AMABILE, R. F. (Ed.). Cerrado: adubação verde. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados. 2006 p. 23 -40,

AMBROSANO, E.J.; ROSSI, F.; GUIRADO, N.; SCHAMMASS, E.A; MURAOKA, T.; TRIVELIN, P.C.O.; AMBROSANO, G.M.B. **Adubação verde na agricultura orgânica**. In: LIMA FILHO, O.F.DE L.; AMBROSANO, E.J.; ROSSI, F.; CARLOS, J.A.D. (ed). Adubação Verde e Plantas de Cobertura no Brasil: fundamentos e prática. DF: Embrapa, v. 2. 2014 p.478

ANDRADE, F.V.; MENDONÇA, E.S.; ALVAREZ V., V.H. & NOVAIS, R.F. **Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fósforo**. R. Bras. Ci. Solo, 27:1003-1011, 2003.

ANGHINONI I. **Fertilidade do solo e seu manejo no sistema plano direto**. Em: Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL, editores. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p.873-928.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach**. 2.ed. Nw York. John Wiley e Sons, 1995. 414p



BARROW, N.J. **A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil.** Journal Soil Science, v34, p.733-750, 1983.

BARROW, N.J. BOLLAND, M.D.A. e ALLEN, D.G. Effect of additions of superphosphate on sorption of phosphate. Aust. J. Soil Res., 1998 p. 359-372

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

BECK, M. A.; SANCHEZ, P. A. **Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a TypicPaleudult.** Soil Science Society of America Journal, v. 58. 1994. p. 1424- 1431

BORTOLETI JUNIOR, A.; GONÇALVES, L.G. RIBEIRO, M.R.A.; AFONSO, R.O.; SANTOS, R.F. SOUZA, C.S.S. **A importância do plantio direto e do plantio convencional e as suas relações com o manejo e conservação do solo.** Rev. Conexão Eletrônica – Três Lagoas, MS – Volume 12 – Número 1 – Ano 2015

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. 1982 p 671-674

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, 2006

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.

CALEGARI, A. **Perspectivas e estratégias para sustentabilidade e o aumento da biodiversidade dos sistemas agrícolas com o uso de adubos verdes.** In: LIMA FILHO, O.F.DE L.; AMBROSANO, E.J.; ROSSI, F.; CARLOS, J.A.D.C. (ed). Adubação Verde e Plantas de Cobertura no Brasil: fundamentos e práticas. DF: Embrapa, v. 1. 2014 p.507

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

CARDOSO E.J.B.N.; VASCONCELLOS R.L.F.; BINI D.; MIYAUCHI M.Y.H.; SANTOS C.A.; ALVES PRL, PAULA AM, NAKATANI AS, PEREIRA JM, NOGUEIRA MA. **Soil health: Looking for suitable indicators. What should be**

**considered to assess the effects of use and management on soil health?** Sci Agric. 70. 2013; p274-89.

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.

CARVALHO, A.M.de; MIRANDA, J. C.C.; GEROSA, M.L.; RIBEIRO JUNIOR, W.Q. **Adubação Verde e Plantas de Cobertura no Cerrado.** In: LIMA FILHO, O.F. de L.; AMBROSANO, E.J.; ROSSI, F.; CARLOS, J.A.D.C. (ed). (Org.). Adubação Verde E Plantas De Cobertura No Cerrado. 01ed.Brasília: Embrapa, v. 02. 2014 p 01-55

CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F, CAMARGO, O. A; BORGES, M. **Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis.** Revista Brasileira de Ciências do Solos, 2003

CASALI, C. A. **Sistemas de culturas sob diferentes manejos por longa duração alteram as formas de P do solo?** 2012. 149p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2012.

CASALI, C.A. et al. **Mineralização das formas de fósforo do tecido de plantas de cobertura.** *Informações Agrônomicas*, v. 135. 2011 p. 21-24,

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** SBCS - Núcleo Regional Sul. 2016 p.376

CONTE, E. **Atividade de fosfatase ácida e formas de acumulação de fosfato em solo no sistema plantio direto.** 2001. 65f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CONTE, E.; ANGHINONI, I. & RHEINHEIMER D.S. **Frações de P acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto.** R. Bras. Ci. Solo. 2003

CONTE, E.; ANGHINONI, I. & RHEINHEIMER, D.S. **P da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicações de fosfato em solo no sistema plantio direto.** R. Bras. Ci. Solo. 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, A. R. et al. **Microbiological properties and oxidizable organic carbon fractions of an oxisol under coffee with split phosphorus applications and irrigation regimes**. Rev. Bras. Ciênc. Solo, Viçosa, v. 37, n. 1. 2013 p. 55-65

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

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

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

DANTAS. M. K. L. **Biomassa, atividade microbiana e produtividade de trigo e milho em solo com histórico de aplicação de fontes orgânicas e mineral/2016**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo). Unversidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil 2016

DICK, R.P. **Soil enzymes activities as indicators of soil quality**. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.107-124. (Special Publication, 35)

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. 1977 p. 82-85,

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 2006

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975. 341p

FRAGA, V.S.; SALCEDO, I.H. **Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsystems farming**. Soil Science Society of America Journal, v.68, n.1. 2004 p.215-224

FREIRIA, A. C.; MANTOVANI, J. R.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; YAGI, R. **Alterações em atributos químicos do solo pela aplicação de calcário na superfície ou incorporado**. Acta Scientiarum Agronomy, v.30, n.2. 2008 p.285-291

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas/2003**. 231 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S. **Modificações nas formas de P 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. 2005 p. 363-371

GATIBONI, L.C. et al. **Biodisponibilidade de formas de P acumuladas em solo sob sistema plantio direto**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.31, n.4. 2007 p.691-699

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J., RHEINHEIMER, D.; BRUNETTO, G. **Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo**. Pesquisa Agropecuária Brasileira 43. 2008. p.1085–1091

GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J. **Fracionamento químico das formas de P do solo: usos e limitações**. In: ARAÚJO, A.P.; ALVES, B.J.R. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.8. 2013 p.141-187.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; VENDRUSCOLO, E. R. O.; CUBILLA, M.; NICOLOSO, R. S.; FRIES, M. R. **Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, P e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo**. Revista Brasileira Ciência Solo, v. 27. 2003. p. 325- 334.

GONZATTO, R. **Aplicação superficial de calcário: até onde migram e até quando persistem os efeitos no perfil do solo? 2014**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo). Unversidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil 2014

GUBIANI, E. **Estoque de carbono e nitrogênio em solo sob sistemas de manejo e culturas de inverno/2015**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo). Unversidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil 2015

GUPPY, C.N.; MENZIES, N.W.; MOODY, P.W. & BLAMEY, F.P.C. **Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review**. Austr. J. Soil Res., 43:189-202, 2005.

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. 46.1982 p. 970–976

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

IAPAR. Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no Estado do Paraná/coordenação Edson Lima de Oliveira. Londrina. 30 p. (IAPAR. Circular, nº 128) 2003

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ.  
IAPAR. <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1865>>  
Acesso 15 dezembro 2016

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. Disponíveis em  
<<http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1326.html>> Acesso em 15 de janeiro de 2017

JONES, D.L. **Organic acids in the rhizosphere** - A critical review. Plant Soil, 205:25-44, 1998.

KLOSE, S. & TABATABAI, M.A. **Arylsulfatase activity of the microbial biomass in soil.** Soil Sci. Soc. Am. J., 53. 1999 p.569-574

KUNZE, A; COSTA, M. D.; EPPING, J. **Phosphatase activity in sandy soil influenced by mycorrhizal and non-mycorrhizal cover crops.** Revista Brasileira de Ciência. Solo, Viçosa, v. 35, n. 3. 2011 p. 705-711

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

LEE, J. D. **Química inorgânica não tão concisa.** Tradução da 5ª ed. inglesa. Editora Edgard Blücher Ltda. pp. 24, 217, 360-370. 1999

LIMA, V. C., LIMA M. R. de; MELO V.de F. **Conhecendo os principais solos do paraná Abordagem para professores do ensino fundamental e médio.** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo / Núcleo Estadual do Paraná, 2012.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O. D.; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. **Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, G, v. 36, n. 1. 2012 p. 33-43

LONERAGAM, J.F; ASHER, C.J. **Response of plants to phosphate concentration in solution culture. II. Rate of phosphate absorption and its relation to growth.** Soil Sci., v. 103, n. 5, 1966

LOPES, S.A.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L.R.G. & SILVA, C.A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo, Associação Nacional para Difusão de Adubos \_ ANDA, 2004. 110p.

LUIZÃO, F. J.; SCHUBART, H. O. R. **Litter production and decomposition in a terra-firme forest of Central Amazonia**. *Experientia*, [S.l.], v. 43, n. 3. 1987 p. 259-265

MACHADO, D. M., SCHOSSLER. T. R., ZUFFO, A. M., ANDRADE, F. R., PIAUILINO. A. C. **Atividades microbianas e as transformações no ciclo dos elementos no solo**. *Enciclopédia biosfera*, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.8, n.15; p. 2012

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Academic Press. San Diego, 1995. 889 p

MARSOLA, T. **Mineralização de fósforo do adubo verde e sua absorção por plantas de arroz. 2008**. 112 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

MARTINAZZO, R.; RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J. **P microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31:563-570, 2007

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH<sub>4</sub> by North Carolina Soil Testing Laboratoris**. Raleigh: University of North Carolina, 1953. (mimeografado)

MELFI, A.J.; PEDRO, G. **Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil**. Parte 1: Caracterização e repartição dos principais tipos de evolução geoquímica. *Revista Brasileira de Geociências*, v.7, p.271-287, 1977.

MELLO, J.W.V. de; PEREZ, D.V. **Equilíbrio Químico das Reações no Solo**. In: Melo V de F, Alleoni LRF (Eds.) *Química e Mineralogia do Solo*. Viçosa, SBCS. 2009 p.151-249.

MELO JÚNIOR. H. B. de; CAMARGO, R., Wendling, B. **SPD na conservação do solo e água e recuperação de áreas degradadas**. *ENCICLOPÉDIA BIOSFERA*, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7, N.12; 2011 Pág. 1-17.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2. Ed. Atual. E ampl. Lavras: Editora UFLA. 2006. p. 729:

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. 1996 p. 1699-1706,

MURPHY, J.; RILEY, J. P. **A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters.** Analytica Chimica Acta, v. 27.1962 p. 31-36

MUZILLI, O. **Influência do SPD**, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. R. Bras. Ci. Solo, 7:95-102, 1983

MUZILLI, O. **Princípios e perspectivas de expansão.** In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Plantio direto no estado do Paraná. Londrina, 1981. p.11-16 (Circular, 23)

NAHON, D. B. (1987) **Evolution of iron crusts in tropical landscape.** In: COLEMAN, S.M. DETHIER, D.P. (eds) Rates of Chemical Weathering of Rocks and Minerals. Academic Press Inc. p. 169-191.

NETO, F. C. R.; SCHAEFER, C. E. G. R.; COSTA, L. M.; CORRÊA, M. M.; FILHO, E. I. F.; IBRAIMO, M. M. **Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do alto Paranaíba (MG).** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2004; 28: 953 – 964.

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

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.

OLIVEIRA, L.B.; TIECHER, T.; QUADROS, F.L.F. & RHEINHEIMER, D.S. **P microbiano em solos sob pastagem natural afetado por queima e pastejo.** R. Bras. Ci. Solo, 35:1509-1515, 2011.

OLIVEIRA, L. B. de. **Dinâmica do P em ecossistema de pastagem natural submetido à aplicação de fontes de fosfato/2012.** Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil 2012

OLIVEIRA, L. B. et al. **Formas de fósforo no solo sob pastagens naturais submetidas à adição de fosfatos** Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 38, núm. 3, 2014, pp. 867-878

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

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

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

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

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. **P Da Biomassa Microbiana Em Solos Sob Diferentes Sistemas De Manejo** Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 24, núm. 3, Viçosa. 2000 p. 589-597

RHEINHEIMER, D.S. et al. **Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems.** Communications in Soil Science and Plant Analysis, v.33, n.13&14. 2002 p.1853- 1871

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

RHEINHEIMER, D.S.; CAMPOS, B.C.; GIACOMINI, S.J.; CONCEIÇÃO, P.C.; BORTOLUZZI, E.C. **Comparação de métodos de determinação de CO total no solo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32:435-440, 2008b.

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

RICHARDSON, A.E.; Hocking, P.J.; Simpson, R.J.; George, T.S. **Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus.** Crop Pasture Sci 60. 2009b. p.124–143

RICHARDSON, A.E.; Barea, J.M.; McNeill, A.M.; Prigent-Combaret, C. **Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms.** Plant Soil 321. 2009a. p.305–339

ROSS, D.J.; SPEIR, T.W.; KETTLES, H.A. & MACKAY, A.D. **Soil microbial biomass, C and N mineralization and enzymes activities in a hill pasture: influence of season and slowrelease P and sorption fertilizer.** Soil Biol. Biochem. 27:1431-1443, 1995.



SHIRADO, E. Y. N.; TAQUES, M. M. **Produtividade e teores foliares de nutrientes da soja em função de diferentes plantas de cobertura/2013**. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Agrônoma). Universidade Federal de Dourados, Mato Grosso do Sul. 2016.

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

SPEIR, T.W. & ROSS, D.J. **A comparison of the effects of air-drying and acetone dehydration on soil enzyme activities**. *Soil Biol. Biochem.*13. 1981. p.225-229

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 1989. 304p.

STEWART, J.W. & TIESSEN, H. **Dynamics of soil organic phosphorus**. *Biogeochem.* 1987. P 41-60

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.; BOHNEN, H.& VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 174p. (Boletim Técnico, 5) 1995.

TELES, A. P. B. et al. **Do cover crops change the lability of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers?** *British Society of Soil Science*. 2017 p11

TELES, A.P.B. **Influência de plantas de cobertura e fertilizantes fosfatados nas frações de fósforo e nos atributos químicos do solo/2014** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.

TIECHER, T. **Dinâmica do fósforo em solo muito argiloso sob diferentes preparos de solo e culturas de inverno/2011**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil 2011

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D.S.; CALEGARI, A. **Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long**

TIESSEN, H.; SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. **Nutrients and soil organic matter dynamic under shiftig cultivation in semi-arid northeastern Brazil**. *Agric. Ecosyst. Environ.*39. 1992. p.139-159

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.

TIVET, F. et al. **Assessing humification and organic C fractions by laser-induced fluorescence and FTIR spectroscopies in conventional and no-till methods in Brazil's sub-tropical and tropical agro-ecoregions.** *Geoderma*: 2013 p. 71–81

TOLEDO, J. A. et al. **Tampão Santa Maria (TSM) como alternativa ao tampão SMP para medição da acidez potencial de solos ácidos.** *Rev. Bras. Ciênc. Solo, Viçosa*, v. 36, n. 2, p. 427-435, Apr. 2012

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

VEZZANI, F.M; MIELNICZUK, J. **Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35. 2011 p. 213-223

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. 2010. p. 48–57,

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. 2010 p.18–29,

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.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. **A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil.** *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19. 1988 p.1467-1476

YU, T.R. **Chemical of variable charge soils.** 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

## **APÊNDICES**

**APÊNDICE 1** Valores de pH e Al+H de amostras de solo coletadas na camada de 0-10 cm de um Latossolo Vermelho cultivado sob SPD e convencional por longo período (Pato Branco-PR / 2015) na coleta pós colheita do milho (2014/2015), florescimento de inverno (2015) e florescimento da soja (2015/2016).

<b>MANEJO</b>	<b>pH<sub>H2O</sub></b>	<b>H + Al</b>
SCC	4,82 B	8,13 A
SPD	4,93 A	8,14 A
<b>ÉPOCA</b>		
Após colheita milho	4,53 b	6,96 c
Florescimento plantas	5,04 a	7,87 b
Florescimento soja	5,06 a	9,58 a
<b>ROTAÇÃO</b>		
Pousio	4,87 <i>b</i>	7,66 <i>cd</i>
Azevém	4,94 <i>ab</i>	7,63 <i>cd</i>
Centeio	4,91 <i>b</i>	8,18 <i>ab</i>
Ervilhaca Comum	4,66 <i>c</i>	9,50 <i>a</i>
Ervilhaca Peluda e Aveia Preta	4,86 <i>b</i>	7,96 <i>bcd</i>
Nabo	5,03 <i>a</i>	7,18 <i>d</i>
Trigo	4,86 <i>b</i>	8,85 <i>ab</i>
Mata nativa <sup>3</sup>	4,53	13,55

Letras maiúsculas iguais não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% para o tratamento de manejo; letras minúsculas iguais não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% para o tratamento de época; letras minúsculas em itálico não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% para o tratamento de rotação.

**APÊNDICE 2.** Estatística Tukey para P estocado na BMS (resultados transformados em log (x)) em função de manejos de solo, época de amostragem e rotação de cultura. Iapar - Pato Branco-PR, 2017.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Cultivo (F1)	1	2.51062	2.51062	117.1927 **
Época (F2)	2	3.97984	1.98992	92.8872 **
Rotação (F3)	6	0.34980	0.05830	2.7214 *
Int. F1xF2	2	0.02814	0.01407	0.6569 ns
Int. F1xF3	6	0.05120	0.00853	0.3983 ns
Int. F2xF3	12	1.08903	0.09075	4.2362 **
Int. F1x2x3	12	0.20420	0.01702	0.7943 ns

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

**APÊNDICE 3.** Estatística Tukey para P Resina em função de manejos de solo, época de amostragem e rotação de cultura. Iapar - Pato Branco-PR, 2017.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Cultivo (F1)	1	3241.65722	3241.65722	432.4737 **
Época (F2)	2	15.79690	7.89845	1.0537 ns
Rotação (F3)	6	160.39646	26.73274	3.5664 **
Int. F1xF2	2	135.09657	67.54829	9.0117 **
Int. F1xF3	6	129.96269	21.66045	2.8897 *
Int. F2xF3	12	631.92489	52.66041	7.0255 **
Int. F1x2x3	12	575.13302	47.92775	6.3941 **

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

**APÊNDICE 4.** Estatística Tukey para P Mehlich (resultados transformados em log (x)) em função de manejos de solo, época de amostragem e rotação de cultura. Iapar - Pato Branco-PR, 2017.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Cultivo (F1)	1	5.77242	5.77242	1032.2709 **
Época (F2)	2	0.02774	0.01387	2.4800 ns
Rotação (F3)	6	0.10833	0.01806	3.2289 **
Int. F1xF2	2	0.02984	0.01492	2.6685 ns
Int. F1xF3	6	0.31584	0.05264	9.4135 **
Int. F2xF3	12	0.22412	0.01868	3.3399 **
Int. F1x2x3	12	0.30497	0.02541	4.5447 ns

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

**APÊNDICE 5.** Estatística Tukey para Po NaOH em função de manejos de solo, época de amostragem e rotação de cultura. Iapar - Pato Branco-PR, 2017.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Cultivo (F1)	1	238698.49925	238698.49925	246.6700 **
Época (F2)	2	7230.92881	3615.46441	3.7362 *
Rotação (F3)	6	24899.38343	4149.89724	4.2885 **
Int. F1xF2	2	6248.37441	3124.18721	3.2285 *
Int. F1xF3	6	14963.23329	2493.87222	2.5772 *
Int. F2xF3	12	85537.61951	7128.13496	7.3662 **
Int. F1x2x3	12	18017.91564	1501.49297	1.5516 ns

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

**APÊNDICE 6.** Estatística Tukey para Pi NaOH em função de manejos de solo, época de amostragem e rotação de cultura. Iapar - Pato Branco-PR, 2017.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Cultivo (F1)	1	222450.51911	222450.51911	221.3403 **
Epoca (F2)	2	7523.78342	3761.89171	3.7431 *
Rotação (F3)	6	12927.64722	2154.60787	2.1439 ns
Int. F1xF2	2	739.48360	369.74180	0.3679 ns
Int. F1xF3	6	18104.27731	3017.37955	3.0023 *
Int. F2xF3	12	37371.17613	3114.26468	3.0987 **
Int. F1x2x3	12	7468.75188	622.39599	0.6193 ns

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

**APÊNDICE 7.** Estatística Tukey para Po Total em função de manejos de solo, época de amostragem e rotação de cultura. Iapar - Pato Branco-PR, 2017.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Cultivo (F1)	1	268520.10758	268520.10758	340.8716 **
Epoca (F2)	2	27533.24096	13766.62048	17.4760 **
Rotação (F3)	6	42388.51623	7064.75270	8.9683 **
Int. F1xF2	2	751.97060	375.98530	0.4773 ns
Int. F1xF3	6	7919.41414	1319.90236	1.6755 ns
Int. F2xF3	12	38369.81063	3197.48422	4.0590 **
Int. F1x2x3	12	25563.17101	2130.26425	2.7043 **

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

**APÊNDICE 8.** Estatística Tukey para Pi Total em função de manejos de solo, época de amostragem e rotação de cultura. Iapar - Pato Branco-PR, 2017.

QUADRO DE ANÁLISE

FV	GL	SQ	QM	F
Cultivo (F1)		11150850.11724	1150850.11724	74.8237 **
Época (F2)	2	167595.49034	83797.74517	5.4482 **
Rotação (F3)	6	711828.80110	118638.13352	7.7134 **
Int. F1xF2	2	14200.22690	7100.11345	0.4616 ns
Int. F1xF3	6	66535.07784	11089.17964	0.7210 ns
Int. F2xF3	12	501988.69913	41832.39159	2.7198 **
Int. F1x2x3	12	254111.78567	21175.98214	1.3768 ns

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )



## APÊNDICE 9. CORRELAÇÕES

