

**MURILO DALLA COSTA**

**Dinâmica biológica do fósforo em dois solos sob culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não micorrízicas**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Agroecossistemas, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Emílio Lovato

**FLORIANÓPOLIS**

**MAIO 2003**

Dalla Costa, Murilo

Dinâmica biológica do fósforo em dois solos sob culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não micorrízicas / Murilo Dalla Costa. – Florianópolis, 2003.

xii, 82 f.

Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina.

1. Biologia do solo. 2. Plantas de cobertura. 3. Fósforo. 4. Micorrizas. 5. Biomassa microbiana. 6. fosfatases. I. Título.

CDU - 631.46

Bibliotecária responsável: Sylvania de F. R. Dalla Costa - CRB 14/748

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO (MESTRADO) EM AGROECOSSISTEMAS

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**Dinâmica biológica do fósforo em dois solos sob culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não micorrízicas**

Dissertação submetida por *Murilo Dalla Costa* como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Agroecossistemas, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Paul Richard Momsen Miller  
(Presidente) CCA - UFSC

---

Prof. Dr. Fábio Kessler Dal Soglio  
Faculdade de Agronomia - UFRGS

---

Prof. Dr. Germano Nunes Silva Filho  
CCB - UFSC

---

Prof. Dr. Jucinei José Comin  
CCA - UFSC

**Aprovada em 30 de maio de 2003**

---

Prof. Dr. Paulo Emílio Lovato  
Orientador

---

Prof. Dr. José Antônio Ribas Ribeiro  
Coordenador do Curso

## AGRADECIMENTOS

A Silvania, minha esposa, companheira, namorada, por todo amor, atenção, carinho e incentivo;

Aos meus pais (Angelo e Geni) e meus irmãos (Sílvio e Ricardo), que mesmo longe, sempre estiveram perto de mim;

Ao professor Paulo Emílio Lovato, pelos conhecimentos transmitidos durante os anos de orientação nas bolsas de Iniciação Científica e no Mestrado;

Aos agricultores Renato Esser, Henrique Grabner e Erich Gropp, do município de Atalanta, e Giovani Galger, Sadi Alves Vieira, Egisto de Azevedo, do município de Campos Novos, que gentilmente permitiram as coletas de solo em suas propriedades e assim a realização do trabalho;

Aos engenheiros agrônomos da Epagri, Edson Silva e Cirio Parizotto, e ao engenheiro agrônomo Lauro, da Prefeitura Municipal de Atalanta, que forneceram todo o apoio logístico para a execução do trabalho a campo;

Aos servidores técnico-administrativos Francisco Vetúlio Wagner e Luiz Augustinho da Silva, pelo apoio nas análises de laboratório;

Aos colegas de laboratório Elisângela, Jailso, Fabiane, Jean, Vanessa, pelo auxílio prestado em diversos momentos, pelas discussões e pela amizade;

A CAPES, à Universidade Federal de Santa Catarina e ao Curso de Pós-Graduação em Agroecossistemas, pela concessão da bolsa de estudo, pela permissão de uso de laboratórios, equipamentos, materiais e reagentes, e pelo fornecimento de recursos financeiros para a realização do trabalho;

A todos os colegas de mestrado, em especial à Martha e à Maristela, pelas conversas e discussões sobre Dostoievski, Kafka e Camus.

<b>1</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>4</b>
<b>12</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>9</b>
<b>8</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>5</b>
<b>13</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>16</b>

Não é necessário sair de casa. Permaneça em sua mesa e ouça. Não apenas ouça, mas espere. Não apenas espere, mas fique sozinho em silêncio. Então o mundo se apresentará desmascarado. Em êxtase, se dobrará sobre seus pés.

*(Franz Kafka)*

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
<b>I. APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISÃO .....</b>	<b>5</b>
<b>II.1. Formas de fósforo no solo.....</b>	<b>5</b>
<b>II.2. Dinâmica do fósforo orgânico em solos agrícolas.....</b>	<b>8</b>
<b>II.3. Estratégias de obtenção de fósforo pela biota do solo.....</b>	<b>11</b>
II.3.1. Biomassa microbiana e a ciclagem de fósforo .....	13
II.3.2. Atividade de fosfatases no solo e mineralização de fósforo orgânico .....	17
II.3.3. Associações micorrízicas .....	21
<b>III.OBJETIVOS.....</b>	<b>26</b>
<b>Objetivo geral.....</b>	<b>26</b>
<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>26</b>
<b>IV. HIPÓTESE.....</b>	<b>26</b>
<b>V. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
<b>V.1. Caracterização geral dos locais de levantamento.....</b>	<b>27</b>
<b>V.2. Caracterização dos sistemas com manejo de plantas de cobertura .....</b>	<b>27</b>
V.2.1. Descrição geral dos sistemas agrícolas amostrados em Campos Novos	28
V.2.2. Descrição geral dos sistemas agrícolas amostrados em Atalanta.....	29
<b>V.3. Coleta e preparo das amostras .....</b>	<b>32</b>
<b>V.4. Análises preliminares .....</b>	<b>32</b>
V.4.1. Determinação da umidade gravimétrica .....	32
V.4.2. Determinação da capacidade de retenção de água .....	32

<b>V.5. Determinação do teor de fósforo extraível e do conteúdo de fósforo imobilizado na biomassa microbiana .....</b>	<b>33</b>
<b>V.6. Determinação da atividade de fosfatases .....</b>	<b>34</b>
<b>V.7. Determinação do conteúdo de fósforo na matéria orgânica .....</b>	<b>35</b>
<b>V.8. pH em água .....</b>	<b>36</b>
<b>V.9. Estatística .....</b>	<b>36</b>
<b>VI. RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
<b>VI. 1. Sistemas agrícolas amostrados em Campos Novos.....</b>	<b>37</b>
VI.1.1. Teores de fósforo extraível e fósforo da biomassa microbiana do solo ..	37
VI.1.2. Atividade de fosfatases ácidas no solo .....	40
VI.1.3. Atividade de fosfatases alcalinas no solo .....	41
VI.1.4. Teores de fósforo da matéria orgânica do solo.....	42
VI.1.5. pH do solo.....	43
VI.1.6. Análise de correlações entre as variáveis.....	44
<b>VI. 2. Sistemas agrícolas amostrados em Atalanta .....</b>	<b>47</b>
VI.2.1. Teores de fósforo extraível e fósforo da biomassa microbiana do solo ..	47
VI.2.2. Atividade de fosfatases ácidas no solo .....	50
VI.2.3. Atividade de fosfatases alcalinas no solo .....	51
VI.2.4. Teores de fósforo da matéria orgânica do solo.....	52
VI.2.5. pH do solo.....	53
VI.2.6. Análise de correlações entre as variáveis.....	54
<b>VII. DISCUSSÃO.....</b>	<b>58</b>
<b>VIII. CONCLUSÃO.....</b>	<b>71</b>
<b>IX. PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>72</b>
<b>X. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE TABELAS

- TABELA 1** - Atributos físicos e químicos de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico, coletadas na profundidade de 0 a 10 cm durante a quarta amostragem dos sistemas agrícolas de Campos Novos - SC ..... 31
- TABELA 2** - Atributos físicos e químicos de amostras de Cambissolo Háplico, coletadas na profundidade de 0 a 10 cm durante a quarta amostragem dos sistemas agrícolas de Atalanta - SC ..... 31
- TABELA 3** - Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre teores de fósforo extraível ( $P_{ext.}$ ), microbiano ( $P_{mic.}$ ) e orgânico ( $P_{org.}$ ), atividade de fosfatases ácidas ( $Pases\ ácidas$ ) e alcalinas ( $Pases\ alc.$ ) e pH de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico coletadas na plena floração das culturas hibernais de sistemas agrícolas de Campos Novos - SC ..... 45
- TABELA 4** - Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre teores de fósforo extraível ( $P_{ext.}$ ), microbiano ( $P_{mic.}$ ) e orgânico ( $P_{org.}$ ), atividade de fosfatases ácidas ( $Pases\ ácidas$ ) e alcalinas ( $Pases\ alc.$ ) e pH de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico coletadas na plena floração das culturas estivais de sistemas agrícolas de Campos Novos - SC ..... 45
- TABELA 5** - Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre teores de fósforo extraível ( $P_{ext.}$ ), microbiano ( $P_{mic.}$ ) e orgânico ( $P_{org.}$ ), atividade de fosfatases ácidas ( $Pases\ ácidas$ ) e alcalinas ( $Pases\ alc.$ ) e pH de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico coletadas no início da segunda estação de crescimento das culturas hibernais de sistemas agrícolas de Campos Novos - SC ..... 46
- TABELA 6** - Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre teores de fósforo extraível ( $P_{ext.}$ ), microbiano ( $P_{mic.}$ ) e orgânico ( $P_{org.}$ ), atividade de fosfatases ácidas ( $Pases\ ácidas$ ) e alcalinas ( $Pases\ alc.$ ) e pH de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico coletadas na segunda estação de floração das culturas hibernais de sistemas agrícolas de Campos Novos - SC ..... 46
- TABELA 7** - Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre teores de fósforo extraível ( $P_{ext.}$ ), microbiano ( $P_{mic.}$ ) e orgânico ( $P_{org.}$ ), atividade de fosfatases ácidas ( $Pases\ ácidas$ ) e alcalinas ( $Pases\ alc.$ ) e pH de amostras de Cambissolo Háplico coletadas na plena floração das culturas hibernais de sistemas agrícolas de Atalanta - SC ..... 55

- TABELA 8** - Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre teores de fósforo extraível ( $P_{ext.}$ ), microbiano ( $P_{mic.}$ ) e orgânico ( $P_{org.}$ ), atividade de fosfatases ácidas ( $Pases_{ácidas}$ ) e alcalinas ( $Pases_{alc.}$ ) e pH de amostras de Cambissolo Háplico coletadas na plena floração da cultura estival de sistemas agrícolas de Atalanta - SC .....56
- TABELA 9** - Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre teores de fósforo extraível ( $P_{ext.}$ ), microbiano ( $P_{mic.}$ ) e orgânico ( $P_{org.}$ ), atividade de fosfatases ácidas ( $Pases_{ácidas}$ ) e alcalinas ( $Pases_{alc.}$ ) e pH de amostras de Cambissolo Háplico coletadas no início da segunda estação de crescimento das culturas hibernais de sistemas agrícolas de Atalanta - SC ..... 56
- TABELA 10** - Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre teores de fósforo extraível ( $P_{ext.}$ ), microbiano ( $P_{mic.}$ ) e orgânico ( $P_{org.}$ ), atividade de fosfatases ácidas ( $Pases_{ácidas}$ ) e alcalinas ( $Pases_{alc.}$ ) e pH de amostras de Cambissolo Háplico coletadas na segunda estação de floração das culturas hibernais de sistemas agrícolas de Atalanta - SC .....57

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1** - Concentração de fósforo extraível (Mehlich-1), em  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio ..... 37
- FIGURA 2** - Concentração de fósforo da biomassa microbiana, em  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio ..... 38
- FIGURA 3** - Relação entre os teores de fósforo extraível e fósforo da biomassa microbiana de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio ..... 39
- FIGURA 4** - Atividade de fosfatases ácidas, em  $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol h}^{-1} \text{ g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio ..... 40
- FIGURA 5** - Atividade de fosfatases alcalinas, em  $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol h}^{-1} \text{ g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio ..... 41
- FIGURA 6** - Concentração de fósforo da matéria orgânica, em  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio ..... 42
- FIGURA 7** - Teor de fósforo microbiano, como porcentagem (%) do teor de fósforo orgânico, de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio ..... 43
- FIGURA 8** - pH de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio ..... 44

- FIGURA 9** - Concentração de fósforo extraível (Mehlich-1), em  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho .....48
- FIGURA 10** - Concentração de fósforo da biomassa microbiana, em  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho .....48
- FIGURA 11** - Relação entre os teores de fósforo extraível e fósforo da biomassa microbiana de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho .....49
- FIGURA 12** - Atividade de fosfatases ácidas, em  $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol h}^{-1} \text{ g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho .....50
- FIGURA 13** - Atividade de fosfatases alcalinas, em  $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol h}^{-1} \text{ g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho .....51
- FIGURA 14** - Concentração de fósforo da matéria orgânica, em  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho .....52
- FIGURA 15** - Teor de fósforo microbiano, como porcentagem (%) do teor de fósforo orgânico, de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho .....53
- FIGURA 16** - pH de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho .....54

## RESUMO

Os estudos sobre os fenômenos relacionados à velocidade de mobilização do fósforo no solo concentram-se em aspectos de ordem físico-químicas, havendo a necessidade de compreender melhor o papel da atividade biológica na ciclagem desse nutriente em sistemas agrícolas. Uma abordagem que leve em consideração os efeitos de manejos de plantas usados pelos agricultores e da atividade microbiana no solo pode auxiliar na identificação dos mecanismos envolvidos na dinâmica de transformações do fósforo. Com o objetivo de avaliar o efeito de plantas micorrízicas e não micorrízicas de cobertura sobre aspectos biológicos da dinâmica do fósforo, foi realizado um levantamento dos teores de fósforo extraível, fósforo microbiano e fósforo orgânico, da atividade de fosfatases ácidas e alcalinas e do pH em solos de sistemas de produção agrícola nos municípios de Campos Novos e Atalanta, Santa Catarina. Amostras de solo foram coletadas nos períodos de floração das plantas de cobertura hibernais e das culturas estivais que as sucederam, bem como nos estádios iniciais de crescimento e na floração das plantas de cobertura cultivadas em sucessão aos cultivos de verão. As plantas de cobertura micorrízicas foram aveia (*Avena strigosa*) e ervilhaca (*Vicia* sp.) e as não micorrízicas, nabo forrageiro (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) e tremoço branco (*Lupinus albus*). Nos sistemas sucessionais amostrados em Campos Novos, solo cultivado com nabo forrageiro apresentou maior acúmulo de fósforo na biomassa microbiana em relação às frações lábeis e orgânicas em comparação à aveia preta, na floração dessas espécies e na estação seguinte; tais efeitos não foram verificados nos demais períodos subsequentes de amostragem. A ausência de resultados consistentes nos sistemas avaliados em Campos Novos pode indicar que os parâmetros biológicos analisados foram regulados mais por variações temporais e espaciais das amostragens que pelas espécies vegetais em sucessão. Nos sistemas agrícolas em Atalanta, a atividade de fosfatases ácidas foi maior nos solos sob espécies não micorrízicas no período subsequente ao cultivo delas, indicando uma persistência da atividade enzimática. A atividade de fosfatases alcalinas foi maior nos solos com espécies não micorrízicas durante o ciclo das plantas de cobertura, mantendo-se no período de floração do milho, mas desaparecendo no novo cultivo de cobertura. O efeito sobre a atividade enzimática ligada à mineralização de fosfatos orgânicos no solo dependeu do caráter micorrízico ou não micorrízico das espécies utilizadas, e essa influência persistiu durante as estações de cultivos subsequentes. A maior atividade enzimática em solos com espécies não micorrízicas pode ser um mecanismo para o aumento de mobilização do fósforo no solo, em compensação à não formação de micorrizas.

## ABSTRACT

Studies about phosphorus mobilization in the soil have focused on physical and chemical factors, and there is a need to better understand the role of biological activity in the phosphorus cycling in agricultural systems. The effects of plant biomass management and microbial activity in the soil can help to identify mechanisms involved in phosphorus dynamics. In order to evaluate the effect of mycorrhizal and non mycorrhizal cover crops on biological aspects of phosphorus soil dynamics, a field evaluation of Mehlich-1-extractable phosphorus, organic phosphorus, microbial biomass phosphorus, acid and alkaline phosphatase activity and pH was carried out in soils of two regions in Santa Catarina, South Brazil. Soil samples were taken at the flowering stages of winter cover crops and summer cash crops, as well as at the beginning of growth and at flowering of cover crops following the summer crops. Mycorrhizal cover crops were black oats (*Avena strigosa*) and common vetch (*Vicia* sp.) and the non mycorrhizal covers were oilseed radish (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) and white lupin (*Lupinus albus*). In the region of Campos Novos, fields with oilseed radish showed higher microbial biomass phosphorus, as compared with soil under black oats, both during cover crops flowering and at the following summer season. Such effects did not occur in the second year of cover crops. The absence of consistent results in the systems evaluated in the Campos Novos region may indicate that biological parameters evaluated were regulated more by temporal and spatial variations than by the crop species. In the agricultural systems in the Atalanta region, activity of acid phosphatase was higher in soils under non mycorrhizal cover crops in summer, after their growth season, indicating a persistence of cover crop effects on enzymatic activity. The activity of alkaline phosphatases was higher in the soils with non mycorrhizal species during the cycle of the cover crops, remaining high during maize growth, but disappearing in the second season growth of the cover crops. The effects on the enzymatic activity linked to organic phosphorus mineralization of organic phosphorus depended on the mycorrhizal or non mycorrhizal status of the cover crop species, and such effects persisted during subsequent seasons. The higher enzymatic activity in soils with non mycorrhizal species may be part of mechanism to increase phosphorus mobilization in the soil, to compensate for the lack of the mycorrhizal association.

## **I. APRESENTAÇÃO**

---

A evolução dos conhecimentos sobre nutrição vegetal, a partir dos postulados de Liebig, influenciou a visão sobre a importância e o interesse do uso de elementos em formas inorgânicas na agricultura, promovendo o desenvolvimento das técnicas de produção e a expansão do uso de fertilizantes minerais. A indústria de fertilizantes teve um grande impulso após a I Guerra Mundial, com a utilização do processo Haber-Bosch para síntese de amônia, o qual possibilitou a produção e adoção em grande escala de adubos nitrogenados. Dessa forma, a agricultura inseriu-se com mais força na lógica mercantilista, tornando-se um grande negócio mundial.

O rápido crescimento ou “resposta” das plantas à aplicação de produtos “práticos”, que exigem pouca mão-de-obra e a elevação dos níveis de produtividade das culturas permitiram, entre outros eventos, o grande progresso no uso de fertilizantes inorgânicos. O desenvolvimento e a aplicação de conhecimentos relacionando a atividade biológica e o manejo da matéria orgânica com a ciclagem de nutrientes e a fertilidade do solo foram mantidos no segundo plano, constituindo uma área de estudo muitas vezes tratada como ramo ou subdivisão de outras áreas, com utilização em geral limitada a sistemas agrícolas chamados de alternativos, entre outras denominações.

O atendimento de interesses ligado à busca de altas produtividades cria preceitos para que a agricultura seja vista, de maneira geral, por uma perspectiva unilateral e compartimentada, constituída de uma cadeia produtiva onde o sistema solo-planta é simplificado em um processo linear de três fases: o material fertilizante é aplicado tornando-se disponível à planta no solo (entradas); os nutrientes disponíveis no solo são absorvidos pela planta; os nutrientes absorvidos pela planta são convertidos em um produto de interesse na planta (saídas). Assim, o final de cada fase é o início da próxima, em um sentido linear e unidirecional, podendo-se visualizar as funções de cada componente e a relação direta entre eles, o que permite a criação de gráficos comparando a quantidade de nutrientes aplicado com a resposta em crescimento ou produção de uma cultura. As relações existentes entre os componentes são avaliadas pelos valores de entrada e saída, e as funções intermediadas pelo solo, ignoradas. Nesse sentido, o solo atua como um meio hidropônico e estático, e a dinâmica que envolve os processos de transformações e disponibilização dos nutrientes - e sua interação

com a atividade biológica - recebem pouca importância.

O interesse sobre o fluxo de nutrientes nos manejos voltados a um critério produtividade, e baseados no modelo de entradas e saídas, está concentrado na sua disponibilização para as plantas, que é alcançado principalmente pelo uso de fertilizantes solúveis. Em contraposição, em uma agricultura voltada à sustentabilidade, a questão principal é a manutenção da fertilidade com a minimização das perdas no sistema, considerando ainda todo o contexto produtivo, social e cultural em que o agricultor está envolvido. Não é possível afirmar que um sistema ou outro seja “ideal” ou superior, pois os critérios visam interesses diferentes. Entretanto, nesta última abordagem, a pesquisa em solos pode trazer contribuições promissoras para o desenvolvimento de sistemas agrícolas que levem em consideração tanto a produtividade das culturas quanto a manutenção da qualidade do solo.

Sistemas de produção agrícola inseridos nessa perspectiva e voltados ao critério de produtividade foram difundidos e utilizados, estando vigentes em muitas áreas de cultivo em Santa Catarina. Em muitas situações, essa ótica de manejo dos nutrientes esteve associada ao emprego de procedimentos como o revolvimento das camadas superficiais do solo, as quais, por sua vez, aumentaram a degradação do solo, refletindo-se em diminuição nos índices de produtividade das culturas devido à aceleração do processo erosivo, lixiviação de nutrientes solúveis e decréscimo na disponibilidade deles às plantas, bem como diminuição no teor de matéria orgânica e na atividade microbiana do solo. O manejo do solo também se tornou um fator importante em problemas de âmbito mais amplo, como a contaminação de recursos hídricos e o assoreamento de cursos d'água e enchentes que daí decorrem.

O uso de culturas de cobertura, no período que precede as espécies de cunho econômico, é uma alternativa de manejo com grande potencial para diminuir o processo de degradação e para aumentar a fertilidade dos solos agrícolas. Embora possa trazer uma série de benefícios, muitas vezes há dificuldades na sua adoção, devido ao manejo inadequado das espécies de cobertura e pela falta de conhecimento de suas características de crescimento. Entretanto, existem questões de natureza mais ampla; o manejo de plantas de cobertura tem muitas vezes uma baixa aceitação pelos agricultores devido à necessidade aparentemente maior de mão-de-obra, quando comparado ao sistema convencional (MONEGAT, 1991). Motivos de ordem econômica, advindos da crescente descapitalização dos agricultores, tornam necessária a busca de rendas imediatas, através da exploração máxima dos recursos disponíveis, dificultando a utilização de práticas que tragam pouco retorno econômico em um

prazo relativamente curto.

Embora haja essas limitações, o cultivo de plantas de cobertura antecedendo às culturas comerciais na produção de grãos em sistemas sem o revolvimento do solo está difundido em pequenas propriedades de diversas regiões de Santa Catarina, como no Alto Vale do Itajaí e na região de Campos Novos. A escolha das espécies é determinada por fatores que enfatizam a produção de biomassa da parte aérea para a nutrição animal, e ao efeito da cobertura vegetal na superfície do solo no controle físico da erosão e supressão de espécies espontâneas. No entanto, outros efeitos relevantes podem ser obtidos pelo uso de plantas de cobertura. Em comparação ao sistema convencional, o manejo correto destas espécies pode diminuir a necessidade da mão-de-obra do agricultor durante as etapas do processo produtivo (MONEGAT, 1991). Em relação à fertilidade do solo, o preparo de solo sem revolvimento em associação ao cultivo de plantas de cobertura leva à diminuição nas taxas de decomposição da matéria orgânica.

Entretanto, são relativamente poucos os estudos sobre a interação entre culturas de cobertura, componentes biológicos do solo e ciclagem de nutrientes. O manejo de plantas leguminosas em rotação ou sucessão como plantas de cobertura tem recebido a maior ênfase nos estudos sobre ciclagem de nutrientes, pela fixação de nitrogênio atmosférico resultante da simbiose entre bactérias do grupo dos rizóbios e raízes dessas espécies. Os efeitos das plantas de cobertura na ciclagem e disponibilidade de fósforo e na atividade biológica do solo são pouco conhecidos, ou, quando o são, decorrem de conhecimentos predominantemente empíricos. As plantas de cobertura participam na ciclagem dos nutrientes, absorvendo resíduos de fertilizantes aplicados nos cultivos estivais anteriores, incorporando-o temporariamente na biomassa e impedindo perdas por lixiviação - caso do nitrogênio - ou fixação química - caso do fósforo, os quais retornam ao solo como componente da fração orgânica através dos restos culturais. Durante o crescimento, essas plantas obtêm o fósforo a partir da fração disponível e pode ocorrer, de acordo com a espécie, um melhor aproveitamento das fontes menos solúveis através de modificações físico-químicas da rizosfera, envolvendo mecanismos como a liberação de ânions de ácidos orgânicos e prótons ( $H^+$ ) ou a atividade de enzimas como as fosfatases. Além de concorrer diretamente para a obtenção de fósforo ao metabolismo vegetal, essas alterações no ambiente rizosférico podem regular as populações de microorganismos, os quais, por sua vez, podem ser mais eficientes na mineralização e na solubilização do fósforo orgânico e mineral, respectivamente. Dessa maneira, são interessantes e necessárias análises mais aprofundadas sobre a interação entre

culturas de cobertura, componentes biológicos do solo e ciclagem do fósforo.

Nos últimos anos houve avanços sobre o conhecimento dos processos envolvendo aporte de nutrientes e água pelas raízes, em condições ideais ou onde os nutrientes estão em quantidades limitantes. Em muitas situações os trabalhos foram realizados em ambientes controlados, removidos da complexidade existente nas condições de campo, ou então em condições idealizadas, onde freqüentemente fornecem-se nutrientes em nível de disponibilidade acima do encontrado nos solos agrícolas cultivados (McCULLY, 1999). Estudos de laboratório, e mesmo em parcelas experimentais, têm uma grande utilidade exploratória e de desenvolvimento de metodologia, mas podem trazer resultados não condizentes com a realidade dos cultivos a campo, pois não consideram muitos aspectos da realidade do agricultor (BYÉ, 2000). Além dos benefícios que determinam a forma de escolha das plantas de cobertura pelos agricultores, a utilização destas espécies em sistemas de sucessão ou rotação de culturas pode implicar modificações na atividade biológica ligada à ciclagem de nutrientes, as quais, embora possam ser importantes para a fertilidade do solo, continuam de certa forma obscuras e pouco conhecidas. O estudo de processos relacionados à ciclagem biológica do fósforo em sistemas agrícolas pode auxiliar na compreensão dos níveis de modificações determinadas pelo manejo de populações de plantas de cobertura sobre a manutenção da qualidade do solo e da produção agrícola.

Nesse sentido, esse trabalho consistiu na análise de parâmetros biológicos relacionados à dinâmica do fósforo no solo, com ênfase no caráter micorrízico das espécies de cobertura utilizadas em sistemas de produção agrícola de propriedades rurais de Campos Novos e Atalanta - SC.

## **II. REVISÃO**

---

### **II.1. Formas de fósforo no solo**

O fósforo (P) encontra-se no solo na forma de fosfatos, em concentrações entre 200  $\mu\text{g g}^{-1}$  solo a 5.000  $\mu\text{g g}^{-1}$  solo e em média 500  $\mu\text{g g}^{-1}$  solo. Essa variação é dependente do processo evolutivo do material de origem do solo, submetido a uma determinada intensidade de intemperização, e do sistema de cultivo utilizado, no caso de solos agrícolas (KUCEY et al., 1989). Os processos geoquímicos de intemperização, a partir de minerais primários, produzem novos compostos e promovem a solubilização de fósforo; bactérias, fungos e plantas incorporam parte do fosfato em sua biomassa, realizando a ciclagem desse nutriente através da fração orgânica do solo (RHEINHEIMER et al., 1999). O fósforo encontra-se no solo na forma inorgânica - em compostos insolúveis (minerais apatíticos e fosfatos de cálcio, por exemplo) ou como íons ortofosfato solúveis ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) - e na forma orgânica - como ortofosfato de monoésteres e diésteres, ligado a compostos húmicos ou imobilizado na biomassa microbiana do solo (ADDISCOTT & THOMAS, 2000). Dependendo do material de origem e do estágio de desenvolvimento do solo, a fração orgânica do fósforo representa entre 5 a 80% do fósforo total na camada de 0 a 20 cm (RHEINHEIMER et al., 1999), alcançando entre 45% a 68% em solos do Rio Grande do Sul (MACHADO et al., 1993).

Em regiões tropicais e subtropicais, devido ao alto grau de intemperismo dos solos, o fósforo é um dos principais fatores limitantes ao crescimento e produção de culturas agrícolas (RHEINHEIMER et al., 1999). O intemperismo promove mudanças graduais nas características químicas do solo, no sentido de torná-lo mais eletropositivo, diminuindo a saturação de bases e aumentando a retenção de ânions nas superfícies minerais (NOVAIS & SMYTH, 1999). As situações de baixa concentração de hidroxilas em solos ácidos favorecem a retenção do fósforo da solução, principalmente nas superfícies de óxidos de alumínio e ferro ou de minerais de argila. Íons ortofosfato formam complexos de esfera-interna com esses óxidos, através de ligações covalentes diretamente ao grupo funcional, envolvendo troca de

ligantes  $\text{OH}^-$  e  $\text{OH}_2^-$  das superfícies minerais por fosfatos da solução. O grau energético dessas ligações gradualmente tende à irreversibilidade do fenômeno, pela formação de quelatos que mantêm o fósforo em formas não disponíveis e de solubilização difícil ou lenta (MENGEL, 1997; MEURER et al., 2000).

Em termos gerais, as formas solúveis dos nutrientes tornam-se disponíveis à superfície de absorção do sistema radicular através dos processos de interceptação radicular, fluxo de massa e difusão. Em relação ao fósforo, este último mecanismo é o mais importante; o processo difusivo ocorre na presença de gradiente de concentração, o qual promove o movimento de íons ortofosfato de uma zona de alta concentração na solução do solo em direção a uma de baixa concentração. Assim, quanto maior a quantidade de fósforo em solução, maior será o gradiente de concentração, e quanto menor a possibilidade dos íons ortofosfato serem interceptados, devido a adsorção às partículas do solo, por exemplo, maior será o grau de difusão do fósforo para a superfície do sistema radicular (BOLAN, 1991; NOVAIS & SMYTH, 1999).

Segundo o entendimento atual, o fósforo - em relação à disponibilidade às plantas e à microbiota do solo - pode encontrar-se em três formas: solúvel, lábil e fixo ou indisponível (NOVAIS & SMYTH, 1999). Apenas o fósforo da solução do solo, na forma inorgânica de íons ortofosfato, é considerado diretamente disponível ao sistema radicular e à microbiota do solo (RHEINHEIMER et al., 1999) e, em termos relativos, constitui uma fração ínfima, em torno de 0,1% do fósforo total do solo (NOVAIS & SMYTH, 1999). O fósforo lábil do solo corresponde às fontes potencialmente mobilizáveis de origem mineral ou orgânica, que mantêm em equilíbrio a concentração de fósforo da solução, repondo, mesmo que parcialmente, os íons ortofosfato absorvidos pelo sistema radicular ou pelos microorganismos ou exauridos por processos de imobilização nas frações orgânicas e minerais e por lixiviação (NOVAIS & SMYTH, 1999). A quantidade das frações mobilizável e solúvel depende do grau de intemperismo, das características químicas e físicas e da atividade biológica do solo e da vegetação predominante que utiliza o nutriente (RHEINHEIMER et al., 1999).

Apesar dos termos “lábil” e “indisponível” serem definidos a partir do critério disponibilidade, não existe um limite entre essas fases; a divisão é difusa e de difícil caracterização. Nesse sentido, Hedley et al. (1982) desenvolveram um método de extração sequencial de fósforo, que permite uma interpretação melhor das fases desse nutriente no solo, podendo-se associar as definições acima ao grau energético de retenção às frações minerais e orgânicas e à velocidade de disponibilização à biota do solo. Tal método baseia-se na

separação e caracterização do fósforo extraído por resina trocadora de ânions e por soluções ácidas e alcalinas de concentrações diferentes, que possibilitam estimar as frações lábeis e não lábeis, identificando as mais estáveis, em ordem decrescente de disponibilidade para a biota do solo. No sentido prático, a separação do fósforo do solo dentro de frações pode ser usada para identificar e avaliar as mudanças que induzem a mobilização ou imobilização das fontes orgânicas e inorgânicas desse nutriente, por exemplo, em sistemas agrícolas com diferentes planos de rotação de culturas ou de regimes de fertilização.

Com base no método de fracionamento sequencial acima, Tiessen et al. (1984) propuseram um modelo teórico-conceitual para o ciclo do fósforo do solo, fundamentado na velocidade de passagem do nutriente para a solução do solo. Nessa ótica, as fontes de ciclagem rápida regulam a concentração de fósforo em solução, através das transformações das formas orgânicas lábeis e moderadamente lábeis, onde se inclui a biomassa microbiana, e através da mobilização do fósforo inorgânico associado às superfícies minerais. O fósforo ligado à matéria orgânica protegida química e fisicamente e as formas cristalinas mais estáveis da fração mineral atuam como um depósito ou reservatório de disponibilização lenta do nutriente.

Além de ser usado para distinguir as formas de fósforo de acordo com a disponibilidade à biomassa, o fracionamento sequencial de Hedley et al. (1982) permite separar o fósforo no solo nas formas orgânica ou biológica e geoquímica. Essa classificação mostrou, em solos com diferentes estágios de desenvolvimento, ser mais sensível a mudanças na distribuição do fósforo do que a separação tradicional em formas lábeis e não lábeis (CROSS & SCHLESINGER, 1995). Essa interpretação possivelmente pode ser usada para a avaliação de sistemas agrícolas, em função do manejo do solo, do tipo de fertilizante e da rotação de culturas utilizada, no sentido de destacar a importância das frações minerais e orgânicas na ciclagem e mobilização do fósforo (RHEINHEIMER et al., 1999).

Os modelos atuais de ciclagem no sistema solo-planta avaliam a eficiência de uso dos nutrientes através da relação entre as quantidades de nutrientes aplicadas e a produtividade ou produção de matéria seca da cultura em questão (VAN NOORDWIJK & DE WILLIGEN, 1986). Nesse sentido, a recomendação de fertilizantes fundamenta-se na análise do fósforo extraível - correspondente às fontes inorgânicas mais disponíveis - e nos níveis a serem atingidos dessa fração do fósforo para a manutenção da produção de determinada cultura. Os fertilizantes manejados para a manutenção do equilíbrio de fósforo em solução, especialmente formas minerais industrializadas e de solubilidade alta, são tratados como uma via de aporte

direta do nutriente ao metabolismo vegetal, pela saturação dos sítios de troca nas superfícies do solo e rápida passagem do nutriente para formas solúveis.

Os processos ligados à ciclagem de nutrientes no sistema solo-planta possuem uma complexidade maior, pois um número considerável de fenômenos está envolvido na transformação e na velocidade de mobilização dos nutrientes para as plantas. A compreensão dessa dinâmica ainda é limitada, principalmente em relação ao fósforo (NOVAIS & SMYTH, 1999). O balanço do fósforo concentra-se na sua disponibilização a partir de formas inorgânicas de rápida mobilização, fazendo-se necessário estabelecer a importância da dinâmica das formas orgânicas, e mesmo de formas menos disponíveis ou de mobilização mais lenta, no balanço do nutriente e na contribuição para as fontes disponíveis.

## ***II.2. Dinâmica do fósforo orgânico em solos agrícolas***

A composição das diferentes frações de fósforo é afetada por processos geoquímicos associados ao intemperismo, que promovem mudanças graduais nas características minerais do solo. O domínio das frações mais estáveis de fósforo sobre as fontes disponíveis indica que as reações geoquímicas regulam a disponibilidade desse nutriente para a biota do solo (CROSS & SCHLESINGER, 1995). Esses autores avaliaram dados de literatura de 88 solos de diferentes classes taxonômicas, fracionados conforme o procedimento descrito por Hedley et al. (1982); eles concluíram que a contribuição das fontes orgânicas para as frações lábeis ou de ciclagem rápida aumenta com o grau de intemperismo do solo, decorrente da passagem de fosfato da fração mineral primária para as fontes orgânicas estáveis durante o desenvolvimento do solo. Em solos com alto grau de intemperismo, Tiessen et al. (1984) constataram que as fontes orgânicas responderam por 80% da variação do fósforo disponível, sugerindo que a fertilidade em fósforo de solos desenvolvidos está estreitamente relacionada com a ciclagem do fósforo orgânico.

Os processos biológicos têm um papel preponderante na ciclagem rápida e na mobilização de fósforo, principalmente em ecossistemas como pastagens naturais ou florestas, onde o equilíbrio das formas disponíveis é mantido através da mineralização constante da matéria orgânica e do fluxo de fósforo pela biomassa microbiana (CROSS & SCHLESINGER, 1995; SHARPLEY, 1985). Estudos feitos em experimentos de longa

duração demonstraram que esse equilíbrio também ocorre em solos com o cultivo contínuo e sem adição de fertilizantes, promovendo, em consequência, o declínio gradual das fontes orgânicas (BECK & SANCHEZ, 1994; BOWMAN et al., 1990; HEDLEY et al., 1982).

O nível de fósforo disponibilizado pelos processos biológicos e geoquímicos, capaz de manter uma população vegetal nativa adaptada às condições de fertilidade do ambiente, pode não ser suficiente para suprir o crescimento de espécies exploradas na agricultura, especialmente culturas de ciclo curto e alta produtividade. A aplicação de fertilizantes busca cobrir esse déficit, enfatizado-se principalmente o uso de formas de rápida solubilização. Embora resulte em um aumento imediato no teor de fósforo em solução, a afinidade química do fósforo com as superfícies do solo e a atividade biológica tendem a estabilizar em formas minerais e orgânicas uma parcela significativa do nutriente aplicado. A fração que não teve aporte direto às plantas passa a constituir, em um primeiro momento, uma fração residual de mobilização rápida, aumentando as fontes inorgânicas lábeis e moderadamente lábeis do nutriente e o fósforo imobilizado na biomassa microbiana. Tais formas gradualmente tendem a entrar em um equilíbrio dinâmico com as formas de ciclagem mais lenta, ocorrendo assim o declínio no nível de fósforo disponível (McCOLLUM, 1991; SELLES et al., 1995; TIESSEN et al, 1984).

Em solos brasileiros, o grau de recuperação de fertilizantes pode ser baixo, como foi verificado em Latossolos sob Cerrado, onde o uso de extrações sucessivas recuperou em torno de 35 a 57% da quantidade de fósforo aplicado (CAMPELLO et al., 1994). A agricultura tende a acelerar o processo de intemperização, aumentando os teores de óxidos e, em consequência, a retenção de fósforo nas superfícies do solo. No trabalho de Motta et al. (2002) foi constatado o predomínio de compostos fosfatados de lenta mobilização em Latossolos de Minas Gerais e Espírito Santo, destacando-se formas orgânicas associados a compostos húmicos em solos com vegetação nativa e formas inorgânicas ligadas a óxidos de alumínio e ferro nos solos cultivados.

Medidas visando ao aumento da fração orgânica podem restringir e regular a fixação de fósforo, aumentando o grau de recuperação do nutriente aplicado através de fertilizantes e contribuindo assim para seu uso mais eficiente no solo. Em um estudo realizado com solos de diferentes classes taxonômicas, Guerra et al. (1996) constataram que o fósforo orgânico em Latossolos representou, em termos relativos, até 89% da fração de fósforo lábil do solo. Esse fato evidencia o potencial de contribuição da fração orgânica na manutenção da ciclagem do fósforo, devido a sua fraca ligação à fase sólida do solo e maior acessibilidade à

mineralização promovida pela biota do solo (GUERRA et al., 1996).

A avaliação de sistemas agrícolas com o manejo de fertilizantes na forma orgânica tem demonstrado que seu uso pode promover acúmulos graduais de fósforo nas fontes inorgânicas e orgânicas, aumentando as fontes lábeis e as mais estáveis (MOTAVALLI & MILES, 2002). Os teores mais elevados de fósforo protegido quimicamente nos substratos orgânicos representam uma reserva que pode ser rapidamente mineralizada a formas disponíveis, em função da maior atividade de enzimas fosfatases nos sistemas de cultivo com manejo de fertilizantes orgânicos (OBERSON et al., 1996). Avaliando as mudanças nas fontes orgânicas e inorgânicas de fósforo em solos do Peru cultivados por 18 anos, Beck & Sanchez (1994) constataram que em sistemas fertilizados as fontes de fósforo inorgânico representaram 96% da variação no nível de fósforo disponível. Por outro lado, as formas estáveis e lábeis de fósforo orgânico foram a fonte primária de fósforo disponível em sistemas não fertilizados, explicando 44% da variação. A aplicação de fertilizantes fosfatados, associada a práticas que reduzem o revolvimento do solo ou que promovem o acúmulo de matéria orgânica, pode aumentar a imobilização de fósforo em formas orgânicas, mantendo o nutriente dentro de um ciclo regulado pela atividade biológica e evitando a sua retenção em compostos minerais que são relativamente mais estáveis e de disponibilização mais lenta.

Os trabalhos citados demonstram que a dinâmica de disponibilidade de fósforo em sistemas agrícolas com o manejo de fertilizantes orgânicos difere de sistemas convencionais que utilizam fertilizantes minerais. Os métodos tradicionais para estimativa de fertilidade dos solos em fósforo, avaliada pelo uso de extratores que solubilizam as formas de fósforo inorgânico, podem ter correlações fracas com o aporte vegetal em sistemas agrícolas dependentes da ciclagem da fração orgânica ou com o uso de fertilizantes na forma orgânica. Nessas situações, as formas mais estáveis de fósforo orgânico e inorgânico, por efeito da atividade biológica, podem estar envolvidas na disponibilização do nutriente. Tiessen et al. (1984) ressaltam que isso pode explicar as várias dificuldades encontradas na avaliação de fertilidade em fósforo de solos tropicais e subtropicais, sugerindo que estudos sobre a importância das formas lábeis do fósforo orgânico na disponibilidade do nutriente podem contribuir para avanços nos métodos de análise do solo.

Existe pouca informação sobre a importância do fósforo orgânico como uma fonte disponível em solos agrícolas, dando-se mais ênfase ao fósforo inorgânico aplicado através de fertilizantes solúveis (NOVAIS & SMYTH, 1999; SHARPLEY, 1985). Os estudos envolvendo a disponibilidade de fósforo estão concentrados na dinâmica da fase inorgânica

deste elemento (RHEINHEIMER et al., 1999), e os conhecimentos sobre a ciclagem do fósforo orgânico, dessa forma, ainda são limitados. O estudo dos processos de transformações biológicas ligadas à dinâmica do fósforo pode proporcionar ferramentas para auxiliar o entendimento e avaliação de interações solo-planta e de sistemas agrícolas e para caracterizar a importância da biota na fertilidade do solo. A compreensão das funções dos componentes biológicos e suas relações com as propriedades físico-químicas do solo podem contribuir para o estabelecimento de um modelo mais definido de ciclagem do fósforo.

### ***II.3. Estratégias de obtenção de fósforo pela biota do solo***

O fósforo é um nutriente que tem posição de destaque nos seres vivos, pela sua função estrutural e funcional e por sua atuação na transferência de energia (SCHACHTMAN et al., 1998). Este elemento é constituinte das moléculas de DNA e RNA, que participam nos processos de reprodução dos organismos, e componente essencial das moléculas de ADP e ATP, que regulam todos os processos vitais envolvendo energia (TSAI & ROSSETO, 1992). Após o nitrogênio (N), geralmente é o nutriente mais limitante do crescimento vegetal (SCHACHTMAN et al., 1998).

As estratégias desenvolvidas pelas plantas e microorganismos para a aquisição do fósforo do solo estão fundamentadas no equilíbrio existente entre sua mobilização e imobilização, no sentido de manter esse nutriente relativamente escasso em um ciclo biológico, evitando perdas por fixação química em formas pouco disponíveis ou não reversíveis. A microbiota está envolvida em uma série de processos que afetam as transformações das formas de fósforo no solo, constituindo dessa forma um componente ativo no ciclo desse nutriente. Por meio de associações micorrízicas, processos de solubilização e mineralização do fósforo a partir de fontes inorgânicas e orgânicas, e do próprio fluxo deste nutriente pela biomassa, a microbiota participa da ciclagem do fósforo no solo e, em consequência, na sua disponibilidade ao metabolismo vegetal.

A reatividade e a baixa concentração de fósforo na solução do solo fazem com que a capacidade das plantas em absorver íons ortofosfato dependa de fatores críticos ligados à atividade biológica. Em ecossistemas naturais, onde os solos não recebem adições de fertilizantes, e em solos com uma grande capacidade de fixação de fosfatos, a disponibilidade

de fósforo é controlada principalmente pela reciclagem do fósforo contido nos organismos vivos. Através dos processos de mineralização da matéria orgânica e solubilização de formas minerais, diversos grupos de fungos e bactérias utilizam o fósforo de forma mais eficiente que as plantas (KUCEY et al., 1989), incorporando o nutriente na biomassa microbiana e assim passando formas indisponíveis para fontes de ciclagem mais rápida e acessíveis ao metabolismo vegetal.

Além da microbiota de vida livre no solo, as associações micorrízicas, simbioses de caráter íntimo entre determinados fungos do solo e as raízes das plantas, possuem um papel importante no fluxo do fósforo para o metabolismo vegetal. Nessa questão, os efeitos benéficos das micorrizas para as plantas derivam da maior eficiência no aporte de nutrientes, por exemplo, através das relações das estruturas dos fungos associados com características morfológicas das raízes, e que deste modo determinam o volume total de solo explorado pelo sistema radicular.

Os processos biológicos de transformações e ciclagem das formas de fósforo ocorrem principalmente na rizosfera. Todo o fósforo absorvido pelas plantas passa através do ambiente rizosférico, e provavelmente a mobilização das fontes importantes deste nutriente e sua subsequente disponibilidade ao sistema radicular são mediadas pela microbiota (RICHARDSON, 1994). O solo sob influência do sistema radicular tem propriedades químicas, físicas e biológicas que são diferentes do restante do solo. A constante renovação do sistema radicular, especialmente em espécies vegetais de ciclo curto, torna dinâmico o restabelecimento do ambiente rizosférico e o desenvolvimento de uma rizosfera funcional, visando a manutenção do balanço de energia no solo e o fluxo de nutrientes no sistema planta-microbiota (ATKINSON & WATSON, 2000).

Os vegetais podem concorrer, de forma direta, para a obtenção de fósforo através de alterações na concentração iônica, em consequência do gradiente de concentração criado pelo aporte de água e nutrientes; mudanças no pH, pela liberação de ácidos orgânicos com baixo peso molecular, para a solubilização de íons fosfato; e excreção de enzimas fosfatases para a catálise da hidrólise de fósforo a partir de fontes orgânicas (GREGORY & HINSINGER, 1999). Compostos moleculares liberados pelo sistema radicular, relacionados ou não à mobilização direta de fósforo, podem atuar como mecanismos indiretos para a obtenção de fósforo, por meio da regulação da ecologia das comunidades microbianas. Tais compostos, além de servir como fonte de carbono (C) para o crescimento microbiano, estimulam a locomoção de microorganismos para o solo próximo do sistema radicular (DAKORA &

PHILLIPS, 2002).

Darrah (1993), citado por Gregory & Hinsinger (1999), fez uma revisão sobre o papel da rizosfera na nutrição vegetal, onde procurou quantificar as mudanças mediadas pelas raízes nas propriedades físicas, químicas e biológicas e nos processos do solo rizosférico. Esse autor concluiu que muitos mecanismos operam de forma paralela, o que dificulta a diferenciação entre os processos microbianos e os de origem vegetal e o papel de cada um na mobilização de nutrientes. Assim, a aquisição de fósforo pelas plantas pode envolver combinações de arquitetura e comprimento radicular, pêlos radiculares e micorrizas, produção de enzimas fosfatases pela microbiota e pelas plantas. A inexistência de limites definidos entre as diferentes vias de disponibilização de fósforo para a absorção radicular denota a complexidade envolvida no conjunto de relações simbióticas entre os componentes vegetais e microbianos e desses com as frações minerais do solo e, em consequência, no equilíbrio entre a mobilização e imobilização dos nutrientes.

A existência de respostas da microbiota à presença de exsudatos radiculares no solo, e respostas da planta pela presença de microorganismos, sugere um grau de co-evolução e interdependência entre vegetais e a microbiota do solo (ATKINSON & WATSON, 2000). Assim, pode-se admitir que os processos de obtenção de fósforo pelas plantas que ocorrem na interface solo-sistema radicular estão relacionados, de forma direta, com a demanda do nutriente e, indiretamente, pela criação de um ambiente favorável que regula o crescimento de comunidades de microorganismos, as quais, por sua vez, auxiliam as plantas na disponibilização do nutriente.

### *II.3.1. Biomassa microbiana e a ciclagem de fósforo*

A biomassa microbiana é definida como a parte da matéria orgânica do solo formada por microorganismos vivos - bactérias, fungos, protozoários, algas e microfauna - menores que  $5 - 10 \mu\text{m}^3$  (ALEF & NANNIPIERI, 1995). A decomposição e mineralização de resíduos vegetais no solo são reguladas pela atividade microbiana, que utiliza esse substrato como fonte de energia e nutrientes para sua formação e na síntese de substâncias orgânicas (GAMA-RODRIGUES, 1999). A microbiota do solo constitui uma fração lábil da matéria orgânica, contendo uma quantidade de fósforo potencialmente disponível ao metabolismo

vegetal. A morte e lise das células microbianas liberam compostos fosfatados solúveis, os quais podem ser re-imobilizados pela geração seguinte de microorganismos, absorvidos pelo sistema radicular, ou então reagir com os colóides do solo, ficando adsorvido às superfícies minerais e orgânicas de onde podem retornar ou não à solução do solo.

Atualmente é enfatizado o uso de indicadores biológicos, associados aos indicadores físicos e químicos já utilizados, como um instrumento de monitoramento da qualidade do solo (GAMA-RODRIGUES, 1999). Parâmetros ligados à biomassa microbiana são utilizados como indicadores biológicos do solo (TURCO et al., 1994), e por sua relação no sistema solo-planta, respondem de maneira mais sensível a mudanças no uso do solo do que atributos físico-químicos (POWLSON et al., 1987), possuindo assim um potencial para a avaliação de alterações de manejo em sistemas agrícolas.

Em geral, observam-se valores superiores de nutrientes imobilizados na microbiota em solos de áreas de pouca interferência humana, como pastagens, onde o sistema radicular denso e sua renovação constante permitem o estabelecimento de populações microbianas maiores do que sistemas cultivados (CATTELAN & VIDOR, 1990a). Estudo conduzido em solos da Índia por Srivastava & Singh (1988) mostraram que os teores de fósforo microbiano variaram de 17 a 35  $\mu\text{g g}^{-1}$  solo em solos cultivados com milho e de pastagem, respectivamente. Resultado em proporção semelhante foi constatado por Fernandes et al. (1998) em Nitossolo de Minas Gerais, onde o fósforo imobilizado pela biomassa microbiana foi de 5  $\mu\text{g g}^{-1}$  solo em solo cultivado com culturas anuais e 9  $\mu\text{g g}^{-1}$  solo em solos de pastagem e.

Em clima temperado, Brookes et al. (1984) estimaram, em média, 11,5  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo presente na biomassa microbiana em solos cultivados e 106  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo em solos de pastagem permanente, que representaram em torno de 3,0% e 13,7% do total de fósforo orgânico, respectivamente. Comparando os resultados obtidos e os históricos dos solos, esses autores atribuem a diminuição ou o aumento das frações orgânicas de fósforo como uma relação direta da mudança no conteúdo do nutriente na biomassa de microorganismos. Assim, após 20 anos de cultivo com o revolvimento do solo, o declínio no fósforo da biomassa microbiana representou a metade do declínio no teor de fósforo orgânico no mesmo período; a reversão de sistema agrícola para floresta dobrou o teor de fósforo orgânico em 100 anos, enquanto a biomassa microbiana aumentou em torno de 11 vezes a sua fração inicial.

Os processos biológicos têm um papel importante no fluxo de nutrientes em ecossistemas naturais, onde a biomassa microbiana atua tanto como depósito e fonte de

nutrientes, regulando assim a disponibilidade do fósforo e de outros nutrientes ao crescimento vegetal (SINGH et al., 1989). O fluxo anual médio de fósforo pela biomassa microbiana estimado por Brookes et al. (1984) foi de  $22,7 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em pastagem permanente e  $6,8 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em solos cultivados com trigo, valor este que representou em torno de 60% do fósforo removido pela cultura. No mesmo sentido, Srivastava & Singh (1991) constataram em solos tropicais fluxos de  $26 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  sob floresta e de  $16 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  sob condições agrícolas. Os resultados sugerem que a contribuição da biomassa para a nutrição em fósforo é importante em sistemas sem o aporte de fertilizantes, onde a disponibilidade do nutriente depende de processos biológicos relacionados com a dinâmica da matéria orgânica.

Os fosfatos permanecem inalterados dentro das estruturas celulares microbianas, e sua mobilização para a solução do solo é mais rápida que as formas de carbono, por exemplo, pelo fato das moléculas contendo fósforo se encontrarem principalmente no citoplasma e no núcleo, em compostos lábeis, e muito pouco nas paredes celulares (KOUNO et al., 2002). Em estudo recente, Oehl et al. (2001), utilizando técnica com o radioisótopo  $^{33}\text{PO}_4$ , constataram que as velocidades de absorção de fósforo pela microbiota e sua mobilização para a solução do solo foram semelhantes, indicando que a criação de novas gerações promove um fluxo constante e dinâmico desse nutriente através da biomassa de microorganismos. Assim, a microbiota aproveita de maneira eficiente o fósforo em solução, disponibilizado por fontes inorgânicas ou pela lise celular, mantendo-o dentro de formas biológicas de ciclagem rápida. A atividade microbiana pode contribuir de forma considerável para a mobilização de fósforo às plantas, assimilando esse nutrientes a partir de fontes como fertilizantes ou restos culturais e diminuindo a sua retenção em formas mais lentas, e renovando continuamente a biomassa, que pode disponibilizar fósforo e outros nutrientes para a absorção radicular.

A quantidade e o fluxo de fósforo na biomassa microbiana são utilizados em trabalhos para comparar e avaliar os efeitos de sistemas com diferentes formas de preparo do solo. Oehl et al. (2001) analisaram a ciclagem de fósforo na biomassa microbiana em solo cultivado por 20 anos sob sistemas biodinâmico, orgânico, com uso de fertilizantes minerais ou sem fertilização. Os autores constataram que os teores de fósforo e nitrogênio microbianos, em valores absolutos, foram duas vezes maiores em sistemas com manejo de fertilizantes orgânicos; entretanto, em termos relativos, os teores de fósforo microbiano em relação ao fósforo orgânico e total tiveram resultados semelhantes, sugerindo que a quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo regularam a quantidade de fósforo imobilizado pela microbiota.

Em Latossolo Vermelho Distrófico típico, Rheinheimer et al. (2000) constataram quantidade de fósforo na biomassa microbiana superior em plantio direto ( $44 \mu\text{g g}^{-1}$  solo) do que sistema convencional ( $20 \mu\text{g g}^{-1}$  solo), que representaram 13% e 7% do fósforo orgânico, respectivamente. De forma semelhante, Balota et al. (1998) constataram, em termos médios, teores de nitrogênio e carbono na biomassa microbiana maiores em plantio direto do que em plantio convencional. O quociente microbiano, expresso pela relação entre o carbono microbiano e o carbono orgânico solúvel, foi superior em plantio direto (1,97%) do que em plantio convencional (1,01%), indicando que a diferença entre os sistemas é resultante da maior entrada de matéria orgânica e diminuição das perdas de carbono e maior eficiência de conversão do carbono microbiano no sistema plantio direto.

Assim, pode-se concluir que a influência da forma de preparo do solo sobre a biomassa microbiana é reflexo das modificações nos teores de matéria orgânica e de nutrientes disponíveis no solo e nas condições do ambiente edáfico. O manejo do solo sem revolvimento tende a aumentar a quantidade e qualidade dos estoques orgânicos, pela proteção física da fração orgânica associada a minerais e pelo menor grau de humificação da matéria orgânica nos complexos organo-minerais, diminuindo as perdas de carbono e nitrogênio devido à decomposição biológica e erosão (BAYER et al., 2002). A existência de correlações positivas entre os teores de carbono orgânico e os teores de biomassa microbiana em sistemas agrícolas (CATTELAN & VIDOR, 1990b; KANCHIKERIMATH & SINGH, 2001) indicam que o acúmulo superficial de resíduos orgânicos e nutrientes minerais e o aumento do teor de água e dos níveis de carbono e nitrogênio orgânico, entre outros fatores, possibilitam a formação de um ambiente menos oxidativo e mais favorável ao crescimento da microbiota do solo, aumentando a diversidade e quantidade das populações de microorganismos (BAYER & MIELNICZUK, 1999; DORAN, 1980).

Estudos avaliando sistemas agrícolas demonstram a forma de preparo do solo tem maior influência que a sucessão ou rotação de culturas sob parâmetros microbianos como concentração de nutrientes e atividade respiratória (BALOTA et al., 1998; RHEINHEIMER et al., 2000). Entretanto, algumas pesquisas verificaram efeitos do manejo de culturas sobre a concentração de nutrientes na biomassa microbiana; a sucessão de leguminosas e gramíneas consorciadas (aveia+vica/milho+caupi) apresentou valores maiores de biomassa microbiana e quantidade de bactérias em relação a sistemas com manejo de gramíneas (aveia+milho) (CATTELAN & VIDOR, 1990a, 1990b). Utilizando a mesma combinação de espécies, Vargas & Scholles (1998) constataram que o manejo de culturas leguminosas e gramíneas

consoiciadas teve maior conteúdo de nitrogênio na biomassa microbiana até o início do ciclo das culturas estivais; esse efeito foi dissipado nos períodos seguintes, não sendo percebido na metade do ciclo dessas culturas. Os autores sugerem que em sistemas com manejo de leguminosas, em função da fixação simbiótica de  $N_2$ , a comunidade microbiana foi estimulada pela liberação de exsudatos radiculares com maiores proporções de nitrogênio e pelo aporte de biomassa vegetal com menor relação C:N.

Os trabalhos acima mostram que a microbiota possui um papel importante na ciclagem de fósforo e dos demais nutrientes e, em consequência, na sua intermediação para a absorção radicular, contribuindo para a disponibilização desse elemento para o metabolismo das espécies vegetais manejadas na agricultura. São relativamente poucos os estudos sobre a interação entre culturas de cobertura, componentes biológicos do solo e ciclagem de nutrientes, tornando interessantes e necessárias análises mais aprofundadas sobre tal aspecto.

### *II.3.2. Atividade de fosfatases no solo e mineralização de fósforo orgânico*

A atividade biológica do solo compreende uma série de reações bioquímicas catalisadas por enzimas, que aceleram a reciclagem da matéria orgânica e o fluxo de nutrientes para formas disponíveis para a biota. Enzimas extracelulares constituem uma estratégia que permite estender o volume de solo explorado pelo sistema radicular e além de implicar de forma direta na mobilização de nutrientes, podem atuar como sinais simbióticos aos microrganismos.

As enzimas fosfatases catalisam a hidrólise da fração orgânica do fósforo no solo, sendo classificadas e identificadas de acordo com o composto hidrolisado. As fosfomonoesterases, que genericamente recebem a denominação de fosfatases, são as enzimas mais estudadas, por atuarem na mobilização de fósforo inorgânico utilizando como substrato ortofosfatos de monoésteres. O pH regula a atividade dessas enzimas, podendo-se encontrar no solo fosfatases ácidas - com atividade ótima em pH 4 a 6,5 - e fosfatases alcalinas - com atividade ótima em pH 9 a 10 (ALEF et al., 1995). Por esse motivo as fosfatases ácidas são predominantes em solos ácidos e fosfatases alcalinas em solos alcalinos (DICK & TABATABAI, 1984).

Trabalhos conduzidos em condições hidropônicas não detectaram atividade de

fosfatases alcalinas em material vegetal, sugerindo que as raízes produzem apenas fosfatases ácidas (DICK et al., 1983; DICK & TABATABAI, 1984; JUMA & TABATABAI, 1988). A produção de fosfatases ácidas é atribuída à atividade metabólica de raízes e fungos, e de fosfatases alcalinas a fungos e bactérias da rizosfera (DAKORA & PHILLIPS, 2002). Uma proporção considerável da microbiota é capaz de produzir fosfatases extracelulares, demonstrando que esse é um mecanismo importante para a obtenção de fósforo inorgânico para o seu metabolismo. Nahas et al. (1994) constatou que 20,3% do total de bactérias e 26,0% do total de fungos apresentaram atividade de fosfatases alcalinas e 21,0% do total de bactérias e 65,6% do total de fungos apresentaram atividade de fosfatases ácidas.

A concentração de nutrientes na solução do solo regula, entre outros fatores, a produção e a atividade das enzimas extracelulares de origem vegetal. Assim, a baixa concentração de fósforo nas raízes, como resultado de deficiência desse nutriente na solução do solo, induz a síntese de fosfatases intra e extracelular, seguido por um aumento na liberação de fosfatases extracelulares dentro dos exsudatos radiculares (DAKORA & PHILLIPS, 2002). No solo, as fosfatases podem estar presentes como enzimas livres, provindas de exoenzimas liberadas de células vivas e endoenzimas liberadas de células desintegradas, ou como enzimas ligadas a constituintes celulares tais como células desintegradas ou fragmentos celulares. Parte dessas enzimas adicionadas ao solo pela lise celular ou por restos vegetais podem acabar sendo imobilizada nas superfícies minerais do solo (TABATABAI, 1994). A interação entre colóides inorgânicos e orgânicos e fosfatases formam complexos que, em maior ou menor grau, podem se tornar estáveis no solo, de acordo com a natureza do composto molecular (RAO et al., 2000).

Como já foi exposto anteriormente, parâmetros biológicos e bioquímicos do solo podem ter uma sensibilidade maior a mudanças no solo do que atributos químicos e físicos, podendo fornecer informações sobre mudanças na qualidade do solo. Estudos têm procurado avaliar o efeito da fertilização e a forma de preparo do solo sobre a atividade de enzimas, enfatizando o uso desse parâmetro da atividade biológica em índices como indicadores de estresse e produtividade e para a avaliação da qualidade e o grau de degradação do solo (BANDICK & DICK, 1999; JIMENEZ et al., 2002; PASCUAL et al., 2000).

Da mesma forma que estudos apontam para a biomassa microbiana, são constatadas correlações positivas entre o acúmulo de carbono orgânico e a atividade de fosfatases (CURCI et al., 1997; JIMENEZ et al., 2002; JORDAN et al., 1995). A matéria orgânica tem um papel importante na proteção e manutenção dessas enzimas nas suas formas ativas (DENG &

TABATABAI, 1997) e na disponibilização de substratos orgânicos para as reações enzimáticas e mobilização de fósforo para a biota do solo. Além do fator quantidade, a qualidade da matéria orgânica do solo e o balanço de nutrientes podem se refletir em maior atividade enzimática (KANCIKERIMATH & SINGH, 2001), pela criação de condições nutricionais adequadas ao crescimento e à atividade das populações microbianas.

A atividade de fosfatases geralmente é maior na camada superficial do solo, acompanhando o acúmulo de material orgânico e a concentração do sistema radicular, especialmente em sistemas sem revolvimento. Estudos demonstram que os níveis de atividade de fosfatases são maiores em solos de pastagem do que em solos cultivados (CARPENTER-BOGGS et al., 2003; GUPTA & GERMIDA, 1988). A forma de preparo do solo na agricultura pode afetar a atividade enzimática, devido a alterações na distribuição da matéria orgânica e de nutrientes no perfil do solo. Estudos têm demonstrado que sistemas agrícolas com revolvimento do solo tendem a diminuir os níveis de atividade de fosfatases na camada superficial, em relação a solos com redução de preparo ou sem revolvimento (BERGSTROM et al., 1998; CURCI et al., 1997; JORDAN et al., 1995). Esses efeitos estão associados ao suprimento mais limitado de fontes de energia e carbono para síntese de proteínas, a diferenças na preservação de fontes intra- e extracelular de enzimas dentro dos agregados estáveis do solo (MONREAL & BERGSTROM, 2000) e a homogeneização dos níveis de enzimas e teores de matéria orgânica em uma camada mais profunda.

A atividade de fosfatases tem um papel importante na mobilização de fósforo para a biota do solo, especialmente em sistemas com manejo de fertilizantes orgânicos, onde a dinâmica da fração orgânica pode responder pela maior disponibilidade do nutriente ao metabolismo vegetal. Oberson et al. (1996) constataram que a atividade de fosfatases ácidas e alcalinas foi afetada pelo sistema de cultivo, apresentando níveis superiores em sistemas com manejo de fertilizantes orgânicos em decorrência dos maiores teores de matéria orgânica no solo e dos substratos orgânicos aplicados; a maior atividade mineralizadora nesses sistemas manteve a concentração de fósforo extraível em níveis semelhantes aos tratamentos com uso de fertilizantes minerais. A atividade microbiana relacionada à ciclagem do fósforo no solo em sistemas com a aplicação regular de fertilizantes orgânicos pode fornecer nutrientes para manter a produção de culturas em níveis semelhantes a sistemas com fertilização mineral (PARHAM et al., 2002).

Além da forma de preparo e do tipo de fertilização, a distribuição temporal de espécies cultivadas em rotação pode afetar a atividade de fosfatases e de outras enzimas na camada

superficial do solo. Rao et al. (1995) constataram maior atividade de fosfatases alcalinas e ácidas em sistemas utilizando leguminosas em rotação do que em sistemas manejados com gramíneas. Esses autores atribuem os resultados a um efeito rizosférico das espécies leguminosas, de modo que o padrão de exsudação do sistema radicular dessas espécies aumentou as fontes de carbono e nitrogênio no solo e estimulou o crescimento, a atividade e a síntese enzimática de populações microbianas. Os autores concluíram que na situação de solo arenoso e de rotações de culturas testadas, o uso de leguminosas representou um aumento na atividade enzimática e nos teores de matéria orgânica, nitrato e fósforo disponível, que se refletiu em aumento da produtividade da cultura subsequente. Da mesma forma, em sistema manejado por 72 anos com o uso de leguminosas como única fonte de nitrogênio adicionada, Bolton et al. (1985) constataram maior atividade de fosfatases e maior biomassa microbiana em comparação a sistema recebendo fertilizantes na forma mineral, embora não tenham sido constatadas diferenças entre os tratamentos no número de microorganismos do solo determinado por contagem em placas.

O fósforo orgânico e a atividade mineralizadora dessas fontes adquirem maior importância em agricultura com baixa entrada de insumos externos. A manutenção equilibrada da fração orgânica de fósforo no solo e sua lenta mineralização permitem um suprimento gradual do nutriente, principalmente em pastagens, culturas perenes ou de crescimento mais lento. No mesmo sentido, práticas que promovem a diminuição de matéria orgânica em solos ácidos, que possui um forte caráter drenagem ou de adsorção do fósforo, transformam o sistema produtivo mais dependente da entrada de fertilizantes fosfatados no sistema de produção (NOVAIS & SMYTH, 1999). O aporte de adubos fosfatados solúveis promove um aumento da forma inorgânica do fósforo e, em consequência, a diminuição na atividade de fosfatases, pela baixa necessidade de uso das formas orgânicas como fonte de fósforo pelas plantas. Assim, o fósforo orgânico possui um efeito prático pequeno em cultivos de ciclo rápido e grande demanda deste nutriente (NOVAIS & SMYTH, 1999). Solos de exploração agrícola e com baixa adição de fosfatos diminuem gradualmente a concentração de fósforo disponível, alcançando níveis estáveis que não suprem as exigências nutricionais de culturas de alta produtividade em certos estádios de crescimento, mas que entretanto podem ser suficientes a determinadas espécies. Alguns gêneros, como *Cajanus*, *Inga*, *Leucaena*, possuem maior eficiência no aproveitamento de fósforo de fontes pouco solúveis do solo. Desta forma, estas plantas podem ser utilizadas em sistemas de rotação como uma forma de melhorar o aproveitamento dos adubos fosfatados aplicados e assim aumentar as

frações de fósforo de ciclagem rápida (RHEINHEIMER et al, 1999).

Os trabalhos relacionando a atividade mineralizadora da microbiota e a ciclagem das fontes orgânicas de fósforo se concentram no estudo comparativo entre formas diferentes de preparo do solo e de fertilização. Os trabalhos sobre ciclagem de nutrientes pela biomassa em sistemas com sucessão ou rotação de culturas restringem-se principalmente ao manejo de culturas leguminosas, fazendo-se alusão aos benefícios já conhecidos e descritos para estas espécies no aporte e fluxo de nitrogênio. Os possíveis efeitos das plantas de cobertura manejadas são relacionados principalmente à produção de resíduos culturais e a qualidade do material incorporado após o declínio dessas espécies, em uma inferência direta da disponibilidade de nutrientes com a ciclagem da matéria orgânica, muito mais que os efeitos das espécies de cobertura nas estruturas das comunidades microbianas habitantes da rizosfera. As espécies de cobertura provavelmente implicam em modificações nas características físico-químicas da rizosfera e, desta forma, elas atuam como agentes reguladores das populações de organismos que habitam o solo.

Embora a rizosfera seja um ambiente propício ao desenvolvimento de um grande número de microorganismos, não há uma associação específica entre organismos mineralizadores de fosfato e hospedeiros, podendo este ser um dos fatores mais limitantes para o sucesso da utilização de inoculantes (RICHARDSON, 1994). Entre práticas com potenciais maiores há, por exemplo, planos de rotações de culturas em benefício de mecanismos biológicos de manutenção do fósforo em fontes de ciclagem rápida. O estudo de efeitos de culturas de cobertura sobre a atividade mineralizadora pode auxiliar a compreender possíveis modificações na comunidade microbiana relacionadas com a dinâmica do fósforo no solo e, nesta situação, as funções da microbiota na disponibilidade desse nutriente para o metabolismo vegetal.

### *II.3.3. Associações micorrízicas*

Micorrizas são associações entre determinados fungos do solo e as raízes das plantas, ocorrendo de uma forma geral na natureza. Os tipos mais comuns são as micorrizas arbusculares, que ocorrem entre os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e mais de 80% das espécies vegetais, especialmente nas plantas exploradas pelo ser humano (SMITH &

READ, 1997). Há uma baixa especificidade de associação entre FMA e plantas hospedeiras, pois existem em torno de 150 espécies de fungos identificados para um número muito superior de plantas que podem formar micorriza arbuscular (ALLEN et al., 1995), o que possibilita a associação de uma planta com mais de uma espécie de FMA e vice-versa.

O papel das associações micorrízicas na nutrição vegetal, em especial na absorção de fósforo, está bem comprovado. Em troca de fotossintatos - usados como fonte de energia para a formação, manutenção e funcionamento das estruturas micorrízicas - até 80% do fósforo das hifas de FMA podem ser disponibilizados ao metabolismo vegetal (MARSCHNER & DELL, 1994). A aquisição de fósforo pelas hifas externas dos FMA e sua mobilização à planta está relacionada a diversos mecanismos de ações físicas, químicas ou biológicas. Micorrizas estendem a zona de absorção para áreas mais distantes do sistema radicular, aumentando sua área superficial específica, diminuindo as distâncias do fluxo difusivo dos íons ortofosfato e interceptando a fixação de fósforo após a mineralização e a solubilização mediada por outros microorganismos do solo, o que possibilita a absorção do nutriente de fontes não acessíveis ou de forma mais eficiente do que plantas não micorrizadas (BOLAN, 1991; JONER et al., 2000; MARSCHNER & DELL, 1994). A mineralização de fósforo orgânico pelas hifas de FMA pode ocorrer através da produção de fosfatases extracelulares (KOIDE & KABIR, 2000) ou por efeito indireto, pela atividade de populações de microorganismos associados (JAYACHANDRAN et al., 1992). A importância quantitativa destas enzimas para a nutrição fosfatada de plantas micorrizadas não está clara, e de acordo com a combinação de espécies de FMA e hospedeiro e substrato orgânico utilizado, existem trabalhos que concluem ser insignificante (JONER et al., 1995, 2000) ou, pelo contrário, que podem contribuir de forma substancial na mobilização de fósforo (JAYACHANDRAN et al., 1992; TARAFDAR & MARSCHNER, 1994).

Sob condições naturais, o fluxo de fósforo às plantas através de hifas da comunidade nativa de FMA é comparável ao grau de absorção obtido em condições controladas com o uso de culturas isoladas desses fungos (SCHWEIGER & JAKOBSEN, 1999). A eficiência e a magnitude do efeito da micorriza na nutrição fosfatada para as plantas depende de uma série de interações entre a capacidade da planta de satisfazer sua necessidade de fósforo através da associação (dependência micorrízica), a capacidade do fungo infectar a planta hospedeira e translocar fósforo do solo para esta (eficiência fúngica) e as quantidades relativas das diferentes formas de fósforo no solo. Com o aumento gradativo de fósforo solúvel no solo, os efeitos das micorrizas podem diminuir; em níveis relativamente extremos de disponibilidade

de fósforo e de acordo com o grau de dependência micorrízica, o crescimento de plantas micorrizadas pode ser menor do que plantas não micorrizadas (GIANINAZZI-PEARSON, 1984), demonstrando que as relações entre os simbioss e as condições edáficas regulam os efeitos das micorrizas.

A diversidade de FMA no solo é determinante na regulação da diversidade, produtividade e variabilidade de comunidades vegetais, constituindo um fator ecológico inerente para a estabilidade e manutenção de ecossistemas terrestres (VAN DER HEIDJEN et al., 1998). O manejo do solo e a sucessão de espécies vegetais em sistemas agrícolas podem regular a ecologia funcional e a dinâmica populacional das comunidades de FMA que, por sua vez, podem ter efeitos sobre a produtividade das culturas. Hendrix et al. (1995) constataram que solos cultivados continuamente com soja apresentaram espécies de *Gigaspora* como FMA dominantes, enquanto em solos rotacionados com as culturas de milho, sorgo e festuca, constatou-se quantidade maior de espécies do gênero *Glomus*. Os autores sugerem que o manejo das culturas causou mudanças significativas nas comunidades de FMA, e que tais alterações na diversidade dos fungos pode estar envolvida no efeito da rotação sobre a produtividade do solo.

Da mesma forma, o uso de pousio e a manutenção do solo descoberto por determinado período, e rotações com espécies não micorrízicas, podem causar depressão na quantidade de propágulos naturais no solo ou favorecer estirpes de FMA de baixa infectividade e com menor grau de dependência de associação com as plantas, que por sua vez, podem ter efeitos nas culturas seguintes. O revolvimento do solo rompe por ação física a estrutura de rede de hifas de FMA, diminuindo os benefícios de transferências de nutrientes para e entre plantas hospedeiras (JORDAN et al., 2000). O cultivo contínuo de uma única cultura pode ter efeitos seletivos nas comunidades dos FMA, beneficiando o desenvolvimento de grupos que podem estar relacionados, por exemplo, com a diminuição na produtividade e na concentração de nutrientes nos tecidos vegetais (JOHNSON et al., 1992). O balanço de nutrientes no solo e o tipo de fertilizante aplicado em sistemas agrícolas também podem afetar o estabelecimento e desenvolvimento de associações micorrízicas funcionais (GRYNDLER et al., 2001; JONER, 2000).

A propriedade de um tipo de FMA poder colonizar diversas espécies vegetais torna possível a formação de uma rede de hifas que interconecta sistemas radiculares, permitindo a translocação de nutrientes entre plantas através das estruturas dos fungos presentes. As interligações entre plantas através de hifas possuem um senso estratégico ao FMA, pois

permite a expansão do fungo pelo solo e a absorção de carbono de uma forma mais eficiente por meio da colonização ativa de raízes, garantindo seu contínuo crescimento e atividade (HODGE, 2000). Técnicas isotópicas têm demonstrado a transferência de nitrogênio e fósforo de leguminosas para gramíneas, através de hifas de FMA que interconectam essas espécies (CRUZ & MARTINS, 1997; JOHANSEN & JENSEN, 1996). Essa estratégia de troca de nutrientes permite a ciclagem de uma forma fechada, impedindo perdas ao meio físico, e provavelmente ocorre na sucessão de culturas em sistemas agrícolas.

A mudança na disponibilização de nutrientes pelas micorrizas altera o estado nutricional das plantas e, em conseqüência, aspectos estruturais e bioquímicos do sistema radicular, como a composição de nutrientes, o balanço hormonal e os padrões de alocação de carbono. Além de o micélio do FMA servir como uma fonte de carbono para as comunidades microbianas, associações micorrízicas podem alterar a liberação de exsudatos radiculares e, em conseqüência, o fluxo de carbono das plantas autotróficas para a biomassa microbiana heterotrófica, podendo ser assim um importante regulador da comunidade de microorganismos habitante da micorrizosfera, fração de solo sob influência das micorrizas (BAREA et al., 2002; DOUDS JR. & MILLNER, 1999; PAULITZ & LINDERMAN, 1991). Vázquez et al. (2000) constataram mudanças qualitativas em populações bacterianas promovidas por diferentes combinações de FMA e inoculantes microbianos (*Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*). Associações micorrízicas têm efeitos estimuladores sobre as populações de bactérias solubilizadoras de fosfato, embora não estejam bem determinados os mecanismos envolvidos nas interações (PAULITZ & LINDERMAN, 1991). Em plantas leguminosas, as simbioses destas espécies com FMA e bactérias noduladoras possuem comportamento sinérgico; a inoculação de FMA contribuiu no aumento da nodulação e fixação de N<sub>2</sub>, principalmente pelo estímulo generalizado da nutrição do hospedeiro vegetal (BAREA et al., 2002; HODGE, 2000). Avaliando sistemas agrícolas na Nigéria, Sanginga et al. (1999) constataram que milho semeado em parcelas cultivadas anteriormente com soja inoculada com rizóbio tiveram maior porcentagem de colonização micorrízica do que quando cultivadas após soja não inoculada.

Não há um padrão claro sobre os níveis de modificações promovidos pela exsudação de substâncias pelas micorrizas, de modo que a influência e a relação desta simbiose com as populações microbianas do solo também é de difícil generalização, podendo depender diretamente da variação de fatores como a espécie de FMA em questão, disponibilidade de nutriente e a própria espécie vegetal hospedeira (HODGE, 2000; VÁZQUEZ et al., 2000). A

grande maioria das informações é derivada de trabalhos em condições controladas, demonstrando-se que mesmo nestas situações, as interações entre raízes, FMA e demais microorganismos do solo são complexas, tornando necessários maiores entendimentos sobre a ecologia microbiana e a dinâmica populacional no solo.

Embora muitas plantas manejadas na agricultura beneficiem-se de associações micorrízicas, o caráter micorrízico ou não micorrízico das espécies vegetais usadas nos sistemas de manejo tem sido geralmente negligenciado nas pesquisas sobre a ciclagem do fósforo. As plantas de cobertura, como mostram os trabalhos acima descritos, provavelmente interagem de forma distinta sobre a microbiota ligada aos processos de transformação do fósforo, e desta forma, sobre o fluxo e as formas disponíveis deste nutriente em sistemas agrícolas. Além de auxiliar a prever sua disponibilidade para um cultivo específico, estudos com uma abordagem sistêmica do ciclo do fósforo - considerando os efeitos e interações das culturas agrícolas, dos fungos micorrízicos e da biota do solo - podem contribuir para a identificação dos mecanismos envolvidos na dinâmica do elemento no solo, e determinar estratégias de manejo que possam minimizar a adição de fertilizantes e aumentar a produtividade das culturas comerciais.

### **III.OBJETIVOS**

---

#### ***Objetivo geral***

Analisar aspectos biológicos da dinâmica do fósforo em sistemas agrícolas estabelecidos no campo, com ênfase no caráter micorrízico ou não micorrízico de espécies hibernais de cobertura e de espécies estivais de cunho econômico.

#### ***Objetivos específicos***

- Avaliar a atividade de fosfatases ácidas e alcalinas;
- Estimar a disponibilidade de fósforo, através da quantificação dos teores de fósforo extraível;
- Estimar o conteúdo de fósforo presente na biomassa microbiana;
- Quantificar o conteúdo de fósforo da fração orgânica do solo;
- Quantificar os valores de pH;
- Analisar as relações entre as espécies vegetais manejadas nos sistemas agrícolas e as variáveis estimadas e o efeito de tais relações na dinâmica do fósforo no solo.

### **IV. HIPÓTESE**

---

Plantas de cobertura hiberna, em função do caráter micorrízico ou não micorrízico, possuem efeitos diferenciados sobre a biomassa microbiana e sobre a atividade enzimática relacionadas à dinâmica do fósforo no solo.

## **V. MATERIAL E MÉTODOS**

---

### **V.1. Caracterização geral dos locais de levantamento**

O trabalho foi desenvolvido em propriedades rurais e em área experimental da Estação Experimental da Epagri nos municípios de Campos Novos e Atalanta, em Santa Catarina. O município de Campos Novos localiza-se na Mesorregião Serrana do estado, com altitude em torno de 930 m e clima Cfb de acordo com a classificação de Köepen, apresentando temperaturas no mês mais quente abaixo de 22° C (SANTA CATARINA, 1986). Os sistemas agrícolas levantados em Campos Novos situam-se em Latossolo Vermelho Distroférico de origem basáltica (informação verbal<sup>1</sup>) e textura muito argilosa, com horizonte A proeminente, profundo a muito profundo em relevo ondulado (SANTA CATARINA, 1986).

O município de Atalanta está situado na Mesorregião Vale do Itajaí, apresentando altitude média de 600 m e regime climático Cfa, com temperaturas no mês mais quente acima de 22° C, de acordo com Köepen (SANTA CATARINA, 1986). Os sistemas agrícolas levantados em Atalanta situam-se em Cambissolo Háplico de origem sedimentar (informação verbal<sup>1</sup>) e textura argilosa, com horizonte A moderado, medianamente profundos em relevo suave ondulado (SANTA CATARINA, 1986).

### **V.2. Caracterização dos sistemas com manejo de plantas de cobertura**

O levantamento consistiu em amostragens de solo realizadas entre agosto de 2001 e setembro de 2002, em áreas de produção agrícola manejadas com as culturas de cobertura hibernais: aveia preta (*Avena strigosa*) e ervilhaca (*Vicia* sp.) são espécies micorrízicas; enquanto nabo forrageiro (*Raphanus sativus* var. *oleiferus*) e tremoço branco (*Lupinus albus*) são espécies não micorrízicas. A partir de visitas em propriedades rurais em Campos Novos e

---

<sup>1</sup> Informação fornecida pelo Sr. Antônio Ayrton Auzani Uberti, professor do CCA-UFSC através de comunicação pessoal em fevereiro de 2002.

Atalanta em agosto de 2001, foi realizada a seleção de áreas de produção agrícola. Elas possuíam histórico de, no mínimo, cinco anos de preparo do solo sem revolvimento, manejando plantas de cobertura no período hibernar, com o cultivo em sucessão de milho ou feijão no período estival.

### V.2.1. Descrição geral dos sistemas agrícolas amostrados em Campos Novos

Em Campos Novos, foram levantados sistemas agrícolas em três propriedades no Reassentamento de Agricultores Atingidos pela Barragem de Machadinho, tendo cultivos sucessionais com o manejo das espécies nabo forrageiro, ervilhaca e aveia preta no período hibernar e a cultura de feijão no período estival. Além dessas áreas de produção agrícola, foram amostrados dois sistemas da Estação Experimental da Epagri - Campos Novos, situados em área de experimento de manejo de culturas de cobertura cultivada com as espécies hibernais nabo forrageiro e aveia preta sucedidas da cultura do milho no período estival. A primeira coleta foi realizada na floração das culturas de cobertura (17/08/2001). As coletas subsequentes foram realizadas aos 182 dias após a floração (15/02/2002); no estágio de floração das culturas estivais em sucessão; aos 300 dias após a floração (12/06/2002), na resteva dessas espécies, durante os estágios iniciais de crescimento das culturas de cobertura hibernais; e aos 396 dias após a floração, por ocasião da floração das culturas hibernais e preparo para cultivo das espécies estivais (17/09/2002). Nas duas regiões amostradas, durante a segunda estação de crescimento das culturas hibernais de cobertura, houve atraso na semeadura e no crescimento dessas espécies em função das condições climáticas que retardaram a diminuição das temperaturas, em comparação às estações anteriores.

A área amostrada com nabo forrageiro em propriedade rural vem sendo utilizada para o pastoreio de bovinos há mais de quatro anos, através do manejo de espécies forrageiras como aveia preta no período hibernar e milheto (*Pennisetum americanum*) no verão. A reposição de nutrientes é realizada através de aplicações regulares de cama de aviário. Após a senescência do nabo forrageiro foi semeada milheto, mas devido à geada que atingiu essa cultura nos estágios iniciais de crescimento, a área não foi cultivada no período estival, estando em pousio e sob pastoreio por ocasião da segunda amostragem. Nesse período, predominaram milhã (*Digitaria* sp.) e papuã (*Brachiaria plantaginea*) como espécies vegetais

residentes. No mês de maio de 2002, a área foi semeada com aveia preta e utilizada para pastoreio, permanecendo nessa condição até o período da quarta amostragem de solo.

A área sob cultivo de ervilhaca vem sendo utilizada em sistema de plantio direto há mais de cinco anos, manejando essa espécie no inverno e as culturas de milho ou feijão no período estival. As fertilizações foram realizadas com aplicações de cama de aviário após o final do ciclo cultural das espécies de cobertura e de adubos minerais na semeadura das culturas estivais. O estabelecimento da ervilhaca ocorre através de ressemeadura natural, e após sua senescência, é realizado o cultivo das espécies estivais. O controle do crescimento de espécies espontâneas é realizado através de capinas manuais.

O sistema agrícola cultivado com aveia preta maneja essa cultura de cobertura há mais de quatro anos para pastoreio de bovinos ou para produção de sementes. O agricultor cultiva milho ou feijão em sucessão à aveia preta, após a rolagem dessa espécie nos estágios iniciais de floração. A reposição de nutrientes é realizada pela aplicação regular de cama de aviário, no período que antecede a semeadura das espécies estivais, e o controle de espécies vegetais espontâneas é realizado através de capinas manuais.

A área amostrada na Estação Experimental da Epagri de Campos Novos é utilizada há mais de cinco anos em experimentos envolvendo o manejo de culturas de cobertura hibernais. Nos períodos amostrados, estava sendo conduzido um trabalho visando verificar o efeito de plantas de cobertura sobre a incidência de espécies espontâneas nos cultivos subsequentes. O milho foi cultivado após o manejo das culturas de cobertura, na palhada resultante da rolagem da parte aérea dessas espécies, feita com o auxílio de rolo-faca. A fertilização foi realizada com o uso de cama de aviário e de fertilizantes minerais, no caso do fósforo, aplicado na linha de plantio do milho durante a semeadura.

### *V.2.2. Descrição geral dos sistemas agrícolas amostrados em Atalanta*

No município de Atalanta, o levantamento foi realizado em quatro propriedades rurais vizinhas na localidade de Vila Gropp, tendo sistemas agrícolas que manejavam a cultura do milho no período estival em sucessão às espécies de cobertura hibernais aveia preta, ervilhaca, nabo forrageiro e tremoço branco. As coletas de solo foram realizadas aos 90 dias de cultivo (28/08/2001), na plena floração das espécies de cobertura hibernais; aos 138 dias após a

floração dessas plantas (15/01/2002), no estágio de floração do milho; aos 282 dias após a floração (07/06/2002), na resteva dessa cultura, durante os estádios iniciais de crescimento do cultivo sucedendo às espécies de cobertura; e aos 393 dias após a floração (26/09/2002), no período de floração e preparo do solo para o cultivo da espécie estival.

Os sistemas agrícolas manejados com aveia preta e nabo forrageiro situavam-se em glebas adjacentes e pertencentes à mesma propriedade rural. Essas áreas foram manejadas nos últimos anos com sucessões da cultura do milho ao cultivo consorciado ou “coquetéis” de espécies de cobertura - nabo forrageiro, nabiça (*Raphanus raphanistrum*), ervilhaca e aveia preta - no período hibernar. Os locais amostrados também foram manejados em anos anteriores somente com o monocultivo de aveia preta. Durante a floração das culturas de cobertura, a parte aérea da aveia preta e nabo forrageiro foi acamada com o uso de enxada rotativa e dessecada através da aplicação de herbicida à base de Glyphosate. A reposição de nutrientes foi realizada com a aplicação de fertilizante orgânico (esterco de suíno) e de adubos minerais solúveis. O controle de espécies espontâneas foi realizado com a aplicação de herbicida antes da semeadura do milho.

A área cultivada com tremoço branco, localizada em propriedade vizinha aos sistemas agrícolas com aveia preta e nabo forrageiro, tem sido manejada com plantas de cobertura (ervilhaca, aveia, tremoço branco) há mais de seis anos. Em sucessão as essas culturas, são cultivados milho ou feijão em sistema de plantio direto. Nos períodos de amostragem, após a floração e colheita das sementes do tremoço branco, a parte aérea foi acamada e em seguida semeado milho. A reposição de nutrientes foi realizada com a aplicação de fertilizantes minerais e a supressão de ervas espontâneas com capina manual no ciclo cultural do milho.

O sistema agrícola manejado com ervilhaca cultivava essa cultura de cobertura há três anos em sucessão à cultura do milho. No início da estação hibernar, essa espécie desenvolve-se espontaneamente, através de ressemeadura natural. Nos períodos amostrados, o milho foi semeado em sistema de plantio direto sobre a palhada da cultura hibernar. Na adubação de base, essa cultura recebeu fertilizante mineral, aplicado na linha de cultivo. O controle da população de espécies espontâneas foi realizado através de capinas manuais.

Atributos químicos e físicos de interesse agrônômico dos solos dos sistemas de produção amostrados em Campos Novos e Atalanta, determinados no Laboratório de Solo, Água e Tecidos Vegetais do CCA - UFSC a partir de material da quarta coleta, são apresentados nas tabelas 1 e 2, respectivamente.

**TABELA 1** - Atributos físicos e químicos de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico, coletadas na profundidade de 0 a 10 cm durante a quarta amostragem dos sistemas agrícolas de Campos Novos - SC.

Cultura de cobertura hiberna	areia	silte	argila	M. O.	pH (H <sub>2</sub> O)	SMP	P	K	Ca+Mg	Al	Ca
	%						μg g <sup>-1</sup>		me/dl		
Nabo forrageiro	2,3	52,8	44,9	4,7	5,0	5,6	10,5	117	8,0	0,8	5,3
Aveia preta	2,7	55,1	42,2	4,1	6,2	6,5	10,6	379	13,7	0,1	9,6
Ervilhaca	2,4	56,8	40,8	5,9	6,6	6,7	5,8	584	15,9	0,2	10,2
Nabo forrageiro *	3,9	58,1	38,1	4,4	6,4	6,6	56,6	674	15,1	0,1	8,1
Aveia preta *	3,1	56,1	40,8	4,4	6,3	6,5	27,6	662	15,2	0,1	8,3

\* áreas amostradas na Estação Experimental da Epagri - Campos Novos.

**TABELA 2** - Atributos físicos e químicos de amostras de Cambissolo Háplico, coletadas na profundidade de 0 a 10 cm durante a quarta amostragem dos sistemas agrícolas de Atalanta - SC.

Cultura de cobertura hiberna	areia	silte	argila	M. O.	pH (H <sub>2</sub> O)	SMP	P	K	Ca+Mg	Al	Ca
	%						μg g <sup>-1</sup>		me/dl		
Nabo forrageiro	7,9	67,7	24,5	3,1	5,8	6,2	26,5	361	12,0	0,2	8,5
Aveia preta	3,7	63,6	32,6	3,2	5,5	6,1	32,5	307	10,8	0,2	7,3
Tremoço branco	8,0	62,1	29,9	4,6	5,5	5,8	14,2	355	11,5	0,5	9,5
Ervilhaca	13,7	60,5	25,8	2,9	5,5	5,7	7,3	126	11,1	0,7	9,1

### ***V.3. Coleta e preparo das amostras***

Os sistemas de produção levantados foram amostrados de forma estratificada (WOLLUM, 1994), através da delimitação de áreas de 50 m x 10 m divididas em cinco parcelas ou subáreas, que constituíram repetições de cada área de amostragem. Coletou-se uma amostra composta por parcela, formada por 20 subamostras de cilindros de solo retirados da rizosfera das plantas residentes, com o auxílio de trado calador na profundidade de 0 a 10 cm.

Após a coleta, as amostras foram conduzidas ao Laboratório de Ecologia do Solo do Departamento de Engenharia Rural do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina, onde foram peneiradas em malha 2 mm e conservadas em sacos plásticos fechados sob refrigeração, à temperatura em torno de 4°C. Amostras com excesso de umidade foram secas ao ar por uma noite.

### ***V.4. Análises preliminares***

#### ***V.4.1. Determinação da umidade gravimétrica***

Amostras de 10,00 g de solo peneirado foram mantidas em estufa a 105°C pelo período mínimo de 24 horas e em seguida pesadas. A razão entre a diferença atribuída à perda de massa de água (umidade) e à massa de solo seco da amostra correspondente forneceu o valor de umidade gravimétrica.

#### ***V.4.2. Determinação da capacidade de retenção de água***

Amostras de 50,00 g de solo foram dispostas em funil contendo chumaço de algodão

como filtro no fundo do cone e um tubo de borracha constricto com um grampo de metal. Ao funil foram adicionados 50 mL de água e, após 30 minutos, a água não absorvida pelo solo foi recolhida por mais 30 minutos. Controles constituíram-se de funis sem a adição de solo. A partir da quantidade de água retida nas amostras, corrigida pelo controle, e os valores de umidade gravimétrica das amostras, calculou-se a capacidade de retenção de água.

#### ***V.5. Determinação do teor de fósforo extraível e do conteúdo de fósforo imobilizado na biomassa microbiana***

O teor de fósforo na biomassa microbiana do solo foi estimado através do método de fumigação-extração, proposto por Brookes et al. (1982), conforme descrito por Jøergensen (1995), modificado pelo uso da solução Mehlich-1 (HCl 0,05 M + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 M) para extração de fósforo inorgânico do solo (SILVA, 1999).

Amostras de 5,00 g de solo em triplicata, com umidade gravimétrica corrigida para 40% da CRA, foram fumigadas por vapor de clorofórmio (CH<sub>3</sub>Cl) em dessecador hermeticamente fechado, por 24 horas à temperatura ambiente. Amostras não fumigadas constituíram os controles, fornecendo os teores de fósforo extraível. Com o término da fumigação, procedeu-se à extração do fósforo das amostras fumigadas e não fumigadas com a solução Mehlich-1 em uma relação solo:extrator de 1:10, em agitador horizontal a 150 rpm por dez minutos. Após a agitação, as amostras permaneceram por um período de 16 horas em repouso para decantação do solo.

Padrões foram obtidos com solução de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> em concentrações de fósforo variando de 0,0 a 2,4 µg de P mL<sup>-1</sup>. Alíquotas de 3,0 mL dos extratos decantados e dos padrões foram retiradas e transferidas para tubos de ensaio, onde se adicionaram 3,0 mL de indicador ácido ascórbico-molibdato de amônio em meio acidificado e diluídas em água, se necessário. As leituras de absorbância da cor azul resultantes da reação do indicador com o fósforo dos extratos foram realizadas em espectrofotômetro de luz visível (λ 840 nm).

Os cálculos dos teores de fósforo das amostras foram realizados através de equação de regressão das leituras dos padrões, sendo então corrigidas para a eficiência do extrator utilizado, para as diluições e para a massa de solo seco. O teor de fósforo presente na

biomassa microbiana do solo de cada amostra foi estimado pelo cálculo da diferença entre as concentrações de fósforo no solo fumigado e não fumigado, dividido por 0,44. Essa constante representa a eficiência estimada para a fumigação (BROOKES et al., 1982).

### **V.6. Determinação da atividade de fosfatases**

As atividades das fosfatases (fosfomonoesterases) ácidas (EC 3.1.3.2) e alcalinas (EC 3.1.3.1) do solo foram estimadas de acordo com os processos metodológicos descritos por Tabatabai (1994). O método fundamenta-se na análise da concentração de *p*-nitrofenol resultante da hidrólise enzimática de *p*-nitrofenil fosfato, conforme a reação abaixo:



Triplicatas de 1,00 g de solo de cada amostra foram incubadas a 37°C por uma hora em tubos de ensaio contendo 4,0 mL de tampão pH 6,5 - para estimativa da atividade de fosfatases ácidas - ou tampão pH 11,0 - para a estimativa da atividade de fosfatases alcalinas. Cada tampão foi preparado através do ajuste de 200 mL de solução-tampão universal modificada (STUM) ao respectivo pH, seguido de transferência para balão volumétrico de 1000 mL, onde foi completado para esse volume com água destilada. Para a produção de STUM, foram diluídas as massas de 12,1 g de tris (hidrometil) aminometano (tris), 11,6 g de ácido maleico, 14,0 g de ácido cítrico e 6,3 g de ácido bórico em 488 mL em NaOH 1N; a solução obtida foi transferida para balão volumétrico de 1000 mL e completada com água destilada. Na mistura de tampão e solo foi adicionado 1,0 mL de *p*-nitrofenil fosfato (MERCK, Darmstadt, Alemanha) 0,05 M, que constituiu o substrato orgânico para a reação enzimática; para inibição da atividade microbiológica, foi adicionado 0,2 mL de tolueno diretamente na amostra no tubo de ensaio.

Com o término da incubação, adicionou-se imediatamente às amostras 1,0 mL de CaCl<sub>2</sub> 0,5 M - para floculação das partículas de solo no extrato - e 4,0 mL de NaOH 0,5 M - para a interrupção da atividade enzimática e desenvolvimento da cor amarela do *p*-nitrofenol, produto da hidrólise enzimática do *p*-nitrofenil fosfato. As amostras foram agitadas e centrifugadas a 2000 x g por cinco minutos. Padrões de *p*-nitrofenol com concentrações de 0,0

a  $5,0 \mu\text{g mL}^{-1}$  foram obtidos através dos procedimentos descritos para as amostras após a incubação. Para cada grupo de triplicata preparou-se um controle, que seguiu os mesmos procedimentos descritos para a estimativa da atividade enzimática nas amostras, diferenciando-se dessas pela adição do substrato orgânico (*p*-nitrofenil fosfato) ao término do período de incubação.

As leituras de absorvância da cor amarela do extrato obtido foram realizadas em espectrofotômetro de luz visível ( $\lambda$  410 nm). Leituras das amostras foram corrigidas para diluições e para massa de solo seco e convertidas para  $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol h}^{-1} \text{ g}^{-1}$  solo seco através de equação de regressão obtida das leituras dos padrões. Ao final desses cálculos, os valores obtidos das amostras foram subtraídos pelos seus respectivos controles.

### ***V.7. Determinação do conteúdo de fósforo na matéria orgânica***

As estimativas de fósforo na matéria orgânica do solo foram obtidas através do método de ignição, descrito por Olsen & Sommers (1982). Amostras de 1,00 g de solo em triplicata foram pesadas em cadinhos de porcelana para ignição em mufla a  $550^{\circ}\text{C}$  por uma hora. Após a ignição, as amostras de solo foram transferidas para tubos de extração com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1 N, em uma relação solo:extrator de 1:50, permanecendo por 16 horas a 150 rpm em agitador horizontal. Amostras de solo não calcinadas em mufla foram processadas de forma semelhante. Após o término da agitação, as amostras foram centrifugadas a  $1.500 \times \text{g}$  (3.100 rpm) por 15 minutos.

Alíquotas de 5,0 mL dos extratos foram transferidos para balões volumétricos de 50 mL, onde se adicionou 0,3 mL de indicador *p*-nitrofenol 0,25%, seguido da neutralização com NaOH 4 M, até a formação de cor amarela. A solução obtida foi diluída com água, adicionando-se em seguida 8,0 mL de indicador ácido ascórbico-molibdato de amônio ao balão volumétrico, o qual foi completado com água para o volume de 50 mL. Os procedimentos descritos para essas alíquotas foram utilizados para os padrões, obtidos em solução de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  com concentração de fósforo variando de 0,0 a  $1,6 \mu\text{g de P mL}^{-1}$ . A intensidade da absorção da cor azul foi medida em espectrofotômetro de luz visível ( $\lambda$  840 nm) após 30 minutos. As leituras foram convertidas através de equação de regressão obtida

das leituras dos padrões, corrigidas para a eficiência de extração, para a diluição e para o massa de solo seco. A estimativa final foi obtida subtraindo-se os valores verificados para as amostras calcinadas em mufla daqueles obtidos para os controles.

### ***V.8. pH em água***

A determinação do pH em água das amostras foi realizada utilizando-se a metodologia apresentada por SILVA (1999). A massa de 10,00 g de solo seco em estufa com circulação de ar forçada, à temperatura de 40° C, foi acondicionada em copo plástico, onde se adicionaram 10 mL de água, seguido de agitação com bastão de vidro. A mistura permaneceu em repouso por 30 minutos e agitada novamente, procedendo-se em seguida a leitura direta em potenciômetro.

### ***V.9. Estatística***

Cada sistema agrícola analisado, em função da espécie de planta de cobertura hiberna manejada, constituiu uma unidade de investigação, e as repetições de tais áreas representaram as unidades amostrais. As variáveis estimadas e analisadas em cada unidade amostral -fósforo extraível, fósforo presente na biomassa microbiana, atividade de fosfatases ácidas e alcalinas, fósforo da fração orgânica do solo e pH - corresponderam às unidades de observação, tendo a escala temporal ou período de coletas como condição de avaliação.

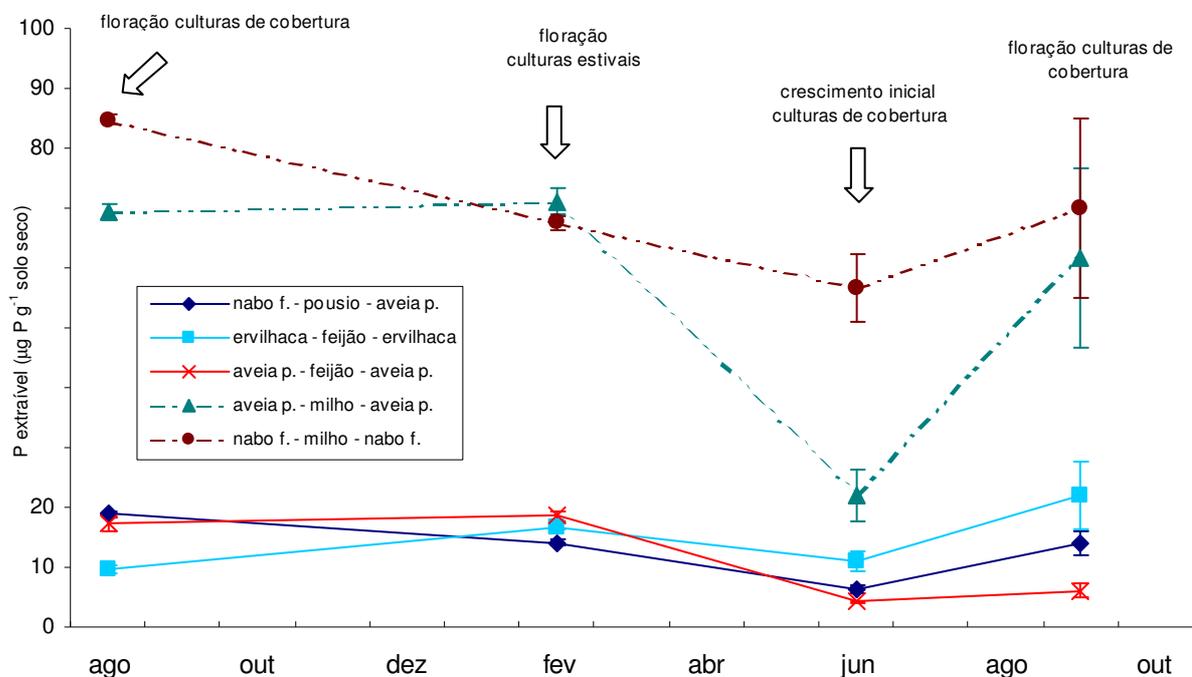
Os cálculos dos coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ), seguido de teste de significância sobre essa estatística, foram usados para quantificar o grau de associação ou dependência existente entre os atributos químicos e biológicos e a atividade enzimática das amostras de solo dos sistemas agrícolas levantados.

## VI. RESULTADOS

### VI. 1. Sistemas agrícolas amostrados em Campos Novos

#### VI.1.1. Teores de fósforo extraível e fósforo da biomassa microbiana do solo

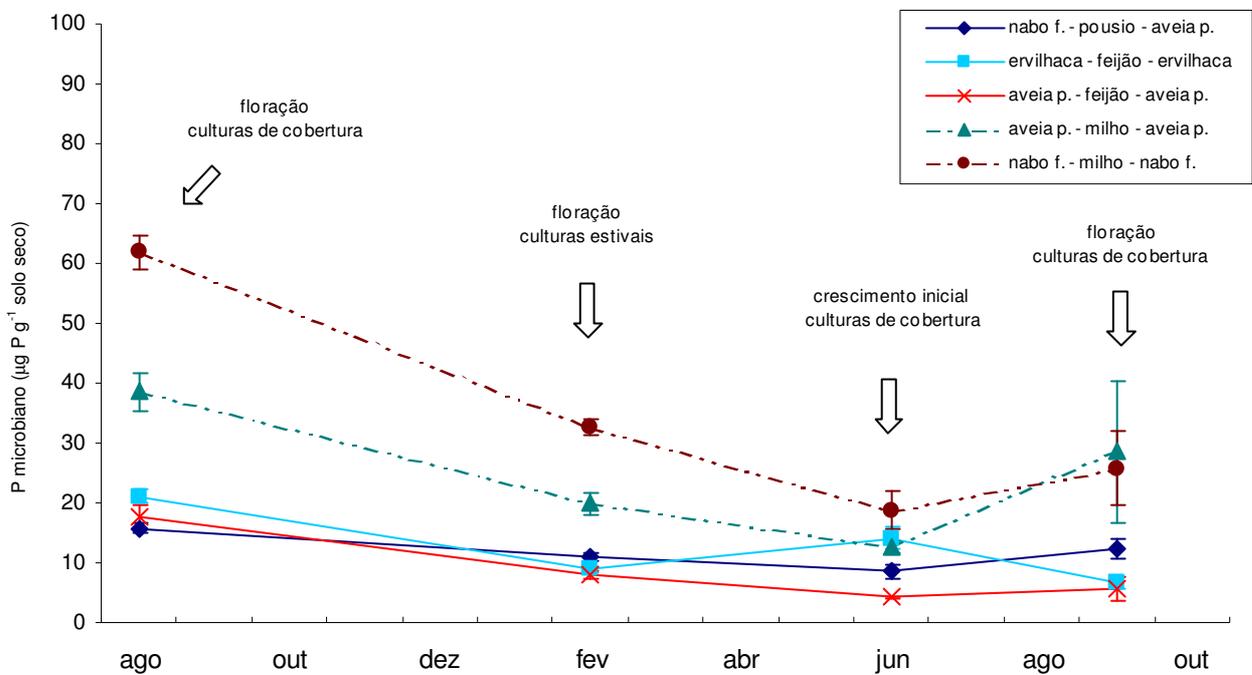
Os teores de fósforo extraível, que estimam as fontes minerais de ciclagem rápida do nutriente, variaram entre os sistemas agrícolas durante os períodos avaliados (figura 1). As áreas dividiram-se em dois grupos, onde os solos dos sistemas sucessionais amostrados na Estação Experimental da Epagri apresentaram as maiores concentrações de fósforo extraível em todos os períodos de coleta. Essa variação no nível de fertilidade ocorreu em função do regime e do tipo de fertilização fosfatada utilizada.



**FIGURA 1** - Concentração de fósforo extraível (Mehlich-1), em  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Latossolo Vermelho Distroférrico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio. Linhas tracejadas representam solos amostrados na Estação Experimental Epagri - Campos Novos. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

Os valores de fósforo extraível foram superiores nas áreas manejadas com a cultura do nabo forrageiro na Epagri, durante o estágio de floração e no início da segunda estação de crescimento dessa espécie. As amostras do solo manejado com aveia preta nesse local apresentaram declínio considerável na concentração de fósforo extraível no início do crescimento das espécies hibernais, que possivelmente está ligado a problemas de coleta.

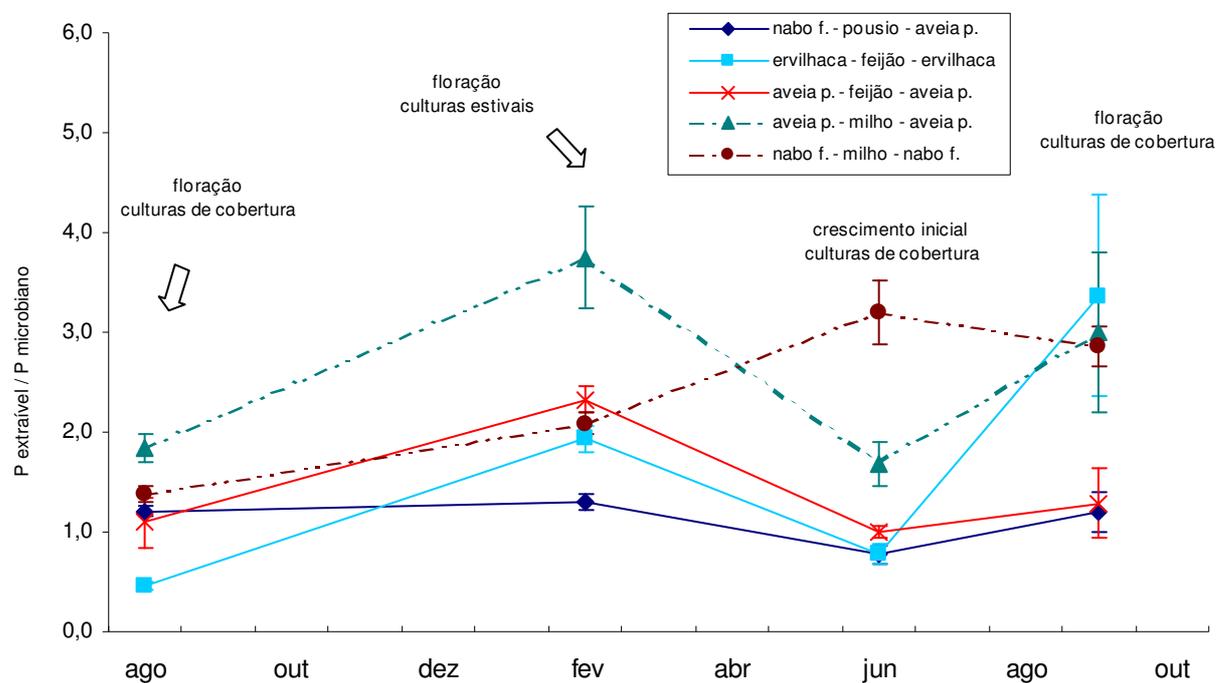
Os teores de fósforo extraível apresentaram reflexo nos padrões de incorporação de fósforo na biomassa microbiana. O efeito foi visível no primeiro estágio de floração amostrado, onde se constatou maior acúmulo de fósforo microbiano no solo manejado com a cultura do nabo forrageiro, seguido de aveia preta, na Epagri (figura 2).



**FIGURA 2** - Concentração de fósforo da biomassa microbiana, em  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio. Linhas tracejadas representam solos amostrados na Estação Experimental Epagri - Campos Novos. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

As amostras de solo das áreas da Epagri apresentaram um declínio considerável na concentração de fósforo microbiano entre a floração das espécies hibernais e a estação seguinte, no crescimento inicial dessas culturas, onde se apresentam as menores diferenças entre os tratamentos. Os teores de fósforo microbiano, em valores médios, tiveram um ligeiro aumento no período seguinte, por ocasião da floração das espécies hibernais, acompanhando o padrão de concentração de fósforo extraível.

A quantidade de fósforo extraível em função dos teores de fósforo microbiano, obtido pela razão entre os valores absolutos dessas variáveis, permite observar as diferenças entre os tratamentos através de valores relativos (figura 3). As amostras do solo manejado com aveia preta na Epagri apresentaram o maior índice de fósforo extraível em relação à quantidade imobilizada na biomassa microbiana nas florações dessa espécie e do milho no período sucessional seguinte, em relação ao nabo forrageiro no mesmo local. O maior acúmulo de fósforo microbiano ocorreu na área manejada com ervilhaca, onde a quantidade de fósforo imobilizada na biomassa microbiana foi em torno de duas vezes o nível de fósforo extraível.

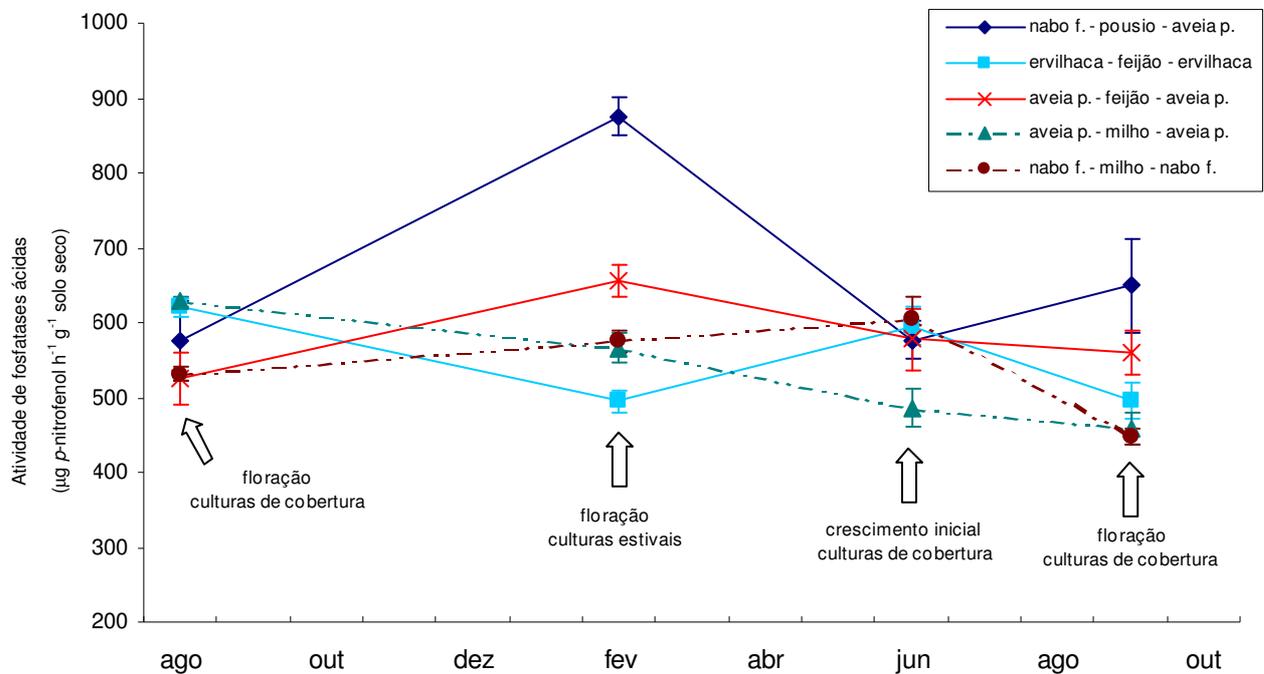


**FIGURA 3** - Relação entre os teores de fósforo extraível e fósforo da biomassa microbiana de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio. Linhas tracejadas representam solos amostrados na Estação Experimental Epagri - Campos Novos. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

Os resultados durante a segunda estação de floração, repetiram os índices constatados na primeira floração para os sistemas manejados, nessa ocasião, com aveia preta e nabo forrageiro em propriedades rurais. O sistema agrícola cultivado com ervilhaca apresentou a variação mais discrepante, possivelmente um efeito da disponibilidade de fósforo sobre a incorporação do nutriente na biomassa microbiana e em função da variabilidade amostral.

### VI.1.2. Atividade de fosfatases ácidas no solo

A atividade de fosfatases ácidas no período de floração das culturas de cobertura foi superior na área cultivada com aveia preta na Epagri em comparação ao solo manejado com nabo forrageiro no mesmo local (figura 4). Nessas situações de cultivo, a diferença na atividade enzimática entre as espécies de cobertura hiberna não persistiu no período seguinte, por ocasião da floração da cultura do milho. Nessa amostragem, o maior valor de atividade de fosfatases ácidas foi constatado na área em pousio, após cultivo de nabo forrageiro.

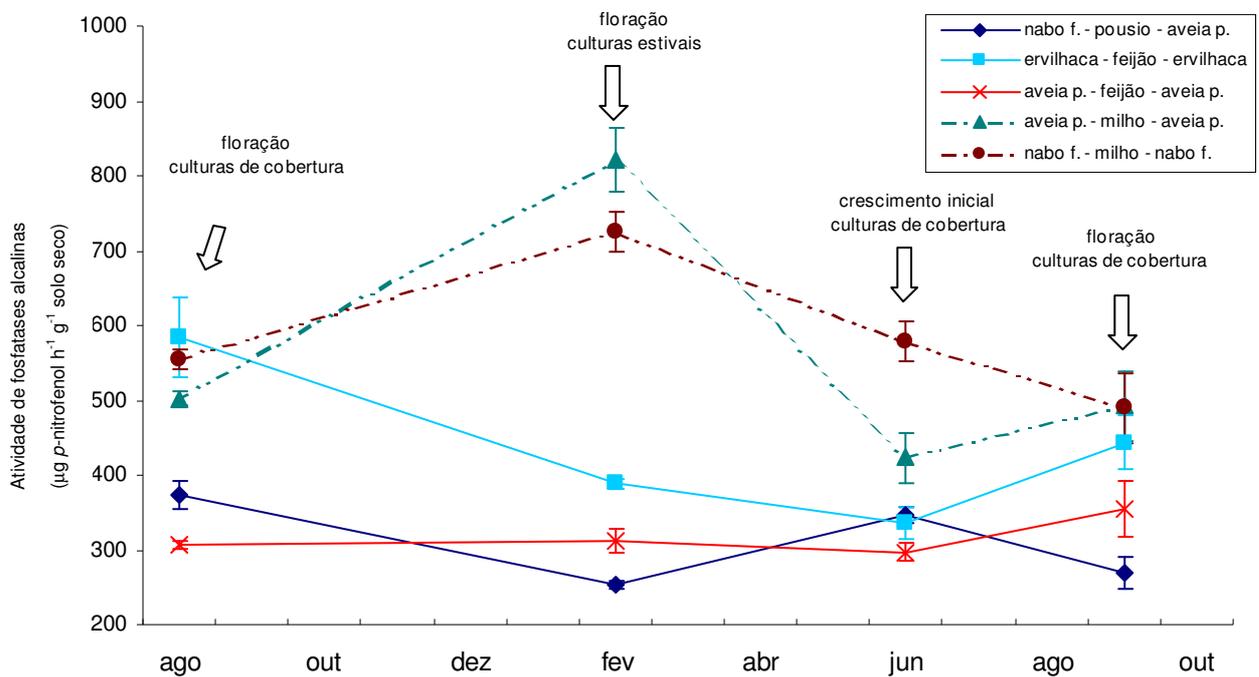


**FIGURA 4** - Atividade de fosfatases ácidas, em  $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol h}^{-1} \text{ g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessoriais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio. Linhas tracejadas representam solos amostrados na Estação Experimental Epagri - Campos Novos. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

O nível de atividade das fosfatases ácidas diminuiu na floração das culturas estivais nos solos das sucessões ervilhaca/feijão e aveia preta/milho. No início da segunda estação de crescimento das espécies hibernais, a atividade de fosfatases ácidas foi superior nas áreas cultivadas com nabo forrageiro na Epagri em relação às amostras de solo sob cultivo de aveia preta no mesmo local. Na quarta amostragem, os tratamentos na Epagri não variaram, como constatado na floração anterior das espécies de cobertura.

### VI.1.3. Atividade de fosfatases alcalinas no solo

As variações na atividade de fosfatases alcalinas na floração das culturas de cobertura foram semelhantes ao padrão de atividade das fosfatases ácidas. Nesse período, os solos cultivados com nabo forrageiro e aveia preta na Epagri e ervilhaca em propriedade rural apresentaram valores superiores aos demais tratamentos (figura 5).



**FIGURA 5** - Atividade de fosfatases alcalinas, em  $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol h}^{-1} \text{ g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio. Linhas tracejadas representam solos amostrados na Estação Experimental Epagri - Campos Novos. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

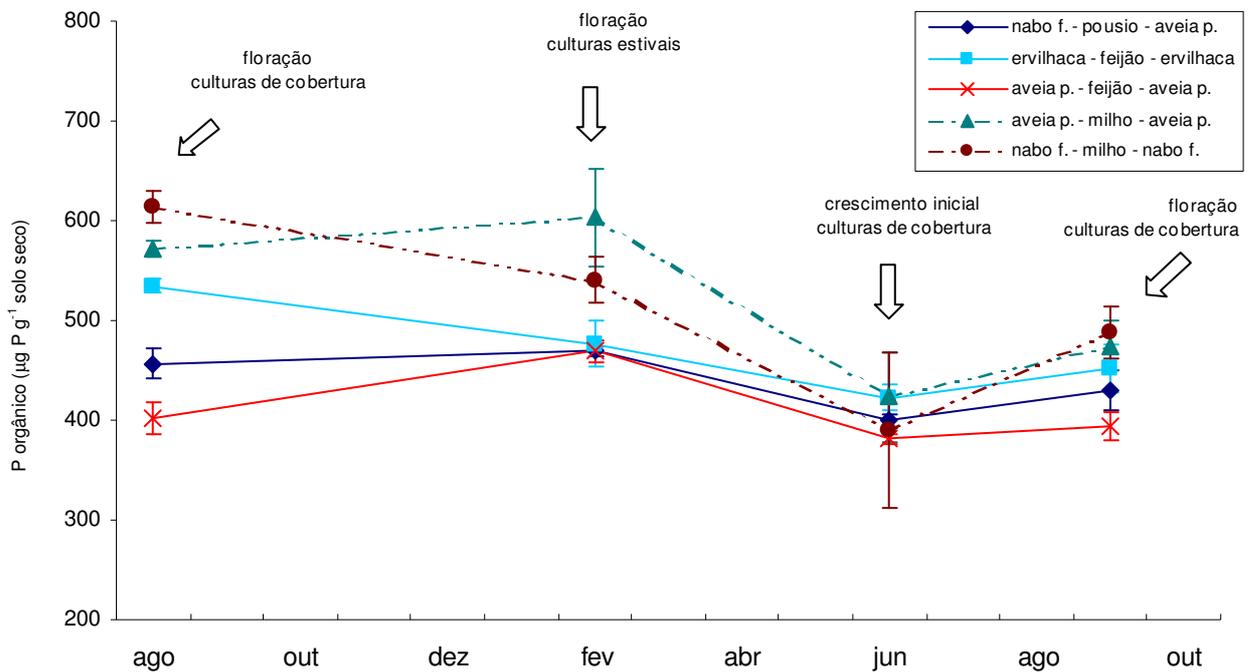
A atividade das fosfatases alcalinas na floração das culturas estivais foi superior nos solos das sucessões nabo forrageiro/milho e aveia preta/milho na Epagri, os quais apresentaram um aumento em relação à amostragem anterior. As amostras do solo da sucessão ervilhaca/feijão e do solo em pousio apresentaram declínio na atividade dessas enzimas. O menor nível de atividade foi observado nesse último tratamento, contrastando com o nível superior de atividade de fosfatases ácidas no mesmo período.

No início de crescimento das culturas de cobertura, a atividade de fosfatases alcalinas dos solos amostrados na Epagri foi superior na área cultivada com nabo forrageiro em relação

à aveia preta, seguindo o resultado constatado para a atividade de fosfatases ácidas. Na segunda floração das espécies hibernais, os níveis de atividade das fosfatases alcalinas foram semelhantes ao período anterior de floração das culturas hibernais, com valores superiores nas áreas da Epagri e na área cultivada com ervilhaca em relação ao solo cultivado com nabo forrageiro na primeira amostragem.

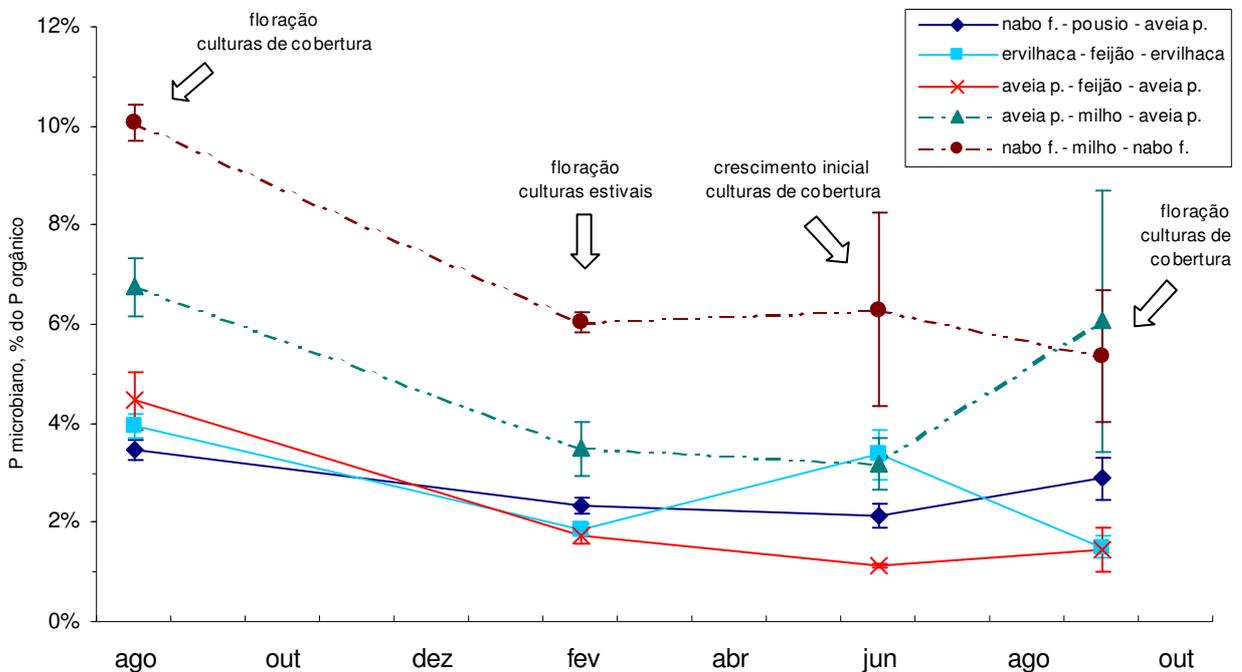
#### VI.1.4. Teores de fósforo da matéria orgânica do solo

As concentrações de fósforo orgânico, durante a floração das culturas de cobertura, apresentaram os maiores níveis nos solo manejado com nabo forrageiro na Epagri, seguido de aveia preta no mesmo local (figura 6).



**FIGURA 6** - Concentração de fósforo da matéria orgânica, em  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio. Linhas tracejadas representam solos amostrados na Estação Experimental Epagri - Campos Novos. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

As concentrações relativas de fósforo da biomassa microbiana, estimadas como porcentagens dos teores de fósforo orgânico (figura 7), foram superiores no solo cultivado com nabo forrageiro na Epagri em relação às amostras do solo manejado com aveia preta no mesmo local. Essa tendência se manteve no período seguinte e no início da estação de crescimento das espécies hibernais, onde os valores médios desses tratamentos foram semelhantes ao período de amostragem anterior. Na segunda floração das culturas de cobertura, as diferenças numéricas na concentração relativa de fósforo microbiano dos solos amostrados em tais áreas não repetiram os valores da primeira amostragem. Solos de propriedades rurais não apresentaram variações consistentes nesse índice.

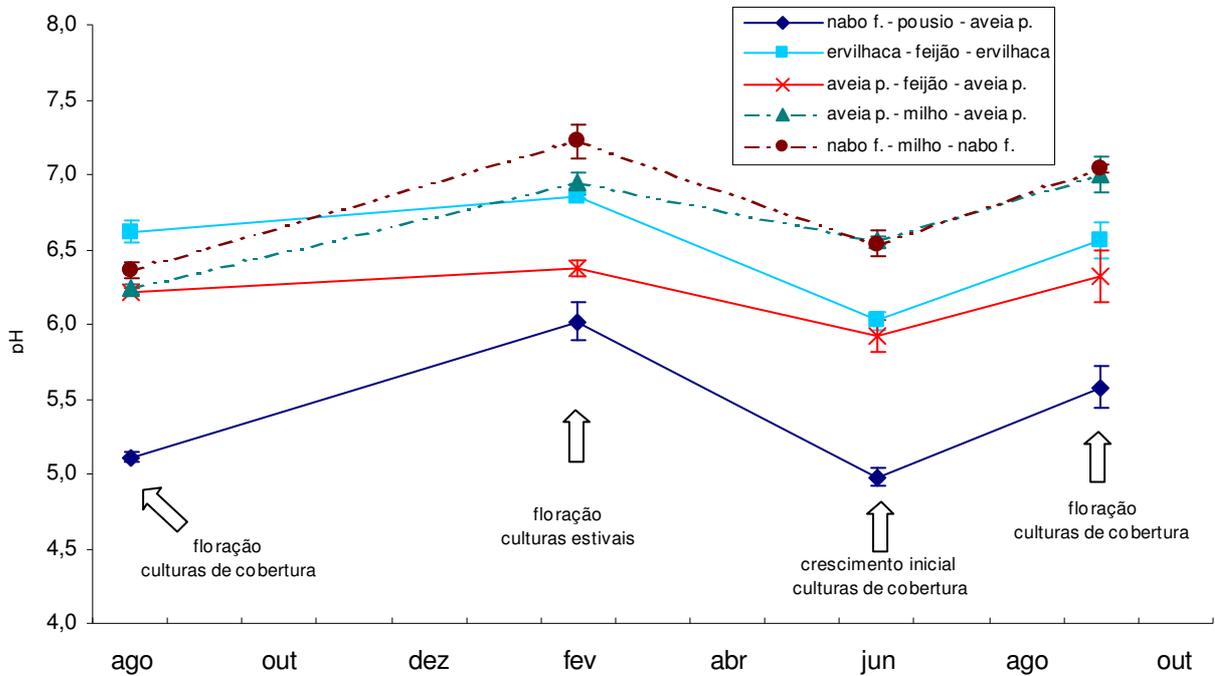


**FIGURA 7** - Teor de fósforo microbiano, como porcentagem (%) do teor de fósforo orgânico, de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio. Linhas tracejadas representam solos amostrados na Estação Experimental Epagri - Campos Novos. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

#### VI.1.5. pH do solo

Os valores de pH do solo durante o período de floração das culturas de cobertura foram menores nas amostras de solo manejado com nabo forrageiro, seguido dos solos em

pousio e cultivado com aveia (figura 8). As diferenças do pH entre os tratamentos, excetuando-se os solos da sucessão nabo forrageiro/pousio/aveia preta, não ultrapassaram 0,8 unidades de pH.



**FIGURA 8** - pH de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico do município de Campos Novos - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com nabo forrageiro, ervilhaca, aveia preta, feijão e milho ou em pousio. Linhas tracejadas representam solos amostrados na Estação Experimental Epagri - Campos Novos. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

### VI.1.6. Análise de correlações entre as variáveis

Os teores de fósforo extraível e de fósforo microbiano tiveram correlações positivas e significativas ( $r > 0,80$ ) nos quatro períodos de amostragens. Isso demonstra que o nível de disponibilidade de fósforo influenciou de forma determinante a incorporação ou acúmulo desse nutriente na biomassa microbiana.

Os níveis de atividade de fosfatases ácidas apresentaram correlações negativas com os teores de fósforo extraível na floração das culturas estacionais (tabela 4), e na segunda floração das culturas de cobertura hibernais (tabela 6). Não foram constatadas correlações significativas entre a atividade de fosfatases ácidas e os teores de fósforo microbiano.

As concentrações de fósforo orgânico apresentaram correlações significativas com os teores de fósforo extraível nas amostras de solo coletadas nas duas estações de floração das culturas de cobertura hibernais (tabela 3 e 6) e na floração das espécies estivais (tabela 4). O grau de correlação entre fósforo orgânico e fósforo extraível durante os períodos analisados seguiu os níveis de correlações entre fósforo orgânico e atividade de fosfatases alcalinas.

**TABELA 3** - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre teores de fósforo extraível (*P ext.*), microbiano (*P mic.*) e orgânico (*P org.*), atividade de fosfatases ácidas (*Pases ácidas*) e alcalinas (*Pases alc.*) e pH de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico coletadas na plena floração das culturas hibernais de sistemas agrícolas de Campos Novos - SC.

	<i>P ext.</i>	<i>P mic.</i>	<i>Pases ácidas</i>	<i>Pases alc.</i>	<i>P org.</i>	pH
<i>P ext.</i>	1	0,91 <sup>****</sup>	-0,06 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>ns</sup>	0,75 <sup>****</sup>	0,22 <sup>ns</sup>
<i>P mic.</i>		1	-0,04 <sup>ns</sup>	0,47 <sup>*</sup>	0,79 <sup>****</sup>	0,37 <sup>ns</sup>
<i>Pases ácidas</i>			1	0,24 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>
<i>Pases alc.</i>				1	0,78 <sup>****</sup>	0,56 <sup>**</sup>
<i>P org.</i>					1	0,43 <sup>*</sup>
pH						1

<sup>\*</sup>,  $P \leq 0,05$ ; <sup>\*\*</sup>,  $P \leq 0,01$ ; <sup>\*\*\*</sup>,  $P \leq 0,001$ ; <sup>\*\*\*\*</sup>,  $P \leq 0,0001$ .

**TABELA 4** - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre teores de fósforo extraível (*P ext.*), microbiano (*P mic.*) e orgânico (*P org.*), atividade de fosfatases ácidas (*Pases ácidas*) e alcalinas (*Pases alc.*) e pH de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico coletadas na plena floração das culturas estivais de sistemas agrícolas de Campos Novos - SC.

	<i>P ext.</i>	<i>P mic.</i>	<i>Pases ácidas</i>	<i>Pases alc.</i>	<i>P org.</i>	pH
<i>P ext.</i>	1	0,83 <sup>****</sup>	-0,41 <sup>*</sup>	0,95 <sup>****</sup>	0,70 <sup>***</sup>	0,68 <sup>***</sup>
<i>P mic.</i>		1	-0,22 <sup>ns</sup>	0,80 <sup>****</sup>	0,39 <sup>ns</sup>	0,68 <sup>***</sup>
<i>Pases ácidas</i>			1	-0,51 <sup>**</sup>	-0,38 <sup>ns</sup>	-0,79 <sup>****</sup>
<i>Pases alc.</i>				1	0,57 <sup>**</sup>	0,78 <sup>****</sup>
<i>P org.</i>					1	0,41 <sup>*</sup>
pH						1

<sup>\*</sup>,  $P \leq 0,05$ ; <sup>\*\*</sup>,  $P \leq 0,01$ ; <sup>\*\*\*</sup>,  $P \leq 0,001$ ; <sup>\*\*\*\*</sup>,  $P \leq 0,0001$ .

Durante o crescimento inicial das plantas de cobertura (tabela 5), quando não se verificaram correlações entre fósforo orgânico e fósforo extraível e atividade de fosfatases alcalinas, constataram-se correlações significativas da atividade de fosfatases alcalinas com os teores de fósforo extraível e de fósforo microbiano. Por outro lado, não foram constatadas correlações significativas entre fósforo orgânico e atividade de fosfatases ácidas.

**TABELA 5** - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre teores de fósforo extraível (*P ext.*), microbiano (*P mic.*) e orgânico (*P org.*), atividade de fosfatases ácidas (*Pases ácidas*) e alcalinas (*Pases alc.*) e pH de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico coletadas no início da segunda estação de crescimento das culturas hibernais de sistemas agrícolas de Campos Novos - SC.

	<i>P ext.</i>	<i>P mic.</i>	<i>Pases ácidas</i>	<i>Pases alc.</i>	<i>P org.</i>	pH
<i>P ext.</i>	1	0,80 ****	0,22 <sup>ns</sup>	0,94 ****	-0,24 <sup>ns</sup>	0,61 **
<i>P mic.</i>		1	0,32 <sup>ns</sup>	0,73 ****	-0,33 <sup>ns</sup>	0,48 *
<i>Pases ácidas</i>			1	0,20 <sup>ns</sup>	-0,36 <sup>ns</sup>	-0,23 <sup>ns</sup>
<i>Pases alc.</i>				1	-0,15 <sup>ns</sup>	0,53 *
<i>P org.</i>					1	-0,05 <sup>ns</sup>
pH						1

\*,  $P \leq 0,05$ ; \*\*,  $P \leq 0,01$ ; \*\*\*,  $P \leq 0,001$ ; \*\*\*\*,  $P \leq 0,0001$ .

**TABELA 6** - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre teores de fósforo extraível (*P ext.*), microbiano (*P mic.*) e orgânico (*P org.*), atividade de fosfatases ácidas (*Pases ácidas*) e alcalinas (*Pases alc.*) e pH de amostras de Latossolo Vermelho Distroférico coletadas na segunda estação de floração das culturas hibernais de sistemas agrícolas de Campos Novos - SC.

	<i>P ext.</i>	<i>P mic.</i>	<i>Pases ácidas</i>	<i>Pases alc.</i>	<i>P org.</i>	pH
<i>P ext.</i>	1	0,85 ****	-0,43 *	0,78 ****	0,52 **	0,68 ***
<i>P mic.</i>		1	-0,31 <sup>ns</sup>	0,60 **	0,32 <sup>ns</sup>	0,48 *
<i>Pases ácidas</i>			1	-0,49 *	-0,30 <sup>ns</sup>	-0,84 ****
<i>Pases alc.</i>				1	0,59 **	0,79 ****
<i>P org.</i>					1	0,45 *
pH						1

\*,  $P \leq 0,05$ ; \*\*,  $P \leq 0,01$ ; \*\*\*,  $P \leq 0,001$ ; \*\*\*\*,  $P \leq 0,0001$ .

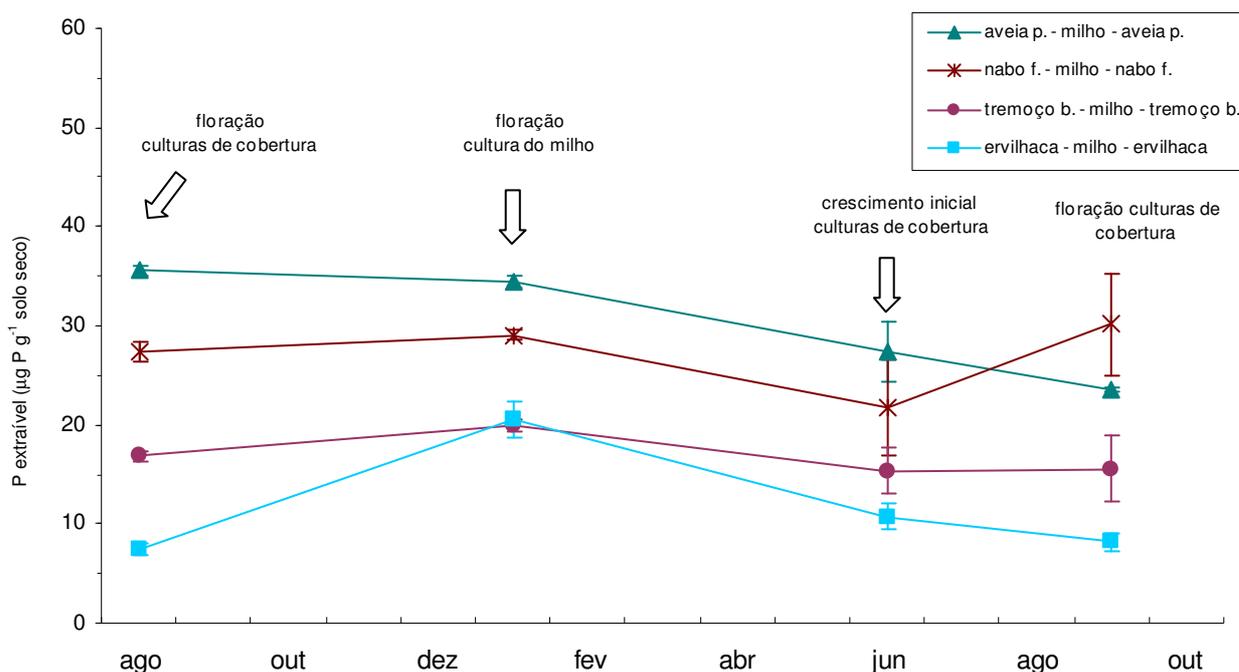
Durante a primeira floração das espécies hibernais foi constatada correlação positiva e significativa entre a atividade de fosfatases alcalinas e fósforo microbiano (tabela 3). Nos períodos seguintes, houve aumento na força das relações entre essas variáveis, constatando-se também correlações positivas entre a atividade de fosfatases alcalinas e fósforo extraível. As correlações positivas e significativas entre pH e atividade de fosfatases alcalinas em todas as amostragens, e as correlações negativas entre pH e atividade de fosfatases ácidas na floração das culturas estivais e na segunda floração amostrada das espécies hibernais, indicam efeito regulador das condições químicas sobre os valores contrastantes da atividade de enzimas.

## ***VI. 2. Sistemas agrícolas amostrados em Atalanta***

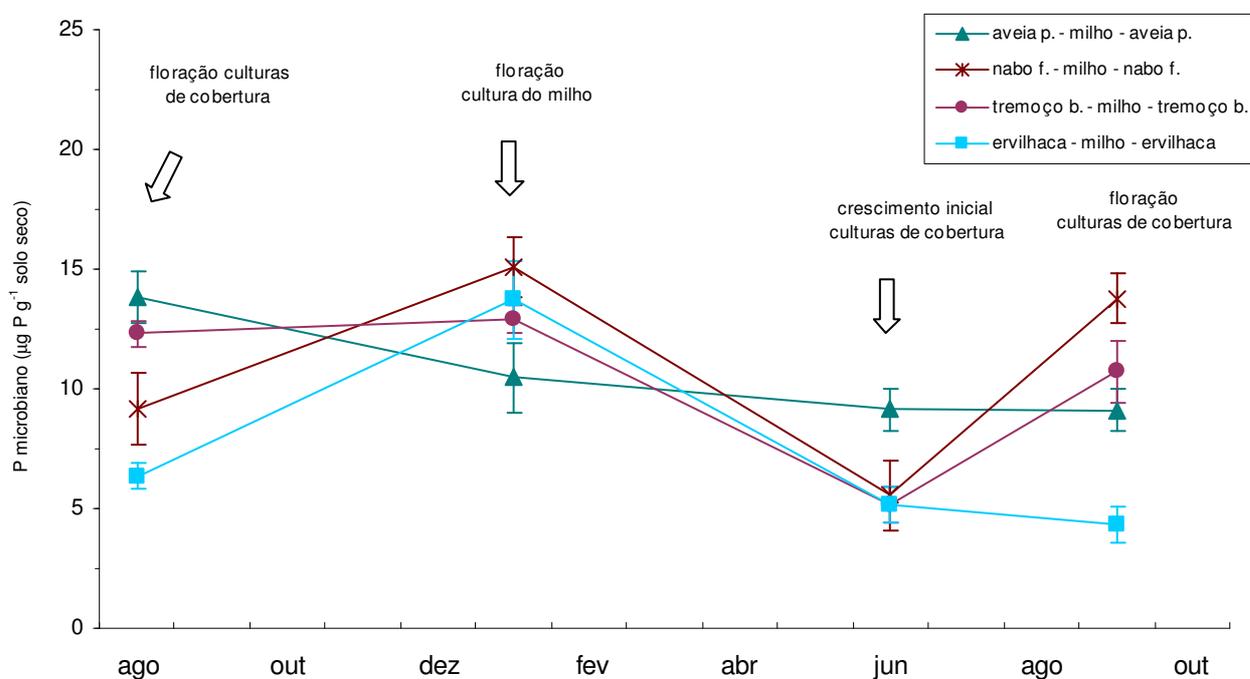
### *VI.2.1. Teores de fósforo extraível e fósforo da biomassa microbiana do solo*

Os níveis de fósforo extraível nos solos amostrados variaram na floração das culturas de cobertura, com os maiores teores constatados no sistema manejado com aveia preta, seguido de nabo forrageiro (figura 9). Essa tendência se manteve na floração da cultura do milho, ocorrendo uma aproximação entre os teores dos solos cultivados com tremoço branco e ervilhaca. As diferenças entre os tratamentos diminuíram no período seguinte, durante o crescimento inicial das culturas de cobertura.

Os teores de fósforo extraível no solo manejado com aveia preta refletiram-se em valores superiores de fósforo imobilizado na biomassa microbiana. Entretanto, a concentração de fósforo microbiano desse tratamento não foi diferente do teor constatado no solo cultivado com tremoço branco (figura 10). Na floração da cultura estival, o teor médio de fósforo microbiano foi numericamente maior nas amostras de solo da sucessão nabo forrageiro/milho. Durante a estação seguinte, no crescimento inicial das plantas de cobertura, o solo cultivado com aveia preta apresentou maior concentração de fósforo microbiano, e os teores de fósforo microbiano diminuíram nas áreas manejadas com nabo forrageiro, tremoço branco e ervilhaca, seguindo os padrões de valores de fósforo extraível. O teor de fósforo microbiano foi superior no solo da área manejada com nabo forrageiro, seguido do tratamento com tremoço branco, durante a segunda floração das culturas de cobertura.



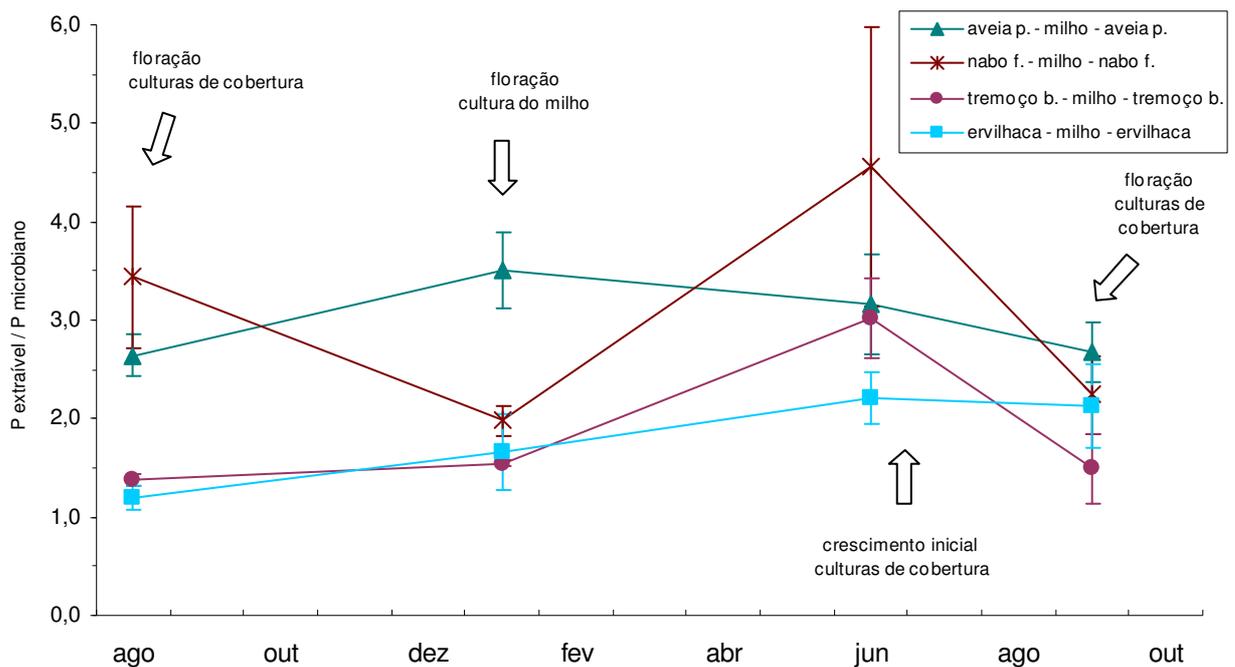
**FIGURA 9** - Concentração de fósforo extraível (Mehlich-1), em  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho. Barras indicam valores do desvio padrão da média.



**FIGURA 10** - Concentração de fósforo da biomassa microbiana, em  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

As concentrações relativas de fósforo extraível, obtidas pela relação entre essa variável e o teor de fósforo da biomassa microbiana de cada amostra, apresentaram valores superiores nos solos manejados com aveia preta e nabo forrageiro durante a floração dessas espécies (figura 11). Na estação seguinte, durante a floração da cultura do milho, essa tendência se manteve para o solo cultivado com aveia preta, enquanto o tratamento com manejo de nabo forrageiro aproximou-se dos valores dos solos cultivados anteriormente com ervilhaca e tremoço branco.

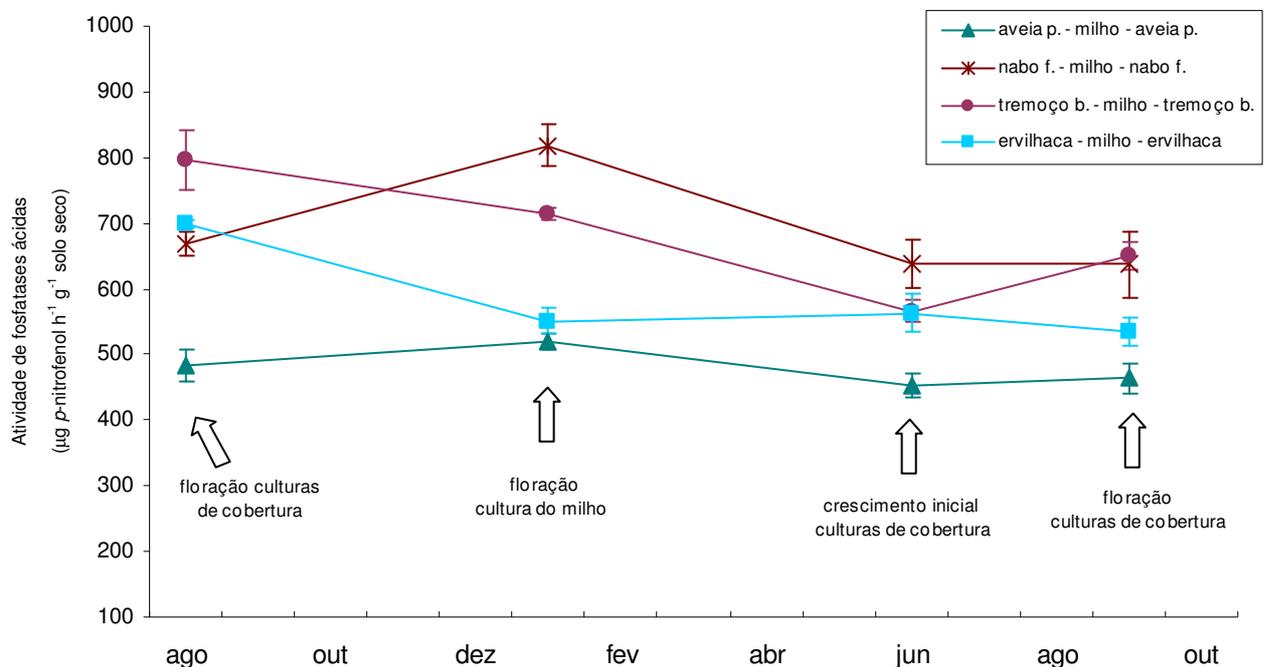
Nas amostragens realizadas durante a segunda estação de crescimento das culturas de cobertura, os índices apresentaram valores semelhantes, com os menores valores encontrados nas amostras do solo manejado com tremoço branco e ervilhaca, embora não tenham sido diferentes dos outros tratamentos.



**FIGURA 11** - Relação entre os teores de fósforo extraível e fósforo da biomassa microbiana de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

### VI.2.2. Atividade de fosfatases ácidas no solo

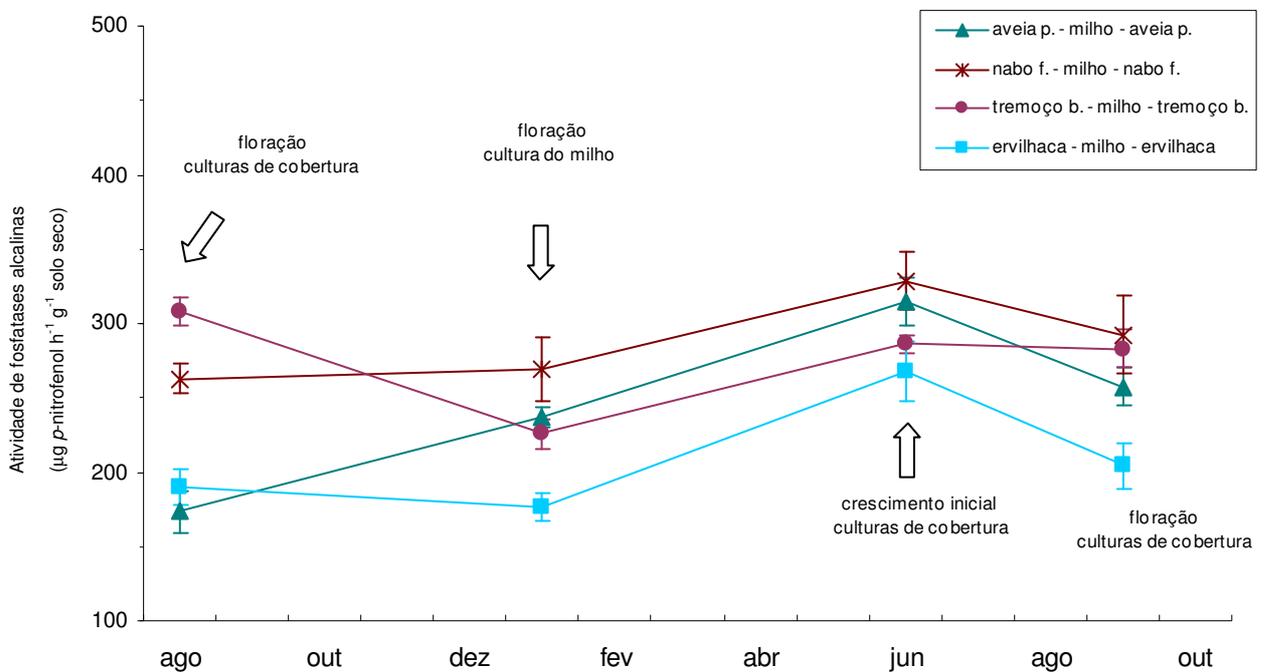
A atividade de fosfatases ácidas variou entre as plantas de cobertura no período de floração (figura 12), apresentando valor superior nos solos manejados com tremoço branco, ervilhaca e nabo forrageiro, em relação às amostras do solo cultivado com aveia preta. No período subsequente, durante a floração da cultura do milho, fosfatases ácidas apresentaram níveis de atividade maior nos solos das áreas cultivadas anteriormente com nabo forrageiro e tremoço branco. Depois da colheita do milho e da semeadura das espécies de cobertura, as diferenças entre os tratamentos diminuíram, com níveis de atividade enzimática maior nas áreas manejadas com nabo forrageiro, tremoço branco e ervilhaca em relação às amostras do solo cultivado com aveia preta. Na segunda estação de floração amostrada, a atividade de fosfatases ácidas novamente foi superior nas amostras dos solos manejados com nabo forrageiro e tremoço branco, que diferiram da área manejada com aveia preta, indicando a persistência dos níveis de atividade de fosfatases ácidas em função da espécie de cobertura manejada.



**FIGURA 12** - Atividade de fosfatases ácidas, em  $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol h}^{-1} \text{g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

### VI.2.3. Atividade de fosfatases alcalinas no solo

A atividade de fosfatases alcalinas apresentou padrão semelhante à atividade de fosfatases ácidas (figura 13). Solos manejados com tremoço branco e nabo forrageiro apresentaram maior atividade de fosfatases alcalinas no período de floração, em relação aos tratamentos cultivados com ervilhaca e aveia preta. Na estação seguinte de cultivo, durante a floração da cultura do milho, houve diminuição na atividade enzimática no solo manejado anteriormente com tremoço branco e aumento no tratamento com aveia preta, o qual apresentou nível semelhante aos solos manejados com nabo forrageiro e tremoço branco.

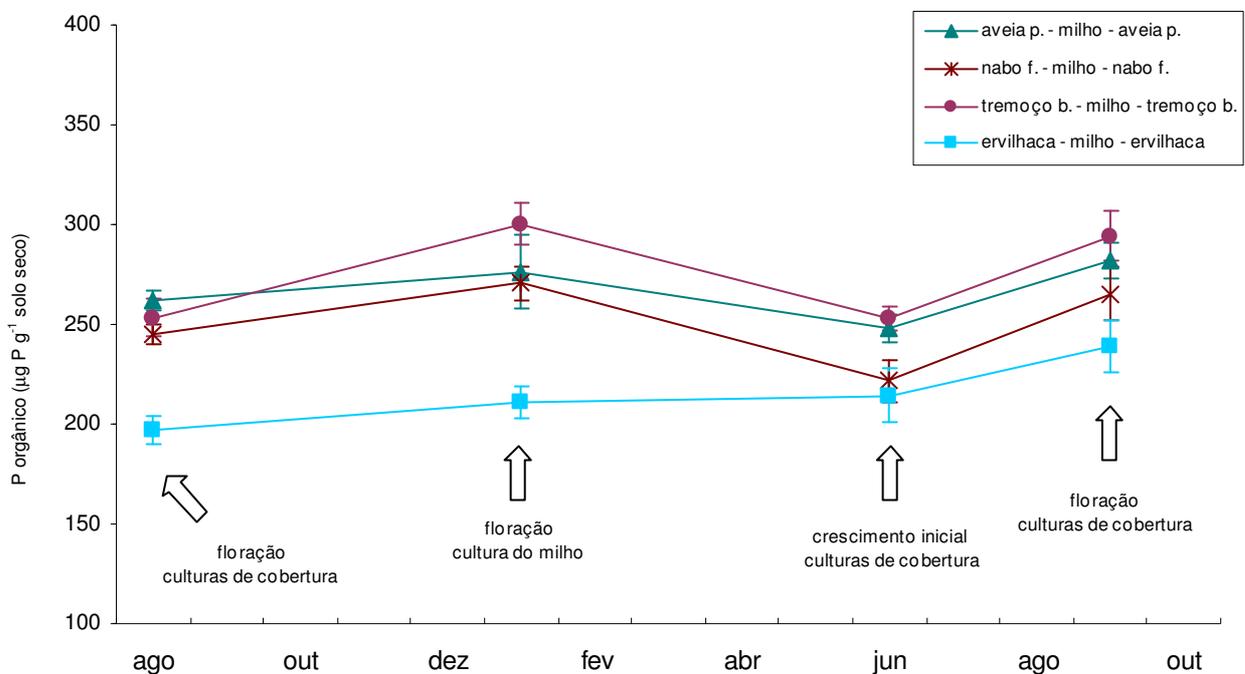


**FIGURA 13** - Atividade de fosfatases alcalinas, em  $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol h}^{-1} \text{ g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

O efeito das culturas de cobertura na atividade de fosfatases alcalinas foi dissipado no início da segunda estação de crescimento dessas espécies hibernais, apesar da tendência de os valores serem maiores no sistema manejado com nabo forrageiro. Nesse período, os níveis de atividade de fosfatases alcalinas apresentaram aumento em relação à amostragem anterior. Na segunda floração das culturas de cobertura, os maiores valores de atividade de fosfatases alcalinas foram constatados nos solos manejados com nabo forrageiro, tremoço branco e aveia.

#### VI.2.4. Teores de fósforo da matéria orgânica do solo

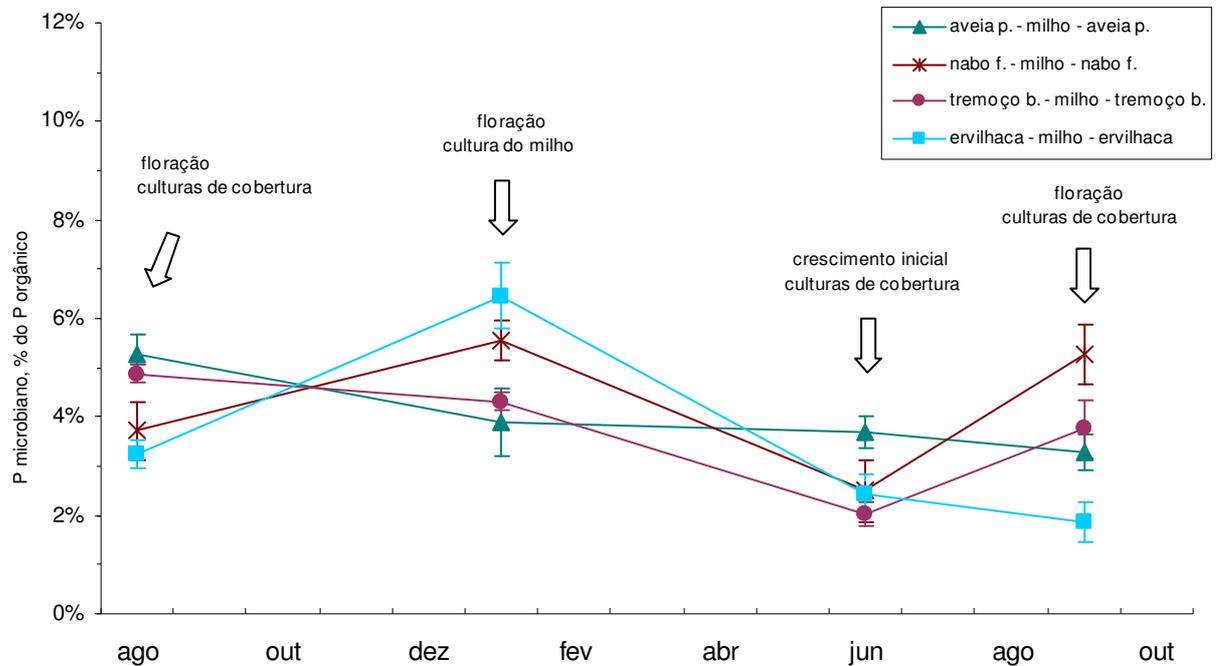
Nas amostragens realizadas na primeira floração das culturas de cobertura e na floração da cultura do milho, os níveis de fósforo orgânico foram maiores nos solos manejados com aveia e tremoço branco e nabo forrageiro, em relação ao solo cultivado com ervilhaca (figura 14). As diferenças entre os tratamentos diminuíram na segunda estação de crescimento das espécies hibernais, com níveis de fósforo orgânico numericamente superior nas áreas manejadas com aveia preta e tremoço branco.



**FIGURA 14** - Concentração de fósforo da matéria orgânica, em  $\mu\text{g P g}^{-1}$  solo seco, de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

As concentrações relativas de fósforo da biomassa microbiana, estimadas como porcentagem do teor de fósforo orgânico, não foram diferentes entre aveia preta e tremoço branco na floração dessas espécies (figura 15). Na floração do milho, os valores da relação foram superiores nos solos cultivados anteriormente com ervilhaca e nabo forrageiro, em relação aos solos cultivados com tremoço branco e aveia preta. Esse perfil não se manteve no início da segunda estação de crescimento das culturas de cobertura, onde as diferenças entre os teores relativos de fósforo microbiano dos tratamentos se estreitaram. Na segunda floração

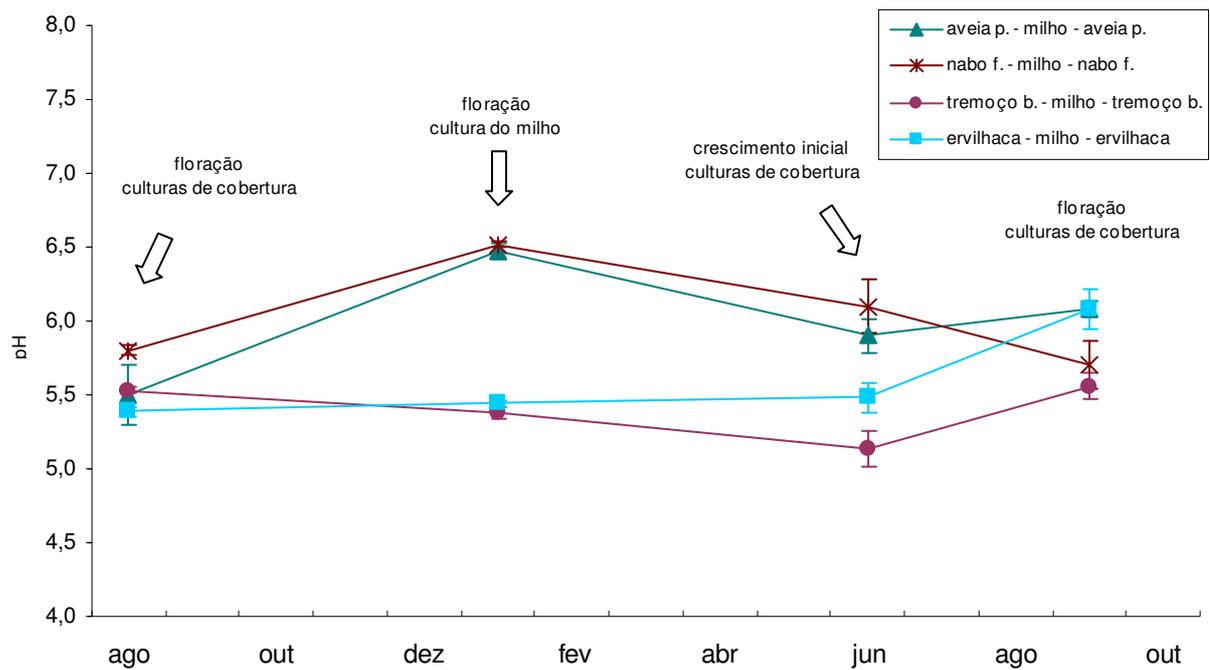
das espécies hibernais, a relação entre fósforo microbiano e fósforo orgânico nos solos foram maiores nos sistemas manejados com nabo forrageiro, tremoço branco e aveia preta, em relação ao solo cultivado com ervilhaca.



**FIGURA 15** - Teor de fósforo microbiano, como porcentagem (%) do teor de fósforo orgânico, de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

### VI.2.5. pH do solo

O pH não foi diferente entre os solos amostrados no período de floração das culturas hibernais, apresentando uma variação média de 0,4 unidade de pH entre o maior e o menor valor (figura 16). Nos períodos seguintes, na floração da cultura do milho e no início do crescimento das espécies hibernais, as amostras de solo das áreas cultivadas com nabo forrageiro e aveia preta apresentaram valores superiores de pH. Na segunda floração das culturas de cobertura, os resultados variaram no máximo 0,5 unidade de pH entre os tratamentos, ocorrendo valores semelhantes entre os tratamentos.



**FIGURA 16** - pH de amostras de Cambissolo Háplico do município de Atalanta - SC, coletadas em sistemas sucessionais manejados com aveia preta, nabo forrageiro, tremoço branco, ervilhaca e milho. Barras indicam valores do desvio padrão da média.

### VI.2.6. Análise de correlações entre as variáveis

Os teores de fósforo extraível e fósforo microbiano apresentaram correlações positivas e significativas na primeira amostragem, na floração das culturas de cobertura (tabela 7), e na segunda estação de crescimento das culturas hibernais (tabelas 9 e 10), indicando - da mesma forma que os resultados obtidos nas amostragens dos sistemas agrícolas de Campos Novos - uma regulação dos níveis de fósforo imobilizado na biomassa microbiana pela disponibilidade de fósforo a partir de fontes de ciclagem rápida.

Correlações negativas e significativas foram constatadas entre fósforo extraível e atividade de fosfatases ácidas na primeira floração das culturas de cobertura, sugerindo que o aumento na disponibilidade de fósforo promoveu a diminuição da atividade dessa enzima. Esse efeito não foi observado nesse período sobre a atividade de fosfatases alcalinas, que não se correlacionou significativamente com os níveis de fósforo extraível. Nos períodos seguintes, não foram observadas correlações entre atividade de fosfatases ácidas e fósforo extraível, inclusive na segunda floração amostrada. Por outro lado, a atividade de fosfatases

alcalinas correlacionou-se de forma significativa e positiva com os níveis de fósforo extraível na floração da cultura do milho (tabela 8), e na estação seguinte, no crescimento inicial das culturas de cobertura. Na segunda floração dessas espécies, a correlação entre essas variáveis não foi significativa.

**TABELA 7** - Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre teores de fósforo extraível ( $P_{ext.}$ ), microbiano ( $P_{mic.}$ ) e orgânico ( $P_{org.}$ ), atividade de fosfatases ácidas ( $Pases\ ácidas$ ) e alcalinas ( $Pases\ alc.$ ) e pH de amostras de Cambissolo Háplico coletadas na plena floração das culturas hibernais de sistemas agrícolas de Atalanta - SC.

	$P_{ext.}$	$P_{mic.}$	$Pases\ ácidas$	$Pases\ alc.$	$P_{org.}$	pH
$P_{ext.}$	1	0,58 **	-0,67 **	-0,14 <sup>ns</sup>	0,73 ***	0,26 <sup>ns</sup>
$P_{mic.}$		1	-0,24 <sup>ns</sup>	0,24 <sup>ns</sup>	0,74 ***	-0,12 <sup>ns</sup>
$Pases\ ácidas$			1	0,64 **	-0,19 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>
$Pases\ alc.$				1	0,29 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>
$P_{org.}$					1	0,24 <sup>ns</sup>
pH						1

<sup>\*</sup>,  $P \leq 0,05$ ; <sup>\*\*</sup>,  $P \leq 0,01$ ; <sup>\*\*\*</sup>,  $P \leq 0,001$ ; <sup>\*\*\*\*</sup>,  $P \leq 0,0001$ .

O conteúdo de fósforo microbiano não se correlacionou com a atividade de fosfatases ácidas e alcalinas na floração das culturas de cobertura e no início do crescimento dessas espécies, na estação hibernal seguinte. Na floração da cultura do milho, os teores de fósforo microbiano apresentaram correlação positiva e significativa com a atividade de fosfatases ácidas, e na segunda floração das culturas de cobertura, com a atividade de fosfatases alcalinas. Nessas situações, as correlações em parte podem ser explicadas pelos maiores valores de fósforo microbiano e de atividade das fosfatases nos solos anteriormente cultivados com nabo forrageiro e tremoço branco, que são espécies não micorrízicas.

Foram constatados correlações positivas entre fósforo extraível e fósforo microbiano com os níveis de fósforo orgânico somente na primeira amostragem, por ocasião da floração das culturas de cobertura. Os teores de fósforo orgânico apresentaram correlações significativas e positivas com a atividade de fosfatases alcalinas na segunda e quarta amostragens, durante os estágios de florações das culturas do milho e das espécies de cobertura, respectivamente.

**TABELA 8** - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre teores de fósforo extraível (*P ext.*), microbiano (*P mic.*) e orgânico (*P org.*), atividade de fosfatases ácidas (*Pases ácidas*) e alcalinas (*Pases alc.*) e pH de amostras de Cambissolo Háplico coletadas na plena floração da cultura estival de sistemas agrícolas de Atalanta - SC.

	<i>P ext.</i>	<i>P mic.</i>	<i>Pases ácidas</i>	<i>Pases alc.</i>	<i>P org.</i>	pH
<i>P ext.</i>	1	-0,28 <sup>ns</sup>	-0,15 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>*</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	0,88 <sup>****</sup>
<i>P mic.</i>		1	0,58 <sup>**</sup>	-0,19 <sup>ns</sup>	-0,10 <sup>ns</sup>	-0,15 <sup>ns</sup>
<i>Pases ácidas</i>			1	0,41 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>
<i>Pases alc.</i>				1	0,57 <sup>**</sup>	0,62 <sup>**</sup>
<i>P org.</i>					1	0,21 <sup>ns</sup>
pH						1

<sup>\*</sup>,  $P \leq 0,05$ ; <sup>\*\*</sup>,  $P \leq 0,01$ ; <sup>\*\*\*</sup>,  $P \leq 0,001$ ; <sup>\*\*\*\*</sup>,  $P \leq 0,0001$ .

**TABELA 9** - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre teores de fósforo extraível (*P ext.*), microbiano (*P mic.*) e orgânico (*P org.*), atividade de fosfatases ácidas (*Pases ácidas*) e alcalinas (*Pases alc.*) e pH de amostras de Cambissolo Háplico coletadas no início da segunda estação de crescimento das culturas hibernais de sistemas agrícolas de Atalanta - SC.

	<i>P ext.</i>	<i>P mic.</i>	<i>Pases ácidas</i>	<i>Pases alc.</i>	<i>P org.</i>	pH
<i>P ext.</i>	1	0,50 <sup>*</sup>	-0,37 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>*</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>ns</sup>
<i>P mic.</i>		1	-0,28 <sup>ns</sup>	0,26 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>*</sup>
<i>Pases ácidas</i>			1	-0,10 <sup>ns</sup>	-0,18 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>
<i>Pases alc.</i>				1	-0,12 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>ns</sup>
<i>P org.</i>					1	0,09 <sup>ns</sup>
pH						1

<sup>\*</sup>,  $P \leq 0,05$ ; <sup>\*\*</sup>,  $P \leq 0,01$ ; <sup>\*\*\*</sup>,  $P \leq 0,001$ ; <sup>\*\*\*\*</sup>,  $P \leq 0,0001$ .

O pH não apresentou correlações significativas com os níveis de atividade de fosfatases alcalinas nas estações de crescimento e floração das culturas hibernais. Em relação à atividade de fosfatases ácidas, correlação significativa e negativa com pH foi encontrada somente na segunda estação de floração das culturas de cobertura.

**TABELA 10** - Coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre teores de fósforo extraível ( $P\ ext.$ ), microbiano ( $P\ mic.$ ) e orgânico ( $P\ org.$ ), atividade de fosfatases ácidas ( $Pases\ ácidas$ ) e alcalinas ( $Pases\ alc.$ ) e pH de amostras de Cambissolo Háptico coletadas na segunda estação de floração das culturas hibernais de sistemas agrícolas de Atalanta - SC.

	$P\ ext.$	$P\ mic.$	$Pases\ ácidas$	$Pases\ alc.$	$P\ org.$	pH
$P\ ext.$	1	0,64 **	-0,10 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	-0,13 <sup>ns</sup>
$P\ mic.$		1	0,35 <sup>ns</sup>	0,47 *	0,12 <sup>ns</sup>	-0,40 <sup>ns</sup>
$Pases\ ácidas$			1	0,14 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	-0,70 ***
$Pases\ alc.$				1	0,44 *	-0,02 <sup>ns</sup>
$P\ org.$					1	-0,24 <sup>ns</sup>
pH						1

\*,  $P \leq 0,05$ ; \*\*,  $P \leq 0,01$ ; \*\*\*,  $P \leq 0,001$ ; \*\*\*\*,  $P \leq 0,0001$ .

## VII. DISCUSSÃO

---

Correlações positivas e significativas ( $r > 0,80$ ) entre fósforo extraível e fósforo microbiano nos quatro períodos amostrados nos solos de Campos Novos (tabelas 3, 4, 5 e 6) indicam que as fontes minerais de fósforo de ciclagem rápida - quantificadas pelo extrator Mehlich-1 e que correspondem a uma estimativa da disponibilidade de fósforo à biota do solo - podem ter regulado o acúmulo ou imobilização de fósforo na biomassa microbiana. A presença de correlações significativas entre fósforo microbiano e fósforo orgânico somente na primeira amostragem (tabela 3), havendo nos demais períodos correlações não significativas (tabelas 4, 5 e 6), e as correlações significativas entre os teores de fósforo extraível e de fósforo microbiano, sugerem que a disponibilidade de íons ortofosfato ligados à fração mineral constituiu uma fonte primária do nutriente para a absorção microbiana. Assim, o acúmulo de fósforo na biomassa microbiana foi mais dependente da fração de fósforo inorgânico lábil que dos processos de mineralização das fontes orgânicas do nutriente.

Se, de um lado, a microbiota acumulava fósforo de acordo com a disponibilidade de fontes inorgânicas de rápida ciclagem, por outro lado, as correlações entre fósforo extraível e fósforo orgânico, constatadas nos estágios de floração das culturas hibernais (tabelas 3 e 6) e estivais (tabela 4), mostram que a disponibilidade de fósforo para a microbiota e as plantas em solos desenvolvidos depende principalmente do acúmulo de fósforo nas frações orgânicas ou biológicas (CROSS & SCHLESINGER, 1995; TIESSEN et al., 1984).

A formação de dois grupos de concentração de fósforo extraível entre as amostras dos solos da Estação Experimental e das propriedades rurais em Campos Novos (figura 1) não permitiu que se analisassem os sistemas sucessionais amostrados e se comparassem os possíveis efeitos das espécies vegetais manejadas a partir dos valores absolutos das concentrações de fósforo extraível e de fósforo microbiano. O cálculo da relação entre fósforo extraível e fósforo microbiano (figura 3) não forneceu resultados consistentes, que permitissem constatar efeitos claros das culturas de cobertura hibernais e estivais. Essa relação aumentou em todas as áreas na floração das culturas estivais em relação ao período anterior, na floração das culturas de cobertura. Isso indica um acúmulo menor de fósforo na biomassa microbiana ou aumento na taxa de mineralização em relação às fontes minerais no período estival. Os valores de tal relação diminuíram em todas as áreas de amostragem

durante o crescimento inicial das culturas de cobertura, exceto para o tratamento com nabo forrageiro na Estação Experimental, possivelmente em função de aumento na imobilização de fósforo na biomassa microbiana. O declínio mais acentuado ocorreu na área manejada com aveia preta na Estação Experimental, fato que esteve relacionado com a diminuição considerável nos teores de fósforo extraível (figura 1), em comparação aos períodos anteriores.

O solo da sucessão nabo forrageiro/pousio/aveia preta apresentou os índices mais estáveis da relação entre fósforo extraível e fósforo microbiano durante as estações amostradas, o que sugere, em associação às correlações significativas e positivas entre esses parâmetros, que a permanência do solo em pousio por um determinado período e a ausência de cultivo de espécies vegetais fez com que a incorporação de fósforo na biomassa microbiana dependesse somente da disponibilidade de fontes de ciclagem mais rápida de fósforo inorgânico.

Com a elevação do nível de fósforo extraível nos solos amostrados, houve a diminuição no grau de incorporação de fósforo na biomassa microbiana. A imobilização de fósforo pela microbiota acompanha linearmente o aumento no teor de fósforo disponível, até atingir um nível crítico, dependente das características físico-químicas do solo, no qual a quantidade de fósforo da biomassa microbiana se estabiliza (LUKITO et al., 1998). A redução na eficiência de imobilização de fósforo pelos microorganismos possivelmente esteve associada com os teores de outros nutrientes na solução do solo; embora houvesse disponibilidade de fósforo, a concentração de um ou mais nutrientes atingiu níveis limitantes que impediram a assimilação e formação de células microbianas e assim a manutenção da taxa de assimilação de fósforo.

Os maiores índices obtidos pela relação entre fósforo extraível e fósforo microbiano (figura 3) foram constatados na área manejada com aveia preta na Estação Experimental, que apresentava, junto com as amostras do solo cultivado com nabo forrageiro, os maiores valores de fósforo extraível (figura 1) dentre os solos amostrados. Entretanto, nesse último tratamento, o produto relacional entre fósforo extraível e fósforo microbiano foi menor que o resultado obtido para o solo manejado com aveia preta, chegando a valores semelhantes aos solos amostrados em propriedades rurais nas duas primeiras amostragens.

O solo da Estação Experimental manejado com nabo forrageiro, além de valores menores da relação entre fósforo extraível e fósforo microbiano em comparação à aveia preta na floração dessas espécies e na estação seguinte, apresentou, nesses mesmos períodos, maior

concentração de fósforo microbiano como fração do fósforo orgânico (figura 7). O estímulo ao crescimento da população de microorganismos pela atividade rizosférica do nabo forrageiro possivelmente está ligado à quantidade e à composição de metabólitos liberados dentro do solo pelas raízes dessas plantas. Utilizando cromatografia iônica, Merbach et al. (1999) constataram que *Raphanus oleiformis* apresentava maior quantidade de exsudatos na solução no solo, principalmente na forma de ácidos orgânicos (57%) e aminoácidos (24%), em comparação ao trigo, cujos exsudatos eram, em sua maioria, carboidratos.

O acúmulo de fósforo na biomassa microbiana, em relação às frações minerais e orgânicas, constitui uma estratégia para a manutenção desse nutriente em um ciclo biológico autocatalítico. Desse modo, a assimilação do fósforo pelos microorganismos e a renovação constante da biomassa microbiana atuam como processos intermediadores da disponibilidade de fósforo para as culturas de cobertura. As variações das concentrações relativas de fósforo microbiano no solo cultivado com milho em sucessão a nabo forrageiro podem estar relacionadas à qualidade, ou à composição química, dos restos culturais incorporados. Estes, por sua vez, controlaram o nível de decomposição e a mineralização do fósforo e, em consequência, a dinâmica de transformações da fração orgânica do fósforo. Em condições de clima temperado, Soon & Arshad (2002) constataram que a decomposição dos restos culturais foi mais rápida, após 11 meses, em espécies como canola (*Brassica napus*) e ervilha (*Pisum sativum*), em comparação ao trigo, atribuindo a velocidade maior de decomposição à relação C:N do material vegetal incorporado. Embora o solo manejado com nabo forrageiro, em comparação ao tratamento aveia preta, tenha incorporado mais biomassa microbiana em função da quantidade de fósforo extraível e fósforo orgânico na floração das espécies e na estação subsequente, o mesmo padrão não foi constatado nos períodos seguintes. Isso deveria ser acompanhado por vários anos, para se ter um quadro mais claro dos efeitos das culturas.

Um efeito da sucessão de culturas evidenciou-se sobre a atividade de fosfatases ácidas. Houve a diminuição na atividade dessa enzima nas sucessões ervilhaca/feijão e aveia/milho, e aumento nas sucessões aveia/feijão e nabo forrageiro/milho (figura 4). A atividade de fosfatases alcalinas diminuiu nas sucessões ervilhaca/feijão e nabo forrageiro/pousio (figura 5). Os resultados podem estar relacionados à diversidade de espécies em rotação, que promoveram um estímulo à atividade enzimática, provavelmente ligado à atividade microbiana. Em solos cultivados por 18 anos com as mesmas sucessões de culturas, constatou-se atividade de fosfatases alcalinas até duas vezes maior nos solos da rotação milho/aveia/alfafa em comparação ao manejo de milho em sucessão e rotação milho/soja

(DICK, 1984). Em sistemas com rotação por três anos de diferentes sucessões de culturas, as atividades de fosfatases ácidas e alcalinas foram maiores em solos manejados com leguminosas (*Cyamopsis tetragonoloba*) em sucessão a gramínea (*Pennisetum americanum*) - ou só a leguminosa em sucessão - do que o plantio só da gramínea (RAO et al., 1995).

As correlações significativas entre a atividade de fosfatases alcalinas e os teores de fósforo extraível e de fósforo microbiano, na floração das culturas estivais (tabela 4) e na segunda estação de crescimento das espécies hibernais (tabelas 5 e 6), sugerem que o crescimento da população microbiana, em função da disponibilidade de fósforo, foi acompanhado de aumento na atividade metabólica e, em consequência, na produção de fosfatases alcalinas. Semelhante aos resultados deste trabalho, Frankenberger Jr. & Dick (1983) constataram correlações positivas e significativas para carbono orgânico e atividade de fosfatases alcalinas ( $r = 0,73^*$ ) e carbono da biomassa microbiana e fosfatases alcalinas ( $r = 0,80^*$ ).

A associação das relações acima com as correlações significativas obtidas entre fósforo orgânico e atividade de fosfatases alcalinas (tabelas 3, 4 e 6) apontam para uma interdependência entre atividade enzimática e biomassa microbiana, fontes de fósforo orgânico e teores de fósforo extraível. Assim, a hidrólise das fontes orgânicas de fósforo pela atividade microbiana tem um papel intermediador e catalisador na passagem desse nutriente para a biomassa microbiana e para as fontes de rápida ciclagem. Embora possa constituir uma fração orgânica substancialmente menor que as fontes minerais solúveis e lábeis, a biomassa microbiana, pela sua dinâmica de transformações, representa uma fonte de fósforo de passagem rápida a formas disponíveis às espécies vegetais (RICHARDSON, 1994).

As correlações negativas entre pH e atividade de fosfatases ácidas em duas amostragens (tabelas 4 e 6) e positivas entre pH e atividade de fosfatases alcalinas em todas as amostragens confirmam que, de acordo com condições de manejo de solo e de espécies vegetais, essas enzimas adaptativas sofrem influência determinante da acidez ou alcalinidade do solo (ACOSTA-MARTINEZ & TABATABAI, 2000). Condições de baixa disponibilidade de fósforo inorgânico podem induzir aumento na síntese de fosfatases ácidas intra- e extracelulares pelo metabolismo vegetal, seguindo-se um aumento na liberação de fosfatases extracelulares nos exsudatos radiculares. Isso seria uma forma de mobilizar fósforo a partir de fontes orgânicas, explicando-se, dessa maneira, as correlações negativas entre fosfatases ácidas e fósforo extraível observadas na floração das culturas estivais (tabela 4) e na segunda estação de floração das espécies hibernais (tabela 6).

As correlações positivas entre pH e fósforo extraível, tanto na floração das culturas estivais (tabela 4) e quanto na segunda estação de crescimento das espécies hibernais (tabelas 5 e 6), mostram que a redução da acidez do solo conduziu à diminuição nos processos químicos de adsorção de íons ortofosfato em sítios de troca de cargas positivas das superfícies do solo (NOVAIS & SMYTH, 1999). A ausência de correlações na primeira amostragem (tabela 3) demonstra que a concentração de fósforo extraível não depende somente dos níveis de pH, mas está vinculada à forma de manejo do solo e à combinação da aplicação de fertilizantes fosfatados e de corretivos da acidez do solo.

A ausência de correlações entre fósforo microbiano e fosfatases ácidas, contrapondo-se às correlações positivas para fosfatases alcalinas, indicam que elas são produzidas preponderantemente pelos vegetais. Em solo de pastagem manejado por 100 anos com regimes de fertilização, Colvan et al. (2001) constataram níveis semelhantes de atividade de fosfatases ácidas para quantidades variáveis de biomassa microbiana, sugerindo que essas enzimas são primariamente de origem radicular.

A variabilidade nos valores dos parâmetros químicos avaliados, especialmente fósforo extraível, dificultou a obtenção de resultados consistentemente significativos. Entretanto, tal variabilidade ou gradiente de concentração de fósforo permitiu o estabelecimento de correlações entre as variáveis analisadas, que mostraram os graus de dependência entre os parâmetros químicos e biológicos. Nos sistemas agrícolas de Campos Novos não se verificam efeitos claros da sucessão de culturas e das espécies de cobertura hibernais sobre os parâmetros biológicos ligados à ciclagem do fósforo. A realização de uma amostragem no início do crescimento da cultura estival poderia fornecer informações importantes para relacionar com os períodos anterior e posterior de floração das culturas hibernais e estivais, respectivamente, e assim trazer melhor esclarecimento dos processos de regulação da atividade enzimática dentro dos sistemas sucessionais. A ausência de resultados consistentes nas áreas amostradas em propriedades rurais pode indicar que as variações entre os sistemas agrícolas avaliados foram mais dependentes de variações temporais e espaciais das amostragens e da falta de controle das variáveis, decorrente do de manejados realizados de forma diferenciada, que das implicações das espécies vegetais em sucessão.

Sistemas sucessionais de culturas avaliados no município de Atalanta apresentaram resultados mais consistentes que os obtidos em Campos Novos. Houve alterações no perfil enzimático e na dinâmica do fósforo na biomassa microbiana, que podem ser atribuídas a efeitos das espécies de cobertura hibernais manejadas. Os níveis mais elevados de fósforo

extraível nas amostras do solo manejado com aveia preta no período hibernar (figura 9) podem explicar as maiores quantidades de fósforo imobilizado na biomassa microbiana (figura 10) nesse tratamento. Isso é confirmado pela correlação significativa entre essas variáveis na floração das culturas de cobertura (tabela 7). Apesar do solo manejado com tremoço branco apresentar a metade do teor médio de fósforo extraível da área cultivada com aveia preta, foram constatadas concentrações semelhantes de fósforo imobilizado na biomassa microbiana. Os índices obtidos entre fósforo extraível e fósforo microbiano (figura 11) mostraram menores valores para os solos manejados com as espécies leguminosas - ervilhaca e tremoço branco. A melhoria nas condições da rizosfera do solo, como aporte de exsudatos radiculares ricos em nitrogênio, e o estímulo da atividade microbiana por meio de sinais simbióticos, entre os quais se incluem as fosfatases ácidas extracelulares, possivelmente estiveram associados ao desenvolvimento da comunidade de microorganismos e ao acúmulo de fósforo na biomassa microbiana em relação às fontes lábeis. A exsudação de grandes quantidades de compostos orgânicos pelas raízes tem um significado ecológico importante, primordial para a atividade microbiana, por eles constituírem uma grande fonte de energia para o crescimento de microorganismos no solo (HINSINGER, 2001). Solos cultivados com leguminosa (siratiro) ou uma sucessão usando consórcio de leguminosas e gramíneas (aveia+vica/milho+caupi ou guandu+milho) apresentaram maior quantidade de bactérias em relação a sistemas com manejo de gramíneas (pangola e aveia+milho), afetando pouco as populações de actinomicetos e fungos (CATTELAN & VIDOR, 1990b). Resultado semelhante foi constatado para a biomassa microbiana (CATTELAN & VIDOR, 1990a). Os autores sugerem que a maior população microbiana pode ser devido à maior biomassa vegetal e à menor relação C:N dos restos culturais na superfície do solo. A simbiose com rizóbios e a fixação de  $N_2$  permitiram, além disso, a produção de exsudatos radiculares com maior proporção desse nutriente, o que afetou favoravelmente as populações microbianas.

Comparando o solo rizosférico de trigo e *Lupinus angustifolius*, Haynes & Beare (1997) constataram que essa última espécie apresentou em torno de quatro vezes mais comprimento de hifas de fungos e quantidade superior de células bacterianas vivas, com valores semelhantes de carbono na biomassa microbiana. Esses autores atribuem os resultados aos efeitos de uma comunidade microbiana não micorrízica associada e sob influência das raízes de *Lupinus angustifolius*. Eles também concluíram que em gramíneas a biomassa microbiana esteve mais ligada à quantidade ou volume das raízes, enquanto nas leguminosas o estímulo para o crescimento da população microbiana depende mais da quantidade e

qualidade de exsudatos liberados.

Na floração da cultura do milho, constatou-se tendência de aproximação da relação entre fósforo extraível e fósforo microbiano do solo manejado anteriormente com nabo forrageiro em relação aos solos cultivados com tremoço branco e ervilhaca (figura 11). Os menores valores desse índice em nabo forrageiro e tremoço branco estiveram associados aos níveis superiores de atividade de fosfatases ácidas (figura 12). Além de explicar a correlação entre atividade de fosfatases ácidas e fósforo microbiano na segunda amostragem (tabela 8), esse resultado aponta para um aumento na atividade enzimática da microbiota, que também passou a assimilar maior quantidade de fósforo a partir das fontes orgânicas.

O maior acúmulo de fósforo na biomassa microbiana, em relação às fontes lábeis, no solo manejado com tremoço branco (figura 11) vincula-se à maior atividade de fosfatases alcalinas constatada na amostragem realizada na floração das espécies hibernais (figura 13). O segundo maior nível de atividade dessa enzima ocorreu na área cultivada com nabo forrageiro, mas, nesse caso, constatou-se menor valor relativo de fósforo acumulado na biomassa microbiana que o de solo manejado com tremoço branco e semelhante ao tratamento com aveia preta. Os níveis maiores de fósforo extraível no solo com nabo forrageiro afetaram o grau de incorporação de fósforo na biomassa microbiana, aumentando a relação entre fósforo extraível e fósforo microbiano. Por outro lado, fosfatases e exsudatos radiculares produzidos pela cultura do nabo forrageiro podem ter regulado a composição e a diversidade funcional da comunidade microbiana associada ao ambiente rizosférico, que pode ter sido diferente daquela associada à rizosfera de tremoço branco.

Assim, é possível que as diferenças na atividade de fosfatases e na biomassa microbiana sejam decorrentes de efeitos das espécies vegetais sobre a composição das espécies de fungos e bactérias envolvidos na dinâmica do fósforo na rizosfera. A relação entre uma medida quantitativa da microbiota, estimada pelos teores de fósforo microbiano, e uma medida qualitativa da atividade rizosférica, a atividade enzimática, permitiu atribuir mudanças na diversidade funcional da comunidade microbiana do solo. Frankenberger Jr. & Dick (1983) não encontraram correlação significativa entre o número de colônias formadas em meio de cultura e atividade de fosfatases ácidas e alcalinas, o que foi atribuído, a efeitos seletivos do meio de cultura, e ao fato de a atividade de fosfatases ser principalmente extracelular, não estando associada diretamente à população microbiana. De qualquer forma, o trabalho citado não avaliou a diversidade taxonômica ou funcional da microbiota do solo.

Em período curto de tempo, mudanças na diversidade funcional da microbiota podem

ser mais sensíveis ao manejo de plantas que alterações substanciais na concentração de nutrientes na biomassa microbiana ou de componentes lábeis da matéria orgânica (BENDING et al., 2000). Isso poderia explicar a ausência de relações entre os teores de fósforo microbiano e atividade de fosfatases alcalinas nas três primeiras amostragens (tabelas 7, 8 e 9). Haveria necessidade de se agregar à análise de atividade respiratória e estimar, além do fósforo, a quantidade de outros nutrientes imobilizados na biomassa microbiana, com o objetivo de levantar informações mais precisas sobre possíveis alterações do manejo de espécies vegetais sobre a estrutura da comunidade de microorganismos e sobre a atividade microbiana do solo.

As mudanças na diversidade e na estrutura das comunidades microbianas podem implicar alterações no crescimento vegetal e na sucessão de plantas. Através de técnicas de biologia molecular, Kowalchuk et al. (2002) constataram que houve efeito indutor da espécie vegetal na estrutura da comunidade bacteriana na rizosfera das plantas testadas. Esses autores sugerem que a rizosfera seleciona populações microbianas específicas, e que este efeito é reproduzível para a espécie vegetal seguinte. Embora características gerais do solo possam ser mais importantes na determinação das populações bacterianas, a atividade vegetal - via rizosfera - pode ter um efeito preponderante sobre a estrutura da comunidade microbiana. As espécies vegetais, em sucessão ou rotação, podem ter efeitos indiretos e por longo período sobre as propriedades gerais do solo. Um exemplo seria o aporte de nutrientes pelas plantas e a deposição de restos culturais e o grau de decomposição e mineralização dos nutrientes. De acordo com os autores citados, o nível das interações na rizosfera é crítico na determinação do grau de ligação entre os vegetais e comunidades microbianas.

Os trabalhos citados indicam que as populações vegetais podem ter efeitos maiores sobre a estrutura da comunidade de microorganismos e sua capacidade de mineralizar nutrientes que sobre valores quantitativos da biomassa microbiana. De fato, no trabalho de Waldrop et al. (2000), os valores da atividade específica das fosfatases - atividade de enzima por unidade de carbono da biomassa microbiana - tiveram correlação mais forte com a composição da comunidade microbiana que com a atividade enzimática total. Os autores sugerem que mudanças no sistema de manejo ou nas populações vegetais promovem alterações na composição e nos padrões fisiológicos da comunidade microbiana, os quais são acompanhadas por mudanças na atividade enzimática. Assim, a diversidade e a produção de plantas podem ter um efeito maior sobre a atividade enzimática do solo do que a redução no revolvimento do solo onde a diversidade vegetal continua baixa (DICK, 1992). A associação

entre a forma de preparo do solo e o histórico do manejo de plantas em sistemas agrícolas faz com que estes efeitos não possam ser separados (CARPENTER-BOGGS et al., 2003).

A ausência de efeito do pH sobre a atividade de fosfatases alcalinas nas estações de crescimento e floração das culturas hibernais (tabelas 7, 9 e 10) indica um efeito preponderante das espécies vegetais sobre o nível de atividade enzimática do solo. Os efeitos das culturas de cobertura sobre a atividade de fosfatases alcalinas não tiveram persistência no período seguinte à sua estação de crescimento - floração da cultura estival – (figura 13) como constatado para fosfatases ácidas (figura 12), embora tenham sido menores nos solos manejados com ervilhaca em relação aos demais tratamentos. As correlações significativas e positivas da atividade de fosfatases alcalinas com os teores de fósforo orgânico e os valores de pH (tabela 8) sugerem que as condições de acidez do solo e a disponibilidade de substrato reativo à comunidade microbiana da rizosfera do milho tiveram efeito preponderante sobre a estabilidade e sobre a regulação dos níveis de atividade dessa enzima. Além disso, mudanças na conformação de estrutura enzimática e no ambiente em torno de enzimas extracelulares - devido à natureza física e química do complexo formado - e a diminuição do contato ou acessibilidade a sítios ativos do substrato para a reação enzimática podem afetar a atividade das fosfatases alcalinas (RAO et al., 2000). Assim, a persistência dos níveis de tais enzimas, na estação subsequente à floração das culturas de cobertura, provavelmente esteve menos associada à manutenção dos efeitos da espécie hiberna sobre os níveis da atividade enzimática, e mais ligada à disponibilidade de fósforo orgânico, à proteção física das enzimas na matéria orgânica e às condições químicas do solo. Apesar dos níveis menores de atividade e da regulação de seu potencial em função do pH, as fosfatases alcalinas têm um papel importante na ciclagem de fósforo e na ecologia microbiana pois sua eficiência catalítica é maior que a das fosfatases de origem vegetal (KLOSE & TABATABAI, 2002; TARAFDAR et al., 2001).

É possível que as enzimas fosfatases ligadas a constituintes celulares não tenham efeito no solo após a senescência das plantas e após o contato de seus restos com o solo. Matumoto-Pintro & Quiquampoix (1997), citado por George et al. (2002), concluíram que o contato de fosfatases extraídas de sementes com o meio extracelular leva à inativação das enzimas, enquanto fosfatases produzidas especificamente e liberadas no solo por vários microorganismos mantiveram uma atividade significativa quando adsorvidas às superfícies do solo.

A manutenção dos níveis superiores de atividade de fosfatases ácidas nos solos

manejados com tremço branco e com nabo forrageiro pode estar associada à imobilização das enzimas extracelulares, oriundas da atividade metabólica vegetal, nas frações de argila e nos complexos húmicos. A hipótese proposta por Burns (1982) é que os microorganismos não têm meios diretos de detectar a presença de substrato e assim induzir a síntese e a secreção de enzimas extracelulares, as quais regularão a hidrólise do substrato e a mobilização dos nutrientes em formas solúveis. Por outro lado, as enzimas persistentes, associadas ao complexo formado entre enzima e substrato orgânico, não estão sujeitas aos mecanismos de regulação característicos das células microbianas e às barreiras físicas, como parede celular, que limitam o transporte para o sítio ativo do substrato. Assim, as enzimas extracelulares podem responder rapidamente ao substrato. O produto da hidrólise enzimática - no caso da atividade das fosfatases, os íons ortofosfato - são absorvidos pela biota do solo e podem induzir, dependendo de fatores como a concentração de nutrientes solúveis, os microorganismos a secretar seu próprio conjunto de enzimas. As enzimas de origem microbiana podem, então, assumir o papel dominante na mineralização do substrato orgânico. Dessa forma, o perfil enzimático e o nível de enzimas estabilizadas e protegidas fisicamente na matéria orgânica do solo podem ser determinantes na indução e no estabelecimento das comunidades microbianas na rizosfera, em um ambiente de rápida ciclagem de nutrientes.

A diferença entre os tratamentos em relação à atividade de fosfatases ácidas diminuiu no início da segunda estação de crescimento das culturas de cobertura (figura 12), ocorrendo a aproximação entre os sistemas manejados com tremço branco, ervilhaca e nabo forrageiro. A ausência de uma cultura residente e de um ambiente rizosférico possivelmente fez com que esse índice tivesse aumentado nos solos amostrados, pela diminuição na incorporação de fósforo na biomassa microbiana e assim um aumento das fontes minerais em relação ao fósforo microbiano, embora os valores numericamente permanecessem inferiores nos solos manejados com ervilhaca e tremço branco.

Na segunda estação de floração amostrada, os índices obtidos entre fósforo extraível e fósforo microbiano (figura 11) voltaram a uma tendência dos valores da primeira floração, com menores valores da relação no solo manejado com tremço branco. Ocorreram correlações significativas, nesse período, entre fósforo extraível e fósforo microbiano, e entre fósforo microbiano e atividade de fosfatases alcalinas (tabela 10). A imobilização de fósforo na biomassa microbiana parece ter sido regulada pela disponibilidade das frações minerais de ciclagem rápida, que respondeu com maior atividade de fosfatases alcalinas. Correlação negativa e significativa entre pH e fosfatases ácidas foi constatada na segunda estação de

floração das culturas de cobertura. Apesar da significância estatística, não se pode atribuir esse resultado à maior atividade de fosfatases ácidas em solos mais ácidos, pois os menores valores de pH foram constatados nos solos manejados com tremoço branco e com nabo forrageiro, justamente os tratamentos que apresentaram os maiores valores de atividade de fosfatase ácida. A atividade de fosfatases ácidas diminuiu dentro das amostras de cada tratamento em função do pH. A correlação significativa também pode ser questionada pelo fato de que a variação média foi de uma unidade de pH entre as amostras, que pode ser uma faixa relativamente pequena para explicar os efeitos desse parâmetro químico.

A partir dos resultados acima, pode-se concluir que os solos com espécies de cobertura não micorrízicas apresentaram maior atividade de fosfatases que no solo com aveia preta na estação de floração, e que seus efeitos persistiram no período seguinte, independentemente da quantidade de fósforo imobilizado na biomassa microbiana. No início da estação de crescimento da segunda época de amostragem, os valores se aproximaram, mas as diferenças persistiram, voltando a ser maiores na segunda floração amostrada, o que confirma os resultados da primeira amostragem.

Referências sobre a produção de fosfatases por *Lupinus albus* não foram encontradas para condições a campo. Informações relativas à exsudação de fosfatases ácidas por *Lupinus albus*, como estratégia de mobilização de fósforo, estão bem descritas para condições controladas de deficiência no nutriente, induzida em meios hidropônicos (NEUMANN et al., 2000; OZAWA et al., 1995; WATT & EVANS, 1999). Em ação concomitante com o aumento na atividade enzimática, trabalhos mostram a liberação de ânions de ácidos orgânicos, como malato e citrato, e de prótons ( $H^+$ ); tais exsudatos promovem a quelação de minerais de ferro e alumínio ligados ao fósforo (SAS et al., 2001), mobilizando esse nutriente tanto de frações de ciclagem rápida como frações residuais mais estáveis (KAMH et al., 1999). As modificações químicas em torno do ambiente rizosférico por *Lupinus albus* podem alterar a fertilidade em fósforo e a disponibilidade do nutriente para a biota do solo, inclusive espécies vegetais cultivadas em associação ou em sucessão a esta. Experimento em casa de vegetação, com solo ácido de baixa disponibilidade de fósforo, mostrou que o crescimento de trigo aumentou de forma significativa quando cultivado em conjunto com tremoço branco, e isso foi atribuído a aumento no aporte de fósforo (KAMH et al., 1999).

Tais trabalhos, realizados em condições estéreis de meios de cultura, relacionam as mudanças na atividade enzimática e nas modificações de ordem química a estratégias próprias da espécie vegetal, em função de características morfológicas, como o sistema radicular

pouco ramificado, que forma raízes densamente agrupadas, com pêlos radiculares que aumentam em quantidade de acordo com a diminuição na disponibilidade de fósforo. Entretanto, não se faz menção ao caráter não micorrízico da espécie. Trabalhos em casa de vegetação têm demonstrado que outras espécies não micorrízicas, como canola (*Brassica napus*), podem promover modificações no ambiente rizosférico, envolvendo principalmente a diminuição no pH, que tornam mais eficiente a obtenção de fósforo e o aproveitamento de frações mais estáveis do nutriente em relação a espécies como trigo e milho (BERTRAND et al, 1999; McKENZIE et al., 1995). Um solo fertilizado com fosfato de rocha, que teve incorporação de trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*), outra espécie não micorrízica, apresentou níveis de fósforo extraível maiores do que parcelas cultivadas com crotalária e mucuna como espécies de cobertura; a solubilização do fosfato de rocha foi atribuída a uma tendência na diminuição do pH do solo (MAGALHÃES et al., 1991). Trabalhos recentes, como o de Dodor & Tabatabai (2003), buscam relacionar o efeito combinado do uso de fertilizantes com a sucessão, ou rotação, de espécies vegetais sobre a atividade de enzimas e sobre a biomassa microbiana. Existem, porém, ainda poucas informações sobre o caráter micorrízico ou não micorrízico das espécies vegetais usadas nos sistemas de manejo e sobre seus efeitos na ciclagem do fósforo.

Em trabalho conduzido em Neossolo Quartzarênico Órtico (KUNZE, 2000), constatou-se que o uso de plantas de cobertura não micorrízicas - gorga (*Spergula arvensis*) e nabo forrageiro - promoveu aumento nas populações de fungos e bactérias da rizosfera e maior atividade de fosfatase alcalina, principalmente no período de maior atividade metabólica das plantas. Esses efeitos persistiram no solo durante a estação de cultivo subsequente (EPPING et al., 2001), sugerindo que o caráter micorrízico ou não micorrízico das plantas de cobertura pode determinar as estratégias de obtenção do fósforo pelo vegetal, através da regulação das populações microbianas e do nível de sua atividade. Do mesmo modo, presume-se que, nos sistemas agrícolas analisados neste trabalho, as modificações ou estímulos promovidos pelas plantas de cobertura não ficaram restritos ao ciclo cultural destas, influenciando em etapas posteriores os processos de transformação do fósforo e o fluxo das formas disponíveis deste nutriente no sistema solo e, em consequência, afetando o desenvolvimento e a produção das culturas de exploração econômica.

A maior atividade mineralizadora de fosfatos orgânicos nas áreas com espécies não micorrízicas sugere a existência de uma estratégia para o aumento na velocidade de mobilização do fósforo no solo, em compensação à não formação de micorrizas, e à

conseqüente ausência dos benefícios na nutrição fosfatada advindos dessa associação. A produção e liberação de fosfatases ácidas pelas raízes, além de aumentar a hidrólise de fosfatos ligados à fração orgânica, poderiam estar associadas à secreção de metabólitos vegetais, capazes de estimular populações microbianas da rizosfera. Estas, por sua vez, mineralizariam o fósforo de uma forma mais eficiente que as plantas, através da produção de fosfatases alcalinas, preponderantemente.

Nos sistemas agrícolas em Atalanta, os efeitos das plantas de cobertura manejadas sobre a dinâmica de atividade enzimática e da biomassa microbiana podem estar relacionados a modificações no ambiente rizosférico e nos processos de mineralização de fósforo durante o crescimento vegetal, especialmente nos períodos de maior atividade metabólica. O perfil enzimático e a comunidade rizosférica associada às plantas foram diferentes entre as espécies hibernais. Nas áreas com espécies não micorrízicas, as fosfatases, além de atuarem como sinais simbióticos aos microorganismos, podem ter aumentado a mobilização de fósforo ligado à fração orgânica, o qual ficou diretamente disponível ao metabolismo vegetal, ou foi disponibilizado às plantas após incorporação do nutriente à biomassa microbiana. A ciclagem do fósforo biológico pela atividade de fosfatases de origem vegetal ou microbiana permitiu o suprimento desse nutriente ao metabolismo vegetal, compensando a ausência dos benefícios advindos das associações micorrízicas presentes nas culturas formadoras dessa simbiose. As alterações na ciclagem de fósforo biológico promovido pelas diferenças no perfil enzimático e na estrutura das populações microbianas das espécies hibernais foram perceptíveis nas estações subseqüentes, em período além dos estágios de crescimento das espécies indutoras. A persistência da atividade enzimática, possivelmente pela estabilização das fosfatases nas superfícies minerais e orgânicas, deve ter permitido o estabelecimento de novas populações na rizosfera da cultura estival, ou a manutenção das populações microbianas associadas às espécies hibernais. Isso teria criado uma rede ou sistema de realimentação envolvendo a atividade enzimática de origem vegetal e a biomassa microbiana. Desse modo, a atividade vegetal e microbiana das espécies de cobertura hibernais não micorrízicas influenciou a dinâmica de frações orgânicas de fósforo e o perfil de disponibilidade de fósforo ao metabolismo das culturas de verão que as sucederam.

## **VIII. CONCLUSÃO**

---

Os resultados obtidos permitem concluir que as culturas de cobertura têm, em solos agrícolas, efeito regulador sobre a atividade enzimática ligada à mineralização de fosfatos orgânicos no solo, que tal efeito depende do caráter micorrízico ou não micorrízico das espécies utilizadas, e que essa influência persiste durante os cultivos subsequentes.

## **IX. PERSPECTIVAS FUTURAS**

---

As plantas possuem mecanismos diferenciados de adaptações de ordem morfológica e bioquímica para adquirir íons ortofosfato. Além de modificações no crescimento e na arquitetura radicular e de associações simbióticas, elas produzem metabólitos que influenciam diretamente tanto a estrutura da comunidade microbiana da rizosfera quanto a ciclagem biológica do fósforo no solo. A distinção entre o papel dos processos microbianos e aqueles relacionados com as estratégias vegetais sobre a mineralização de fósforo necessita de maiores estudos, no sentido de compararem-se medidas quantitativas, como concentração de nutrientes na biomassa microbiana e na biomassa vegetal e produtividade das culturas de cunho econômico, e medidas qualitativas, como atividade enzimática, estimativa de populações de grupos funcionais, como solubilizadores de fosfato, e nível de infecção micorrízica.

O estudo de parâmetros ligados à atividade biológica do solo, de características físicas e químicas em diferentes estágios de crescimento - com amostragens mais freqüentes que aquelas realizadas neste trabalho - e de sucessões de espécies vegetais manejadas na agricultura, permitirá compreender o funcionamento de uma rede funcional que persiste nos períodos subseqüentes após o de culturas de cobertura, assim como conhecer as relações de tal rede com propriedades do solo. Trabalhos futuros abordando os processos biológicos de ciclagem do fósforo no solo em sistemas agrícolas com o manejo de plantas de cobertura hibernais permitirão caracterizar o papel da microbiota e desses vegetais sobre a disponibilidade do nutriente, no sentido de diminuir a necessidade de insumos externos e aumentar a taxa de ciclagem das formas orgânicas e minerais mais lentas.

## **X. REFERÊNCIAS**

---

ACOSTA-MARTINEZ, V.; TABATABAI, M. A. Enzyme activities in a limed agricultural soil. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 31, n. 1, p. 85-91, 2000.

ADDISCOTT, T. M.; THOMAS, D. Tillage, mineralization and leaching: phosphate. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 3-4, p. 255-273, 2000.

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. Microbial biomass. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (eds.). **Methods in applied soil microbiological and biochemistry**. London: Academic Press, 1995, p. 375-411.

ALEF, K.; NANNIPIERI, P.; TRAZAR-CEPEDA, C. Phosphatase activity. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (eds.). **Methods in applied soil microbiological and biochemistry**. London: Academic Press, 1995, p. 335-344.

ALLEN, E. B.; ALLEN, M. F.; HELM, D. J.; TRAPPE, J. M.; MOLINA, R.; RINCON, E. Patterns and regulation of mycorrhizal plant and fungal diversity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 170, n. 1, p. 47-62, 1995.

ATKINSON, D.; WATSON, C. A. The beneficial rhizosphere: a dynamic entity. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 15, n. 2, p. 99-104, 2000.

BALOTA, E. L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; HUNGRIA, M. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 641-649, 1998.

BANDICK, A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 31, n. 11, p. 1471-1479, 1999.

BAREA, J-M.; AZCÓN, R.; AZCÓN-AGUILAR, C. Mycorrhizosphere interactions to improve plant fitness and soil quality. **Antonie van Leeuwenhoek**, Dordrecht, v. 81, n. 1-4, p. 343-351, 2002.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica . In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999, p. 9-23.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L.; ERNANI, P. R. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 238, n. 1, p. 133-140, 2002.

BECK, M. A.; SANCHEZ, P. A. Soil-phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a typic Paleudult. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1424-1431, 1994.

BENDING, G. D.; PUTLAND, C.; RAYNS, F. Changes in microbial community metabolism and labile organic matter fractions as early indicators of the impact of management on soil biological quality. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 31, n. 1, p. 78-84, 2000.

BERGSTROM, D. W.; MONREAL, C. M.; KING, D. J. Sensitivity of soil enzyme activities to conservation practices. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 5, p. 1286-1295, 1998.

BERTRAND, I.; HINSINGER, P.; JAILLARD, B.; ARVIEU, J. C. Dynamics of phosphorus in the rhizosphere of maize and rape grown on synthetic, phosphated calcite and goethite. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 211, n. 1, p. 111-119, 1999.

BOLAN, N. S. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 134, n. 2, p. 189-207, 1991.

BOLTON, H.; ELLIOTT, L. F.; PAPENDICK, R. I.; BEZDICEK, D. F. Soil microbial biomass and selected soil enzyme activities: effect of fertilization and cropping practices. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 17, n. 3, p. 297-302, 1985.

BOWMAN, R. A.; REEDER, J. D.; LOBER, R. W. Changes in soil properties in a central plains rangeland soil after 3, 20, and 60 years of cultivation. **Soil Science**, Baltimore, v. 150, n. 6, p. 851-857, 1990.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 14, n. 4, p. 319-329, 1982.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Phosphorus in the soil microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 16, n. 2, p. 169-175, 1984.

BURNS, R. G. Enzyme activity in soil: location and a possible role in microbial ecology. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 14, n. 5, p. 423-427, 1982.

BYÉ, P. Truffle cultivation, 1860-1960: the limits of domestication. **Food and Foodways**, Philadelphia, v. 9, n. 1, p. 1-20, 2000.

CAMPELLO, M. R.; NOVAIS, R. F.; FERNANDEZ, R. I. E.; FONTES, M. P. F.; BARROS, N. F. Avaliação da reversibilidade de fósforo não lábil para lábil em solos com diferentes características. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 2, p. 157-165, 1994.

CARPENTER-BOGGS, L.; STAHL, P. D.; LINDSTROM, M. J.; SCHUMACHER, T. E. Soil microbial properties under permanent grass, conventional tillage, and no-till management in South Dakota. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 71, n. 1, p. 15-23, 2003.

CATTELAN, A. J.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo, em função das variações ambientais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n. 2, p. 133-142, 1990a.

CATTELAN, A. J.; VIDOR, C. Sistemas de culturas e a população microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n. 2, p. 125-132, 1990b.

COLVAN, S. R.; SYERS, J. K.; O'DONNELL, A. G. Effect of long-term fertiliser use on acid and alkaline phosphomonoesterase and phosphodiesterase activities in managed grassland. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 34, n. 4, p. 258-263, 2001.

CROSS, A. F.; SCHLESINGER, W. H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, n. 3-4, p. 197-214, 1995.

CRUZ, A. F.; MARTINS, M. A. Transferência de nitrogênio entre plantas interconectadas por fungos micorrízicos arbusculares (FMAs). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 4, p. 559-565, 1997.

CURCI, M.; PIZZIGALLO, M. D. R.; CRECCHIO, C.; MININNI, R.; RUGGIERO, P. Effects of conventional tillage on biochemical properties of soils. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 25, n. 1, p. 1-6, 1997.

DAKORA, F. D.; PHILLIPS, D. A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 245, n. 1, p. 35-47, 2002.

DARRAH, P. R. The rhizosphere and plant nutrition: a quantitative approach. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 155-156, n. 1, p. 1-20, 1993.

DENG, S. P.; TABATABAI, M. A. Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils: III. Phosphatases and arylsulfatase. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 24, n. 2, p. 141-146, 1997.

DICK, R. P. A review - long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 40, n. 1-4, p. 25-36, 1992.

DICK, W. A. Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 3, p. 569-574, 1984.

DICK, W. A.; JUMA, N. G.; TABATABAI, M. A. Effects of soils on acid-phosphatase and inorganic pyrophosphatase of corn roots. **Soil Science**, Baltimore, v. 136, n. 1, p. 19-25, 1983.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Kinetic parameters of phosphatases in soils and organic waste materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 137, n. 1, p. 7-15, 1984.

DODOR, D. E.; TABATABAI, M. A. Effect of cropping systems on phosphatases in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 166, n. 1, p. 7-13, 2003.

DORAN, J. W. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 4, p. 765-771, 1980.

DOUDS JR, D. D.; MILLNER, P. D. Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 74, n. 1-3, p. 77-93, 1999.

EPPING, J.; KUNZE, A.; LOVATO, P. E.; PEREIRA, F. Atividade de fosfatase em solo cultivado com plantas de cobertura micorrízicas e não micorrízicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, **Resumos...** Londrina: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2001.

FERNANDES, L. A.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; LIMA, J. M. DE; GUEDES, G. A. A. Fósforo e atividade de fosfatases em dois solos sob diferentes condições de uso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 7, p. 1159-1170, 1998.

FRANKENBERGER JR., W. T.; DICK, W. A. Relationship between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 5, p. 945-951, 1983.

GAMA-RODRIGUES, E. F. Biomassa microbiana e a ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999, p. 227-240.

GEORGE, T. S.; GREGORY, P. J.; WOOD, M.; READ, D.; BURESH, R. J. Phosphatase activity and organic acids in the rhizosphere of potential agroforestry species and maize. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 10, p. 1487-1494, 2002.

GIANINAZZI-PEARSON, V. Mycorrhizal effectiveness in phosphate nutrition: how, when and where? [?], p. 150-154, 1984.

GREGORY, P. J.; HINSINGER, P. New approaches to studying chemical and physical changes in the rhizosphere: an overview. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 211, n. 1, p. 1-9, 1999.

GRYNDLER, M.; HRSELOVA, H.; VOSATKA, M.; VOTRUBA, J.; KLIR, J. Organic fertilization changes the response of mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi and their sporulation to mineral NPK supply. **Folia Microbiologica**, Prague, v. 46, n. 6, p. 540-542, 2001.

GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L. DE; SANTOS, G. DE A.; FERNANDES, M. S. Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 4, p. 292-299, 1996.

GUPTA, V. V. S. R.; GERMIDA, J. J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 20, n. 6, p. 777-786, 1988.

HAYNES, R. J.; BEARE, M. H. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 29, n. 11-12, p. 1647-1653, 1997.

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**, Madison, v. 46, n. 5, p. 970-976, 1982.

HENDRIX, J. W.; GUO, B. Z.; AN, Z. Q. Divergence of mycorrhizal fungal communities in crop production systems. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 170, n. 1, p. 131-140, 1995. Resumo.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 237, n. 2, p. 173-195, 2001.

HODGE, A. Microbial ecology of the arbuscular mycorrhiza. **FEMS Microbiology ecology**, Amsterdam, v. 32, n. 2, p. 91-96, 2000.

JAYACHANDRAN, K.; SCHWAB, A. P.; HETRICK, A. D. Mineralization of organic phosphorus by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 24, n. 9, p. 897-903, 1992.

JIMENEZ, M. D.; DE LA HORRA, A. M.; PRUZZO, L.; PALMA, R. M. Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 35, n. 4, p. 302-306, 2002.

JÖERGENSEN, R. G. Fumigation extraction method for biomass phosphorus. In: ALEF, K & NANNIPERI, P. (eds.). **Methods in applied soil microbiological and biochemistry**. London: Academic Press, 1995, p. 394-396.

JOHANSEN, A.; JENSEN, E. S. Transfer of N and P from intact or decomposing roots of pea to barley interconnected by an arbuscular mycorrhizal fungus. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 28, n. 1, p. 73-81, 1996.

JOHNSON, N. C.; COPELAND, P. J.; CROOKSTON, R. K.; PFLEGER, F. L. Mycorrhizae - possible explanation for yield decline with continuous corn and soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, n. 3, p. 387-390, 1992.

JONER, E. J.; VAN AARLE, I. M.; VOSATKA, M. Phosphatase activity of extra-radical arbuscular mycorrhizal hyphae: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 226, n. 2, p. 190-210, 2000.

JONER, E. J. The effect of long-term fertilization with organic or inorganic fertilizers on mycorrhiza-mediated phosphorus uptake in subterranean clover. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 32, n. 5, p. 435-440, 2000.

JONER, E. J.; MAGID, J.; GAHOONIA, T. S.; JAKOBSEN, I. P depletion and activity of phosphatases in the rhizosphere of mycorrhizal and non-mycorrhizal cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 27, n. 9, p. 1145-1151, 1995.

JORDAN, D.; KREMER, R. J.; BERGFELD, W. A.; KIM, K. Y.; CACNIO, V. N. Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 19, n. 4, p. 297-302, 1995.

JORDAN, N. R.; ZHANG, J.; HUERD, S. Arbuscular-mycorrhizal fungi: potential roles in weed management. **Weed Research**, Oxford, v. 40, n. 5, p. 397-410, 2000.

JUMA, N. G.; TABATABAI, M. A. Comparison of kinetic and thermodynamic parameters of phosphomonoesterases of soils and of corn and soybean roots. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 20, n. 4, p. 533-539, 1988.

KAMH, M.; HORST, W. J.; AMER, F.; MOSTAFA, H.; MAIER, P. Mobilization of soil and fertilizer phosphate by cover crops. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 211, n. 1, p. 19-27, 1999.

KANCHIKERIMATH, M.; SINGH, D. Soil organic matter and biological properties after 26 years of maize-wheat-cowpea cropping as affected by manure and fertilization in a Cambisol in semiarid region of India. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 155-162, 2001.

KLOSE, S.; TABATABAI, M. A. Response of phosphomonoesterases in soils to chloroform fumigation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Berlin, v. 165, n. 4, p. 429-434, 2002.

KOIDE, R. T.; KABIR, Z. Extraradical hyphae of the mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* can hydrolyse organic phosphate. **New Phytologist**, New York, v. 148, n. 3, p. 511-517, 2000.

KOUNO, K.; WU, J.; BROOKES, P. C. Turnover of biomass C and P in soil following incorporation of glucose or ryegrass. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 5, p. 617-622, 2002.

KOWALCHUK, G. A.; BUMA, D. S.; DE BOER, W.; KLINKHAMER, P. G. L.; VAN VEEN, J. A. Effects of above-ground plant species composition and diversity on the diversity of soil-borne microorganisms. **Antonie van Leeuwenhoek**, Dordrecht, v. 81, n. 1-4, p. 509-520, 2002.

KUCEY, R. M. N.; JANZEN, H. H.; LEGGETT, M. E. Microbially mediated increases in plant-available phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 42, p. 199-228, 1989.

KUNZE, Alceu. **Culturas de cobertura no manejo de agroecossistemas: o uso de espécies micorrízicas ou não micorrízicas determina a dinâmica biológica do fósforo no solo**. 2000. 117 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Curso de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

LUKITO, H. P.; KOUNO, K.; ANDO, T. Phosphorus requirements of microbial biomass in a Regosol and an Andosol. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 30, n. 7, p. 865-872, 1998.

MACHADO, M. I. C. S.; BRAUNER, J. L.; VIANNA, A. C. T. Formas de fósforo na camada arável de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 331-336, 1993.

MAGALHÃES, J. C. A. C.; VIEIRA, R. F.; PEREIRA, J. PERES, J. R. R. Efeito da adubação verde na disponibilidade de fósforo de fosfatos, numa sucessão de culturas, em solo do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 329-337, 1991.

MARSCHNER, H.; DELL, B. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 159, n. 1, p. 89-102, 1994.

MATUMOTO-PINTRO, P. T.; QUIQUAMPOIX, H. La phase solides des sols comme contrainte au fonctionnement des enzymes secretees par les microorganismes: comparaison des phytases intra et extracellulaires. In: BALEUX, B.; DESMAZEAUD, M.; DIVIES, C.; GENDRE, F.; MOLETTA, R. (eds.). **Microbiologie industrielle et environment**. Societe Francais de Microbiologie, 1997, p. 195-204.

McCOLLUM R. E. Buildup and decline in soil-phosphorus - 30-year trends on a typic Umprabuult. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, n. 1, p. 77-85, 1991.

McCULLY, M. E. Roots in soil: unearthing the complexities of roots and their rhizospheres. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 695-718, 1999.

McKENZIE, R. H.; DORMAAR, J. F.; SCHAALJE, G. B.; STEWART, J. W. B. Chemical and biochemical changes in the rhizospheres of wheat and canola. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, n. 4, p. 439-447, 1995. Resumo.

MENGEL, K. Agronomic measures for better utilization of soil and fertilizer phosphates. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 7, n. 1-3, p. 221-233, 1997.

MERBACH, W.; MIRUS, E.; KNOF, G.; REMUS, R.; RUPPEL, S.; RUSSOW, R.; GRANSEE, A.; SCHULZE, J. Release of carbon and nitrogen compounds by plant roots and their possible ecological importance. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Berlin, v. 162, n. 4, p. 373-383, 1999.

MEURER, E. J.; RHEINHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fenômenos de superfície. In: MEURER, E. (ed.). **Fundamentos da química do solo**. Porto Alegre: Gênese, 2000, p. 77-105.

MONEGAT, C. **Plantas de cobertura do solo**: características e manejo em pequenas propriedades. Chapecó: Ed. do autor, 1991. 336 p.

MONREAL, C. M.; BERGSTROM, D. W. Soil enzymatic factors expressing the influence of land use, tillage system and texture on soil biochemical quality. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 80, n. 3, p. 419-428, 2000.

MOTAVALLI, P. P.; MILES, R. J. Soil phosphorus fractions after 111 years of animal manure and fertilizer applications. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 36, n. 1, p. 35-42, 2002.

MOTTA, P. E. F.; CURTI, N.; SIQUEIRA, J. O.; VAN RAIJ, B.; FURTINI NETO, A. E.; LIMA, J. M. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influência da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 349-359, 2002.

NAHAS, E.; CENTURION, J. F.; ASSIS, L. C. Microorganismos solubilizadores de fosfato e produtores de fosfatases de vários solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 43-48, 1994.

NEUMANN, G.; MASSONNEAU, A.; LANGLADE, N.; DINKELAKER, B.; HENGELER, C.; RÖMHELD, V.; MARTINOIA, E. Physiological aspects of cluster root function and development in phosphorus-deficient white lupin (*Lupinus albus* L.). **Annals of Botany**, London, v. 85, n. 6, p. 909-919, 2000.

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

OBERSON, A.; BESSON, J. M.; MAIRE, N.; STICHER, H. Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping systems. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 21, n. 3, p. 138-148, 1996.

OEHL, F.; OBERSON, A.; PROBST, M.; FLIESSBACH, A.; ROTH, H-R.; FROSSARD, E. Kinetics of microbial phosphorus uptake in cultivated soils. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 34, n. 1, p. 31-41, 2001.

OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E. Phosphorus. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. (eds.). **Methods of soil analysis** - part 2: chemical and microbiological properties. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., 1982, p. 403-430.

OZAWA, K.; OSAKI, M.; MATSUI, H.; HONMA, M.; TADANO, T. Purification and properties of acid-phosphatase secreted from lupin roots under phosphorus-deficiency conditions. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 41, n. 3, p. 461-469, 1995. Resumo.

PARHAM, J. A.; DENG, S. P.; RAUN, W. R.; JOHNSON, G. V. Long-term cattle manure application in soil - I. Effect on soil phosphorus levels, microbial biomass C, and dehydrogenase and phosphatase activities. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 35, n. 5, p. 328-337, 2002.

PASCUAL, J. A.; GARCIA, C.; HERNANDEZ, T.; MORENO, J. L.; ROS, M. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 13, p. 1877-1883, 2000.

PAULITZ, T. C.; LINDERMAN, R. G. Mycorrhizal interactions with soil organisms. In: ARORA, D. K.; RAI, B.; MUKERJI, K. G.; KNUDSEN, G. R. (eds.). **Handbook of applied mycology** - vol. 1: Soil and plants. New York: Marcel Dekker, 1991, p. 77-129.

POWLSON, D.S.; BROOKES, P. C.; CHRISTENSEN, B. T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 19, n. 2, p. 159-164, 1987.

RAO, A. V.; TARAFDAR, J. C.; SHARMA, S. K.; PRAVEEN- KUMAR.; AGGARWAL, R. K. Influence of cropping systems on soil biochemical properties in an arid rain-fed environment. **Journal of Arid Environments**, London, v. 31, n. 2, p. 237-244, 1995.

RAO, M. A.; VIOLANTE, A.; GIANFREDA, L. Interaction of acid phosphatase with clays, organic molecules and organo-mineral complexes: kinetics and stability. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 7, p. 1007-1014, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 44-47, 2000.

RHEINHEIMER, D.; CASSOL, P. C.; KAMINSKI, J.; ANGHINONI, I. Fósforo orgânico do solo. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999, p. 227-244.

RICHARDSON, A. E. Soil microorganisms and phosphorus availability. In: PUNKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. (eds.). **Soil biota: management in sustainable farming systems**. Melbourne: CSIRO, 1994, p. 238-244.

SANGINGA, N.; CARSKY, R. J.; DASHIELL, K. Arbuscular mycorrhizal fungi respond to rhizobial inoculation and cropping systems in farmers' fields in the Guinea savanna. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 30, n. 3, p. 179-186, 1999.

SANTA CATARINA. Gabinete do Planejamento e Coordenação Geral. Sub-Chefia de Estatística, Geografia e Informática. **Atlas de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986. 173 p.

SAS, L.; RENGEL; Z.; TANG, C. Excess cation uptake, and extrusion of protons and organic acid anions by *Lupinus albus* under phosphorus deficiency. **Plant Science**, Clare, v. 160, n. 6, p. 1191-1198, 2001.

SCHACHTMAN, D. P.; REID, R. J.; AYLING, S. M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant Physiology**, Rockville, v. 116, n. 2, p. 447-453, 1998.

SCHWEIGER, P. F.; JAKOBSEN, I. Direct measurement of arbuscular mycorrhizal phosphorus uptake into field-grown winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 6, p. 998-1002, 1999.

SELLES, F.; CAMPBELL, C. A.; ZENTNER, R. P. Effect of cropping and fertilization on plant and soil phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 1, p. 140-144, 1995.

SHARPLEY, A. N. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 4, p. 905-911, 1985.

SILVA, F. C. DA (org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa, 1999. 370 p.

SINGH, J. S.; RAGHUBANSHI, A. S.; SINGH, R. S.; SRIVASTAVA, S. C. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. **Nature**, London, v. 338, n. 6215, p. 499-500, 1989.

SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal symbiosis**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 605 p.

SOON, Y. K.; ARSHAD, M. A. Comparison of the decomposition and N and P mineralization of canola, pea and wheat residues. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 36, n. 1, p. 10-17, 2002.

SRIVASTAVA, S. C.; SINGH, J. S. Carbon and phosphorus in the soil biomass of some tropical soils of India. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 20, n. 5, p. 743-747, 1988.

SRIVASTAVA, S. C.; SINGH, J. S. Microbial-C, microbial-N and microbial-P in dry tropical forest soils - effects of alternate land-uses and nutrient flux. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 23, n. 2, p. 117-124, 1991.

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: WEAVER, R. W. et al.(eds.). **Methods of soil analysis**. Part 2, Microbiological and biochemical properties. Wisconsin: Soil Science Society of America, 1994, p. 775-833.

TARAFDAR, J. C.; MARSCHNER, H. Phosphatase-activity in the rhizosphere and hyphosphere of VA mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 26, n. 3, p. 387-395, 1994.

TARAFDAR, J. C.; YADAV, R. S.; MEENA, S. C. Comparative efficiency of acid phosphatase originated from plant and fungal sources. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Berlin, v. 164, n. 3, p. 279-282, 2001.

TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 4, p. 853-858, 1984.

TSAI, S. M.; ROSSETO, R. Transformações microbianas do fósforo. In: CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. (eds.). **Microbiologia do solo**. Campinas: SBCS, 1992, p. 231-242.

TURCO, R. F.; KENNEDY, A.C.; JAWSON, M. D. Microbial 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. 73-90.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; KLIRONOMOS, J. N.; URSIC, M.; MOUTOGLIS, P.; STREITWOLF-ENGEL, R.; BOLLER, T.; WIEMKEN, A.; SANDERS, I. R. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. **Nature**, London, v. 396, n. 6706, p. 69-72, 1998.

VAN NOORDWIJK, M.; DE WILLEGEN, P. Quantitative root ecology as element of soil fertility theory. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 34, p. 273-281, 1986.

VARGAS, L. K.; SCHOLLES, D. Nitrogênio da biomassa microbiana, em solo sob diferentes sistemas de manejo, estimado por métodos de fumigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 411-417, 1998.

VÁZQUEZ, M. M.; CÉSAR, S.; AZCÓN, R.; BAREA, J. M. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and other microbial inoculants (*Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*) and their effects on microbial population and enzyme activities in the rhizosphere of maize plants. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 15, n. 3, p. 261-272, 2000.

WALDROP, M. P.; BALSER, T. C.; FIRESTONE, M. K. Linking microbial community composition to function in a tropical soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 13, p. 1837-1846, 2000.

WATT, M.; EVANS, J. R. Proteoid roots. Physiology and development. **Plant Physiology**, Rockville, v. 121, n. 2, p. 317-323, 1999.

WOLLUM, G. A. Soil sampling for microbiological analysis. In: WEAVER, R. W. et al.(eds.). **Methods of soil analysis**. Part 2, Microbiological and biochemical properties. Wisconsin: Soil Science Society of America, 1994, p. 2-13.