

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**FÓSFORO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO AFETADO PELO HISTÓRICO  
DE USO DO SOLO E OS EFEITOS AGRONÔMICO E AMBIENTAL**

**Leandro Bortolon  
(Tese)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**FÓSFORO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO AFETADO PELO HISTÓRICO  
DE USO DO SOLO E OS EFEITOS AGRONÔMICO E AMBIENTAL**

LEANDRO BORTOLON  
Engenheiro-Agrônomo (UFPeI)  
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

Tese apresentada como  
um dos requisitos à obtenção do  
Grau de Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil  
Novembro de 2009

LEANDRO BORTOLON  
Engenheiro Agrônomo (UFPel)  
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

## **TESE**

Submetida como parte dos requisitos  
para a obtenção do Grau de

## **DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO**

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Faculdade de Agronomia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovada em:  
Pela Banca Examinadora

Homologado em:  
por

CLESIO GIANELLO  
Professor Orientador  
PPG-Ciência do Solo

FLÁVIO A. O. CAMARGO  
Coordenador do Programa de Pós-  
Graduação em Ciência do Solo

MARINO JOSÉ TEDESCO  
PPG-Ciência do Solo

PAULO ROBERTO ERNANI  
Departamento de Solos – UDESC

PEDRO ALBERTO SELBACH  
Diretor da Faculdade de Agronomia

CARLOS GUSTAVO TORNQUIST  
CNPq-PNPD

*Esta oração nos acompanha, eu e a Elis, e nos dá força, dedicação e coragem  
para seguir em frente*

*“This is my Bible. I am what it says I am. I have what it says I have. I can do  
what it says I can do. Today I will be taught the word of God. I boldly confess  
my mind is alert, my heart is receptive; I’ll never be the same. In Jesus name,  
God bless you”*

*Joel Osteen*

## AGRADECIMENTOS

À Elisandra, minha esposa e companheira de todas as horas, e de todas as batalhas enfrentadas durante essa caminhada, pelo amor, renúncia, compreensão e, especialmente, pela oportunidade de participar diariamente da sua vida acadêmica como colega de graduação, mestrado e doutorado e por se dispor a participar ativamente deste projeto, contribuindo muito para que esta conquista fosse alcançada. “*God Bless you*”

Aos meus pais Ady e Maria, pelo exemplo de honestidade, trabalho, valores e dedicação à família, e pelo estímulo na minha formação. Às minhas irmãs, Juliana e Raquel, pelo apoio e incentivo, mesmo estando distantes.

À família da Elisandra, Sr. Daltro e Sra. Lúcia, e às irmãs, Eliana e Elisângela, pela compreensão e incentivo. Em especial ao Daniel, por todo o apoio durante esses anos e principalmente durante nossa estadia nos Estados Unidos. Aos tios de Santa Catarina pela acolhida e respeito.

Ao Prof. Clesio Gianello, pela orientação, apoio, amizade e exemplo profissional. Por incentivar e propiciar a busca do conhecimento. Ao Prof. Clesio meu grande apreço e gratidão.

Ao Prof. Marino Tedesco, pelo exemplo profissional, paciência, estímulo, e amizade. Por transmitir o conhecimento de forma simples e humilde, pela oportunidade de convivência e pela parceria desde 2003, “craniando” nos resultados. Ao Prof. Marino meu grande apreço, gratidão e admiração.

À UFPel pela formação acadêmica.

À UFRGS pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao PPGCS pela oportunidade e estrutura oferecida para realizar o curso.

Ao CNPq e à CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação Agrisus e Laboratório de Análises de Solos (LAS-UFRGS) pelo apoio financeiro.

Ao USDA-ARS-National Laboratory for Agriculture and the Environment pela oportunidade de realizar o doutorado sanduíche. Ao pesquisador John L. Kovar e família, pela amizade, receptividade, atenção e grande interação durante o período de estada em Ames. Ao amigo Jay Berkey, pela amizade, pelo interesse no projeto, por todo o apoio durante a realização dos trabalhos. À Megan Nelson por todo o apoio durante a execução das análises.

Aos Professores do PPGCS, pelo aprendizado. Em especial ao Prof. João Mielnickzuk, pela amizade e conselhos; ao Prof. Ibanor Anghinoni pela confiança; e ao Prof. Flávio A.O. Camargo pela amizade, apoio e diretrizes as quais me tornaram uma pessoa melhor, meu grande apreço.

Aos colegas de curso e colegas de laboratório pela convivência. Em especial, Osmar Conte, Andressa Silveira, Fabíola Lopes, André Amaral, Luís França e Felipe Carmona.

Aos amigos e colegas Robson Andreazza e Simone Pieniz pela amizade, incentivo, companheirismo, parceria, e por compartilharmos bons momentos durante essa etapa da vida.

Aos funcionários do LAS-UFRGS pelo auxílio e amizade. Em especial, Bernadete, Daniel, Elio, Josi, Letícia, Lisandra, Licínio, Marlis, Taís e Vítor.

Ao Sr. Jader Amaro, secretário do PPGCS, meu apreço.

À família Kosloski de Ijuí nas pessoas da Sra. Eva e Sr. Zica e Sra. Mari, Sr. Luiz e Cristiano, que abriram as portas da sua casa e da sua propriedade para a realização do presente trabalho, tornado-se a base de apoio da nossa equipe de trabalho e facilitando a realização deste projeto. À família Kosloski, minha eterna gratidão. À FUNDACEP, nas pessoas de Dr. Jackson Fiorin e Sr. Tiago por todo o apoio nos experimentos de campo. Aos produtores de Vacaria, Srs. Cleverson Dian e Juliano Scopel pela cedência da área e total apoio durante o experimento.

Aos bolsistas de iniciação científica Samuel Welter e Rodrigo G.O. Almeida, por todo o apoio e amizade construída.

A Deus por nos proteger durante as várias viagens de campo pelo planalto gaúcho durante o acompanhamento dos experimentos.

Ao povo brasileiro, cujos impostos custearam meus estudos desde o curso de graduação.

# FÓSFORO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO AFETADO PELO HISTÓRICO DE USO DO SOLO E OS EFEITOS AGRONÔMICO E AMBIENTAL <sup>1/</sup>

Autor: Leandro Bortolon

Orientador: Clesio Gianello

## RESUMO

A produção de alimentos é fundamental para a existência humana e são utilizadas as fontes mundiais de fósforo, um nutriente crítico para a produtividade das culturas, obtido das rochas fosfáticas. As reservas fosfáticas poderão ser extintas nos próximos 50-100 anos. A demanda por fósforo é estimada em crescer entre 50-100% até 2050 com o aumento da demanda global por alimento e mudanças no hábito alimentar. Desta maneira, são necessárias alternativas para aumentar a eficiência do uso do fósforo na agricultura para suprimento de alimento ao longo dos anos. Este estudo objetivou investigar a dinâmica do fósforo afetada pelo histórico de uso do solo e a resposta das culturas à adubação fosfatada. Solos com diferente histórico de uso foram selecionados. Foi desenvolvido um equipamento para coleta de amostras indeformadas de solo sob sistema plantio direto, para uso em condições controladas. Foi instalado, também, experimentos em condições de campo com doses de fósforo para avaliar a resposta das culturas. Um estudo teórico foi feito para avaliar estratégias para reduzir as perdas de fósforo do solo por escoamento superficial. Os resultados de resistência do solo à penetração e densidade do solo em cada local não diferiram estatisticamente. A metodologia proposta pode ser utilizada em condições controladas com amostras indeformadas coletadas em solos sob sistema plantio direto. O rendimento das culturas aumentou com a adição de doses de fósforo diferindo das doses atualmente empregadas. Entretanto, aspectos ambientais precisam ser considerados e avaliados na aplicação desses resultados. A inclusão de classes de pH e de matéria orgânica do solo pode melhorar a interpretação dos teores de fósforo disponível no solo, podendo reduzir as quantidades aplicadas. Os altos teores de fósforo nas camadas superficiais do solo associados com longos períodos de saturação do solo, principalmente durante o inverno, aumenta o potencial de perda de fósforo no solo por escoamento superficial, devido aos altos teores de formas de fósforo suscetíveis à erosão e ao aumento do grau de saturação de fósforo no solo.

---

<sup>1/</sup> Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (92 p.) Novembro, 2009. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq, LAS-UFRGS e Fundação Agrisus.

# SOIL PHOSPHORUS UNDER NO TILL AFFECTED BY LAND USE AND THE EFFECTS ON AGRONOMIC AND ENVIRONMENTAL ASPECTS <sup>1/</sup>

Author: Leandro Bortolon

Adviser: Prof. Clesio Gianello

## ABSTRACT

Food production is fundamental to our existence, yet we are using up the world's supply of phosphorus, a critical nutrient in crop production. Today, phosphorus is mostly obtained from mine rock phosphate. Existing rock phosphate reserves could be exhausted in the next 50–100 years. The demand for phosphorus is predicted to increase by 50–100% by 2050 with increased global demand for food and changing diets. An alternative way to increase phosphorus use in agriculture is necessary to guarantee supply for long-term food. This study sought to investigate phosphorus dynamics in soils under no till affected by land use. Soil with contrasting land use were selected and developed and equipment to sampling undisturbed soil samples to use in controlled conditions. It was installed field trials with phosphorus doses and application methods to evaluate the crop yield response. A theoretical study was carried out to evaluate the strategies to reduce phosphorus losses by surface runoff. The results did not statistical differ by soil penetration resistance and soil density in each site and depth sampled. The proposal methodology can be used to greenhouse studies with soils under no till. Crops yield increased with phosphate amendment contrasting with the doses usually recommended. However, environmental concerns must be considered to apply this data. The inclusion of soil organic matter and soil pH values might improve the soil available phosphorus interpretation, reducing the phosphorus amounts applied. The high soil phosphorus levels in the topsoil layers associate with high periods of soil water saturation, mainly in the winter, increased the potential soil phosphorus losses by runoff due the high values on the topsoil layers of both degree of phosphorus saturation and water extractable phosphorus.

---

<sup>1/</sup> Doctorate Thesis in Soil Science – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (92 p.) November, 2009. Research supported by CNPq, LAS-UFRGS and Fundação Agrisus.

## SUMÁRIO

	Página
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	1
<b>2. CAPÍTULO I – Revisão Bibliográfica</b> .....	4
2.1. O fósforo no contexto da segurança alimentar global e a produção de bioenergia .....	4
2.2. Manejo do solo e do fósforo na agricultura para proteção do solo e água .....	5
2.3. Fósforo em solos tropicais: disponibilidade e funções para as plantas .....	7
2.4. Dinâmica do fósforo no solo em função do sistema de manejo e as recomendações de adubação .....	9
2.5. Grau de saturação de fósforo no solo e sua relação com aspectos agronômicos e ambientais .....	12
2.6. Técnicas de determinação de fósforo em solos .....	14
2.7. Referências bibliográficas .....	15
<b>3. CAPÍTULO II – Metodologia para obtenção de amostras indeformadas de solo sob plantio direto para estudo em condições controladas</b> .....	23
3.1. Introdução .....	24
3.2. Material e métodos .....	26
3.3. Resultados e discussão .....	30
3.4. Conclusões .....	33
3.5. Referências bibliográficas .....	34
<b>4. CAPÍTULO III – Resposta das culturas à adição de superfosfato triplo e o risco de perdas de fósforo em solos com diferentes históricos de uso e manejo</b> .....	36
4.1. Introdução .....	37
4.2. Material e métodos .....	39
4.2.1. Histórico de uso e manejo do solo das áreas experimentais .....	39
4.2.1.1. Ijuí .....	39
4.2.1.2. Cruz Alta .....	40
4.2.1.3. Vacaria .....	40
4.2.2. Experimentos de campo .....	40
4.2.3. Experimento em condições controladas .....	43
4.2.4. Análise estatística .....	44
4.3. Resultados e discussão .....	45
4.3.1. Experimento de campo .....	45
4.3.2. Experimento em condições controladas .....	51
4.3.3. Relação entre aumento do fósforo no solo e o potencial de perda .....	55
4.4. Conclusões .....	58
4.5. Referências bibliográficas .....	59
<b>5. CAPÍTULO IV – Fósforo extraído pela solução de Mehlich-1 determinado por colorimetria e ICP em solos do sul do Brasil</b> .....	62
5.1. Introdução .....	63
5.2. Material e métodos .....	65
5.3. Resultados e discussão .....	67

5.4. Conclusão .....	72
5.5. Referências bibliográficas .....	73
<b>6. CAPÍTULO V – Possibilidades para aumentar a eficiência do uso do fósforo na agricultura e para a proteção ambiental ....</b>	<b>75</b>
6.1. Introdução .....	76
6.2. Teores de fósforo e manejo do solo .....	78
6.2.1. Propriedades químicas do solo .....	79
6.2.2. Práticas de controle da erosão .....	82
6.3. Considerações finais .....	88
6.4. Referências bibliográficas .....	89
<b>7. CONCLUSÕES FINAIS .....</b>	<b>91</b>
<b>8. RESUMO BIOGRÁFICO .....</b>	<b>92</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>TABELA 3.1.</b> Atributos físicos e químicos dos solos utilizados no estudo, na profundidade de zero a 20 cm.....	28
<b>TABELA 3.2.</b> Índice de cone obtido em quatro classes de solo, em duas condições de amostragem para cada solo, calculado em intervalos de 5 cm até 20 cm de profundidade .....	30
<b>TABELA 3.3.</b> Densidade do solo obtida em quatro classes de solo, em duas condições de amostragem para cada solo, em intervalos de 5 cm até 20 cm de profundidade .....	31
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>TABELA 4.1.</b> Caracterização físico-química dos solos das áreas utilizadas .....	41
<b>TABELA 4.2.</b> Caracterização físico-química <sup>1</sup> dos solos nas amostras indeformadas das áreas utilizadas.....	43
<b>TABELA 4.3.</b> Análise dos solos na profundidade de 0-10 cm após a colheita da soja e dados de rendimento das plantas cultivadas submetidas a doses de fósforo .....	46
<b>TABELA 4.4.</b> Correlação entre as formas <sup>1</sup> de fósforo nos solos e entre as doses de adição de fósforo .....	46
<b>TABELA 4.5.</b> Análise dos solos na profundidade de 0-5 cm após a sequência de cinco cultivos com doses de fósforo .....	51
<b>TABELA 4.6.</b> Resposta das culturas <sup>1</sup> à adição de fósforo no eperimento conduzido em condições controladas .....	52
<b>TABELA 4.7.</b> Correlação entre as formas <sup>1</sup> de fósforo nos solos e entre as doses de adição de fósforo .....	53
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>TABELA 5.1</b> Caracterização química e física dos solos utilizados no estudo <sup>(1)</sup> .....	65
<b>TABELA 5.2</b> Amplitude dos teores de P extraído por Mehlich-1 determinado por colorimetria (COL) e por espectrometria de emissão ótica por plasma induzido (ICP), em 595 amostras de solo do RS, e o limite de detecção dos métodos .....	68
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>TABELA 6.1.</b> Estatística decritiva de alguns atributos <sup>1</sup> e dados de rendimento <sup>2</sup> das áreas utilizadas .....	80
<b>TABELA 6.2.</b> Coeficientes correlação (r) entre os teores de P nas diferentes classes de interpretação e o rendimento relativo das culturas .....	80
<b>TABELA 6.3.</b> Coeficientes de correlação (r) entre os teores de P nas diferentes classes de interpretação e o rendimento relativo das culturas, em duas classes de pH e do teor de matéria orgânica dos solos .....	81
<b>TABELA 6.4.</b> Esquema para o manejo adequado das terras de acordo com o risco de perda de fósforo .....	82

## RELAÇÃO DE FIGURAS

		Página
	<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>FIGURA 3.1.</b>	Detalhe do amostrador: corte frontal (a); vista frontal (b); projeção amostrador e PVC (c); e vista superior (d) .....	27
	<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>FIGURA 4.1.</b>	Respostas em rendimento de grãos de soja e de trigo em Ijuí (solo LVdf2), Cruz Alta (solo LVdf) e Vacaria (solo LBaf) pela aplicação de doses crescentes de fósforo .....	48
<b>FIGURA 4.2.</b>	Relação entre o rendimento de grãos e o teor de fósforo nos solos com adição de doses crescentes de fósforo .....	50
<b>FIGURA 4.3.</b>	Relação entre o rendimento de matéria seca de plantas em solos com adição de fósforo .....	54
<b>FIGURA 4.4.</b>	Relação entre o rendimento relativo de uma cultura e teores de P no solo extraído pela solução de Mehlich-1 e P perdido por erosão (P extraível em água ou GSP) (TC = teor crítico (adaptado de Gianello & Wietholter, 2004) .....	57
	<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>FIGURA 5.1.</b>	Relações entre os teores de P extraído pela solução de Mehlich-1 determinado por COL e por ICP : a) em todos os solos; b) em solos com $P < 30 \text{ mg dm}^{-3}$ .....	68
<b>FIGURA 5.2.</b>	Relações entre os teores de P extraído pela solução de Mehlich-1 determinado por colorimetria (COL) e por ICP, conforme as classes de textura: a) classe 1: > 60%; b) classe 2: 40-60%; c) classe 3: 20-40%; d) classe 4: < 20% de argila, respectivamente .	70
<b>FIGURA 5.3.</b>	Relações entre os teores de P extraído pela solução de Mehlich-1 determinado por colorimetria (COL) e por ICP, e as doses de $P_2O_5$ recomendadas para o milho (para uma expectativa de rendimento de $8,0 \text{ t ha}^{-1}$ ) .....	71
	<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>FIGURA 6.1.</b>	Relações entre o teor de P no solo extraído pela solução de Mehlich-1 e os teores de matéria orgânica (MOS) e os valores de pH em água em amostras de solo sob plantio direto (Informação do laboratório de Análise de Solos - UFRGS, 2008)	79
<b>FIGURA 6.2.</b>	Mapa hipsométrico do Distrito Santana, município de Ijuí-RS, obtido do modelo numérico do terreno, por interpolação das curvas de nível espaçadas de 20 em 20 metros (Brasil, 1980). (Informações obtidas por Bortolon, 2008, com permissão) .....	85
<b>FIGURA 6.3.</b>	Elementos da paisagem obtido do modelo numérico do terreno, com base nas curvas de nível espaçadas de 20 em 20 m (Brasil, 1980), para o Distrito Santana, município de Ijuí-RS. (Informações obtidas por Bortolon, 2008, com permissão) .....	86
<b>FIGURA 6.4.</b>	Imagens de satélite da região do Distrito Santana, município de Ijuí, RS, com a classificação das áreas de risco (a) de acordo com a elevação, a posição na paisagem, a hidrologia e a proximidade das áreas dos recursos hidrológicos. No mapa (b), a área classificada como baixo representa onde o experimento de campo foi conduzido .....	87

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O fósforo é um nutriente essencial para as plantas e deve ser suprido em quantidades adequadas para obtenção de altas produtividades das culturas. A fonte primária para a produção de fertilizante fosfatado são as minas de rochas fosfáticas, e diversas pesquisas e levantamentos indicam que as reservas globais dessa rocha serão extintas em 50 a 100 anos. Durante este mesmo período, a demanda global por alimentos aumentará de 50 a 100%, com a conseqüente demanda de fósforo para a produção de bioenergia. A eficiência do uso deste nutriente na agricultura deve ser aumentada, considerando-se que apenas 15 a 30% do fósforo aplicado como fertilizante é aproveitado pelas culturas. O uso do solo com sistemas conservacionistas de manejo, associado às práticas conservacionistas de suporte, reduz o movimento do fósforo do solo para águas superficiais.

Nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, estima-se em cinco milhões de hectares a área cultivada sob sistema plantio direto, que se conduzido com práticas conservacionistas de suporte, reduz consideravelmente as perdas de solo e água. Além disso, os teores de fósforo na camada superficial (0-10 cm) estão nas classes “alto” e “muito alto” em praticamente 70% dessa área, e a adubação, nesses casos, é feita a lanço, em superfície. No entanto, no estado do Rio Grande do Sul as retiradas de terraços e plantio em contornos em áreas com grande potencial de perdas de solo e água estão aumentando, sendo frequentemente observados sulcos de erosão e perdas de solo e água, e conseqüentemente o fósforo contido nos mesmos.

Em termos agronômicos, essa perda anual de fósforo pode ser pequena; no entanto, sob o aspecto de qualidade de água, o ambiente aquático poderá se tornar eutrófico num curto período de tempo. No estado do RS e, de maneira geral, em toda a região Sul do Brasil, no período de inverno, normalmente, a erosividade da chuva é mais baixa do que no verão. Assim, a cobertura do solo pelos resíduos culturais seria suficiente para dissipar a energia cinética da chuva. Entretanto, nesse período, o volume de chuva é,

normalmente, maior do que ocorre no verão. As chuvas com essas características, de maior quantidade e baixa energia, ao atingir a superfície do solo com pequena rugosidade superficial, facilitam o escoamento superficial. Essas condições podem, então, provocar grandes problemas de erosão, mesmo em plantio direto com cobertura de solo, ocorrendo o transporte do fósforo contido no material orgânico e nas partículas de solo para o ambiente aquático.

O entendimento desse processo é fundamental no estabelecimento de melhores práticas de manejo do fósforo na agricultura, sob o enfoque de manutenção das reservas finitas de fósforo, aumentando a eficiência do uso do mesmo. Além disso, frente ao aumento na demanda global por alimentos e crescimento na produção de bioenergia, o aumento do consumo do fósforo será inevitável, e deste modo, práticas de manejo e da fertilidade do solo que visem o uso eficiente do fósforo na agricultura serão fundamentais para a manutenção, em longo prazo, das reservas globais finitas desse nutriente.

Assim, os objetivos do presente projeto foram: a) desenvolver um equipamento de coleta de amostras indeformadas de solo; b) avaliar a resposta das culturas à adubação fosfatada; c) estimar o risco de perda de fósforo em solos sob sistema plantio direto, de forma a reduzir as perdas deste nutriente para o ambiente aquático; d) avaliar métodos de determinação de fósforo; e e) identificar possibilidades para o manejo do fósforo na agricultura.

## **CAPÍTULO I – Revisão Bibliográfica**

### **FÓSFORO NO SOLO AFETADO PELO USO E MANEJO E RESPOSTA À ADUBAÇÃO FOSFATADA**

## **2. CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. O fósforo no contexto da segurança alimentar global e a produção de bioenergia**

A produção de alimentos e a energia são fundamentais para a existência humana; a adubação fosfatada é necessária para suprir o fósforo, nutriente essencial para as culturas. O P é obtido principalmente de rochas fosfáticas, e é muitas vezes combinado em fertilizantes minerais com ácidos sulfúrico ou fosfórico, nitrogênio (N) e potássio. As reservas globais de fosfato natural podem ser extintas nos próximos 50-100 anos (Steen, 1998; Smil, 2000b; Gunther, 2005). A indústria de fertilizantes reconhece que a qualidade das reservas está diminuindo e os custos de extração, processamento e transporte está aumentando (Runge-Metzger, 1995; Driver, 1998; Smil, 2000b; ECOSANRES, 2003).

Outros aspectos a serem considerados são: (i) 90% da demanda global de P é para a produção de alimentos, com uma utilização estimada de 150 milhões de toneladas de rocha fosfática por ano (Smil, 2000a,b; Gunther, 2005); (ii) estima-se que a demanda por P aumentará entre 50 a 100% até 2050 com aumento da demanda global por alimentos e produção de bioenergia (Cordell et al., 2009); (iii) o P é um recurso não renovável, à semelhança do petróleo, sendo que as reservas globais comerciais de fosfato serão extintas em 50-100 anos caso sejam mantidas as taxas de extração atuais (Runge-Metzger, 1995; ECOSANRES, 2003; Steen, 1998), e o restante das reservas potenciais são de baixíssima qualidade ou de alto custo de extração; e (iv) as reservas de rocha fosfática estão sob controle de poucos países (principalmente Marrocos, China e Estados Unidos) e, também, sujeitas à influência política internacional. O Marrocos tem quase monopólio sobre as reservas do oeste do Saara, e a China está reduzindo drasticamente as exportações para segurança doméstica; nos Estados Unidos restam menos de 30 anos de suprimento, enquanto o

Oeste Europeu e a Índia são totalmente dependentes de importações (Jasinski, 2006; Rosmarin, 2004).

Respostas comuns para problemas de escassez de recursos incluem preços mais elevados, o uso mais eficiente dos recursos, e a adoção de alternativas pela recuperação dos recursos após o uso. O uso de P se torna mais eficiente, especialmente na Europa e Estados Unidos. Agricultores na Europa e América do Norte estão evitando cada vez mais a adubação excessiva de P e aproveitando a reciclagem do P via resíduos vegetais e aplicação de dejetos de animais em solos agrícolas (European Fertilizer Manufacturers Association, 2000, Sharpley et al., 2005). Entretanto, muitas discussões sobre o uso eficiente de P, e a maior parte das medidas para alcançar este objetivo, foram motivadas por preocupações com a eutrofização provocada pelo transporte e movimentação do P de terras agrícolas para o ambiente aquático (Sharpley et al., 2005, Sharpley et al., 2008). Embora essas medidas sejam essenciais, elas não são, por si só, suficientes para atingir a sustentabilidade do P a longo prazo. Uma abordagem mais integrada e eficaz para a gestão do ciclo do P é necessária, considerando a escassez de P no futuro e a necessidade de adotar práticas sinérgicas para reduzir perdas, recuperar e reutilizar o P (Cordell et al., 2009).

## **2.2. Manejo do solo e do fósforo na agricultura para proteção do solo e água**

Os efeitos dos sistemas conservacionistas de manejo do solo sobre a dinâmica da matéria orgânica do solo são bem conhecidos, devido à utilização destas práticas para o sequestro de carbono (C). Os mecanismos para aumentar os teores de matéria orgânica do solo incluem a diversidade de plantas no sistema de culturas, manejo dos resíduos e redução na mobilização do solo, que juntos, tendem a aumentar o estoque de matéria orgânica nos agregados do solo (Tisdall & Oades, 1982; Jastrow, 1996; Bayer et al., 2006; Bayer et al., 2009). A diferença entre solos, avaliada pela distribuição do tamanho de agregados, pode ser utilizada para avaliar o impacto do sistema de manejo do solo, pois a matéria orgânica pode ser protegida da decomposição dentro dos agregados (Jastrow, 1996; Six et al., 1998; Silva e Mielnickzuk, 1997; Salton, et al., 2008). Práticas de uso e manejo do solo que aumentam a agregação e os níveis de matéria orgânica do solo, poderiam, também, aumentar a retenção do P e sua estabilidade. Efeitos da agregação sobre o

sequestro de P em frações químicas podem ilustrar como o uso e manejo do solo influenciam na distribuição e estabilidade do P no solo (Wright, 2009).

Por outro lado, a manutenção dos restos culturais na superfície do solo e a redução na mobilização do mesmo pelo preparo, produzem mudanças na ciclagem e transformações dos nutrientes no solo (Hedley et al., 1982). As mudanças no manejo dos resíduos de plantas, devido à adoção de sistemas conservacionistas de manejo, têm o potencial de alterar a concentração e distribuição do P no perfil do solo, principalmente nas camadas mais superficiais. Em geral, a concentração de P em solos em plantio direto aumenta nos 5 cm superficiais de solo, e diminui com o aumento da profundidade, comparativamente a sistemas com alto grau de revolvimento. O acúmulo de P na camada superficial do solo, em sistema plantio direto, é devido à aplicação de fertilizantes fosfatados em superfície por vários anos, à liberação durante a decomposição dos resíduos de plantas e animais, da diminuição da fixação devido ao menor contato deste elemento com os constituintes inorgânicos do solo, às menores perdas de solo por erosão (Santos et al., 2003) e à proteção em agregados (Wright, 2009).

A redução do uso de práticas conservacionistas de suporte pelos agricultores tem sido comum nos estados do RS e de SC, potencializando as perdas de solo e água e, conseqüentemente, o P contido nos mesmos. Pesquisas recentes nesses estados, utilizando-se chuva natural ou simulada, indicaram que consideráveis quantidades de P são transportadas de solos agrícolas para o ambiente aquático (Cassol et al., 2007; Bertol, 2007a; Bertol, 2007b; Gilles et al., 2009), favorecendo o processo de eutrofização.

A redução das perdas de solo e água, diminui também as perdas de P da agricultura para o ambiente aquático. No entanto, deveriam ser feitos esforços para aumentar a eficiência do uso do P, pelas entradas balanceadas deste nutriente pelos fertilizantes ou pelos dejetos de animais, com saídas proporcionais pelas culturas (grãos ou material vegetal) e pela produção animal. Deste modo, a redução das perdas de P por escoamento superficial pode ser feita pela escolha da fonte de P e pelo controle do transporte de P por erosão (Sharpley et al., 2001). Atualmente, é amplamente conhecida a possibilidade de reduzir o transporte de P de áreas agrícolas por erosão. Entretanto, pouca atenção é dada aos fatores que contribuem para a redução e controle da perda do P dissolvido no escoamento superficial.

### **2.3. Fósforo em solos tropicais: disponibilidade e funções para as plantas**

O P contido no material de origem do solo está totalmente na forma de minerais, com predomínio dos fosfatos de cálcio. Com o intemperismo desses minerais e a atuação dos fatores de formação do solo (material de origem, relevo, clima, organismos, tempo e homem), esse nutriente é liberado para a solução do solo. Concomitantemente, ocorrem perdas de bases, sílica e carbonatos e aumentos na atividade de elementos como o alumínio e o ferro. Conseqüentemente ocorre a transformação dos minerais primários em argilas 2:1 e essas em 1:1 e óxidos. São formados, à seguir, minerais fosfatados mais estáveis termodinamicamente, sendo parte do P adsorvido na superfície de minerais secundários e parte é absorvido e incorporado pela biomassa e na matéria orgânica do solo, aumentando a proporção de P em formas orgânicas (Walker & Syers, 1976). Ambos os processos, geoquímicos e biológicos, transformam os fosfatos naturais em formas inorgânicas e orgânicas estáveis, com a concomitante transferência desse nutriente para os ambientes aquáticos. Em ecossistemas menos intemperizados, a quantidade de P é alta e predominam minerais primários, como a fluorapatita; em solos moderadamente intemperizados, a maior parte do P encontra-se na forma orgânica e adsorvida fracamente aos minerais secundários; nos solos muito intemperizados predominam formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia e as formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente. Esse modelo tem sido confirmado por vários pesquisadores (Tiessen et al., 1984; Smeck, 1985; Roberts et al., 1985; Sharpley et al., 1987; Agbenin & Tiessen, 1994; Cross & Schlesinger, 1995; Guerra et al., 1996). Isso sugere que os teores de P dependem inicialmente do material de origem e que os processos geoquímicos controlam o ciclo do P. Com o avanço do intemperismo aumentam a importância das frações orgânicas como fontes desse nutriente aos organismos vivos. Assim, as frações mais lábeis são dependentes do grau de intemperização, das características químicas e físicas do solo, da atividade biológica e da vegetação predominante, entre outras (Cross & Schlesinger, 1995; Guerra et al., 1996).

A disponibilidade do P no solo para as plantas depende dos fatores que afetam o movimento do P da solução do solo até a superfície das raízes, da capacidade do solo manter P na solução e de outros fatores limitantes ao

crescimento das plantas. A maior parte do P no solo está em formas não disponíveis para as plantas. Porém, durante o crescimento das mesmas, e devido ao equilíbrio químico existente entre essas formas e as que estão na solução do solo, certa quantidade do nutriente torna-se disponível para ser absorvido. Embora as quantidades e as fontes de nutrientes absorvidos pelas plantas nem sempre sejam as mesmas das fontes determinadas pelos métodos químicos de análise de solo, devido às diferenças dos princípios de absorção pelas plantas e dos de extração pelos métodos químicos, os valores das análises de solo podem ser correlacionados com as quantidades absorvidas pelas plantas.

A maior parte do P do solo está na fase sólida, em formas inorgânicas, adsorvido fortemente por ligações covalentes com óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio em solos com reação mais ácida, ou com cálcio em solos com reação neutra ou alcalina, e em formas orgânicas que devem ser mineralizadas para que o fósforo seja disponibilizado às plantas (Sanchez & Uehara, 1980).

As plantas absorvem o P da solução do solo nas formas de ortofosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ ). Após absorvido pela planta, o P permanece na forma de fosfato, não modificando seu estado de oxidação. O radical fosfato no interior da planta pode estar como íon livre em solução, ligado a cátions metálicos formando compostos solúveis ou complexos insolúveis e, na forma mais importante, ligado a radicais orgânicos. Os compostos fosfatados mais importantes são os ácidos nucleicos (ADN e ARN), fosfatos de inositol, fosfolipídeos, di e trifosfato de adenosina (ATP e ADP) e fosfato de nicotinamida adenina nucleotídeo (NADP). Por fazer parte da constituição destes compostos orgânicos, o P é essencial para a divisão celular, a reprodução e o metabolismo vegetal (fotossíntese, respiração e síntese de substâncias orgânicas). Nas sementes, o P é armazenado principalmente na forma de fitina (sal de Ca e Mg do hexafosfato de inositol). Esse composto é hidrolisado enzimaticamente durante a germinação e, então, o P, na forma de íon fosfato livre, pode ser utilizado pela planta em desenvolvimento. Como os processos metabólicos são muito intensos nos tecidos em desenvolvimento, o P, em geral, é encontrado em maiores concentrações nestes tecidos do que nos tecidos velhos. O P é bastante móvel na planta, podendo, se necessário, ser deslocado de tecidos (ou partes) mais velhos para tecidos (ou partes) mais jovens. A concentração de P nos tecidos vegetais varia entre as espécies, sendo, em geral, maior nas sementes do que nas outras partes da planta.

#### **2.4. Dinâmica do fósforo no solo em função do sistema de manejo e as recomendações de adubação.**

O método de preparo de solo utilizado por muitos anos no sul do Brasil foi o convencional, que é constituído por uma aração (até 20 cm) seguida de duas gradagens (Mielnickzuk, 1999). Esse método de preparo desestrutura o solo, favorece a desagregação e aumenta a vulnerabilidade do mesmo aos agentes erosivos, e, além disso, favorece a compactação das camadas mais profundas. A degradação física do solo combinada com uma grande declividade do terreno, longo comprimento de rampa, dois cultivos anuais com grãos e chuvas de alta intensidade, provoca uma grande erosão (perdas de solo e de água) e redução da fertilidade do solo (Wunsche & Denardin, 1980; Mielnickzuk, 1999; Cassol et al., 2007). Conseqüentemente, a produtividade nesses solos diminui ao passar dos anos. Contudo, a adoção de sistemas conservacionistas de manejo, que minimizem a mobilização do solo e mantenham os resíduos culturais na superfície do solo, combinados com práticas conservacionistas de suporte como a rotação de culturas, o cultivo em nível e a utilização de terraços, possibilitam uma gradual recuperação da fertilidade e produtividades satisfatórias (Castro Filho et al., 1991; Mielnickzuk, 1999; Cassol et al., 2007).

A manutenção dos restos culturais na superfície do solo e a redução da mobilização do solo produzem mudanças na ciclagem e transformações dos nutrientes (Hedley et al., 1982). As mudanças no manejo dos resíduos de plantas, em sistemas conservacionistas possibilitam alterar a concentração e a distribuição do P no perfil do solo, principalmente nas camadas mais superficiais. Em geral, a concentração de P em solos sob plantio direto aumenta nos cinco centímetros superficiais, e diminui em profundidade, quando comparado com sistemas com grande revolvimento (Anghinoni, 2007).

Em experimentos de longa duração, é observado o efeito do plantio direto no acúmulo de nutrientes na camada superficial, aumentando os teores de matéria orgânica (Amado et al., 2001). O P é o elemento que tem menor mobilidade no solo. Por esse fato, observa-se aumentos nos teores de P de quatro a sete vezes maiores do que os de outros nutrientes na camada superficial (0 a 5 cm) do solo sob plantio direto em relação ao sistema convencional (Núñez et al., 2003). Ciotta et al. (2002), em experimento conduzido durante 21 anos, concluíram que no solo sob preparo convencional, a incorporação dos adubos

fosfatados, com aração e gradagem, intensificou as reações de adsorção na camada arável (0-20 cm). Sob preparo convencional, diminuiu o teor de matéria orgânica do solo, com as conseqüentes alterações nas reações das formas de P inorgânicas disponíveis, no compartimento da biomassa microbiana e nas formas orgânicas disponíveis (Rheinheimer, 2000).

Em geral, solos sob preparos conservacionistas concentram P disponível na camada superficial e ocorre estratificação de P no perfil, com redução da concentração com o aumento da profundidade (Anghinoni, 2007). Em um experimento com duração de 12 anos foi determinada uma concentração de 2,42 vezes maior de P disponível em plantio direto comparado com o preparo convencional na camada de 0 -10 cm; no entanto, na camada de 10-50 cm, a concentração foi maior no preparo convencional (Lal et al., 1990). O acúmulo de P na camada superficial do solo em plantio direto é devido à aplicação de fertilizantes fosfatados, à liberação durante a decomposição dos resíduos de plantas e animais, à diminuição da fixação, pelo menor contato desse elemento com os constituintes inorgânicos do solo, e às menores perdas de solo por erosão (Santos et al., 2003).

Os sistemas de culturas apresentam diversos efeitos sobre a dinâmica do P. O fluxo contínuo de diferentes formas de C, provenientes da decomposição dos resíduos culturais, associado ao não revolvimento do solo, dá origem à competição pelos sítios de carga positiva dos colóides inorgânicos por parte dos compostos orgânicos, formando complexos orgânicos com os íons de  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  e  $Mn^{2+}$  (Franchini et al. 2000). O resultado da ocupação dos sítios de carga positiva na superfície dos colóides inorgânicos é a minimização da passagem do P-disponível para o P-não disponível, aumentando a disponibilidade de P para as raízes das plantas (Rheinheimer, 2000). Silveira & Stone (2001), avaliando seis sistemas de rotação de culturas, verificaram que estes não afetaram significativamente os teores de P disponível no solo, mas de forma geral os teores de P no solo aumentaram com os anos de cultivo em todas as rotações estudadas. Estudando o efeito de diferentes sistemas de preparo e culturas sobre os atributos químicos de um Argissolo do RS, Carballo (2004) observou diferenças no P disponível nas camadas superficiais do solo no sistema plantio direto e quantidades menores no sistema convencional. Os sistemas de culturas pouco afetaram as diferenças de P disponível no solo.

As diferenças obtidas por diversos autores quanto ao acúmulo de P na camada superficial do solo no sistema plantio direto afetam a profundidade de amostragem, as classes de interpretação e os teores críticos de P em cada classe, bem como a recomendação de adubação para as culturas.

As doses de fertilizantes fosfatados recomendadas pela CQFS (2004) são maiores do que as das recomendações anteriores de Siqueira et al. (1987) e Comissão... (1989; 1995). No entanto, as faixas de teores de nutrientes e seus respectivos teores críticos, embora tenham sido ajustados, são os mesmos dessas recomendações. Schlindwein (2003) e Schlindwein & Gianello (2004) criticaram os valores de teores críticos utilizados pela CQFS (2004), e por consequência as faixas de disponibilidade de P, por ter sido a calibração feita no sistema convencional de cultivo; atualmente, a maior parte da área com soja, trigo e milho no estado do RS é cultivada no sistema plantio direto. Além disso, a amostragem de solo é feita na camada de solo de maior concentração de P e atualmente as culturas têm um potencial de rendimento maior, necessitando de maiores quantidades de nutrientes para seu crescimento e exportação.

No sistema plantio direto, observa-se a maior concentração superficial de nutrientes, entre eles o P (Eltz et al., 1989; Schlindwein & Anghinoni, 2000) e o aumento da matéria orgânica (Eltz et al., 1989; Schlindwein & Anghinoni, 2000; Bayer et al., 2009); com a manutenção do resíduo das culturas na superfície, diminuem as perdas de solo e nutrientes por erosão (Bertol et al., 1997; Seganfredo et al., 1997; Cassol et al., 2007) possibilitando um melhor aproveitamento dos fertilizantes aplicados.

A amostragem de solo sob preparo convencional é feita na camada até 20 cm de profundidade, enquanto que em solos sob plantio direto é feita na camada de 0-10 cm. Valores mais altos dos atributos de fertilidade são obtidos utilizando-se menor profundidade de amostragem do solo sob sistema plantio direto, onde ocorre maior concentração de P.

Em experimentos de longa duração estudados por Schlindwein & Anghinoni (2000), foi observado um aumento médio de aproximadamente 50% nos teores de P nas amostras de solo sob sistema plantio direto, coletadas na camada até 10 cm, em relação aos valores da camada até 20 cm sob preparo convencional, sugerindo um aumento no valor do teor crítico. Schlindwein & Gianello (2008) demonstraram que o teor crítico é maior na camada de 0-10 cm

em solos sob sistema plantio direto do que para a mesma camada ou na camada de 0-20 cm em preparo convencional.

Os rendimentos médios de trigo, soja e milho, em lavouras no estado do RS, aumentaram ao longo do tempo, possivelmente devido à utilização de variedades mais competitivas e/ou técnicas mais avançadas de produção. Sabe-se que as necessidades da cultura e a exportação de nutrientes também aumentaram, sugerindo a utilização de maiores doses de P para obter maiores rendimentos (máxima eficiência econômica). Assim, Schindwein (2003) demonstrou que não somente o teor crítico de P aumentou no solo, mas também as doses desses nutrientes. De acordo com isso, a CQFS (2004) recomendou aumentos nas doses de P, embora, dependendo do teor no solo, as quantidades recomendadas sejam menores do que as sugeridas por Schindwein (2003). Desta maneira, são necessários estudos em situações controladas, com amostras indeformadas de solo, projetados com o fim específico de avaliar a resposta das culturas à adubação fosfatada.

O método de análise de solo utilizado para avaliar o P disponível no solo para as plantas (Mehlich-1), nos estados do RS e de SC, não avalia a contribuição da fração orgânica de P para a nutrição das plantas, bem como o aumento da disponibilidade de P no solo pelo aumento do pH. Poder-se-ia, portanto, considerar estes parâmetros, juntamente com o teor de argila, para estimar (direta ou indiretamente) a contribuição de formas orgânicas de P e o aumento da disponibilidade deste nutriente no solo com o aumento do pH. A utilização desses fatores poderia otimizar o uso do P na agricultura, contribuindo para a manutenção das reservas mundiais de P e reduzindo sua transferência da agricultura para o ambiente aquático.

## **2.5. Grau de saturação de fósforo no solo e sua relação com aspectos agronômicos e ambientais**

Há poucos dados referentes à perda de P nas condições do Sul do Brasil; em alguns países é utilizado o critério de que o P pode ser removido por erosão, quando apresenta valores maiores que o teor crítico. Este critério poderia ser adotado nos estados do RS e de SC que possuem um sistema de recomendações de adubação estabelecido há décadas, e que tem sido constantemente atualizado e aprimorado. Porém, para aumentar a confiabilidade deste critério, há necessidade de mais estudos relacionando os teores de P no

solo determinados pelo método de análise (Mehlich-1) e as quantidades de P perdidas por erosão. Além disso, essa relação deve ser utilizada cuidadosamente para interpretar valores de análises de solo com objetivos ambientais, pois a calibração dos valores foi feita com o objetivo de obtenção de resposta das culturas ao P no solo, e não sobre a liberação de P do solo para o ambiente por escoamento superficial.

O grau de saturação de P no solo (GSP) foi apresentado na Holanda por Breeuwsna & Silva (1992) para avaliar o potencial de perda de P. O GSP é definido como a relação entre o P disponível determinado pelo método de análise de solo utilizado para recomendações de adubação e a fixação máxima de P no solo. O GSP é um indicador do potencial de perda de P, pressupondo-se que a saturação de P no solo é fortemente relacionada com a dessorção de P no solo, sendo que a dessorção aumenta com alto grau de saturação de P no solo (Sibbeson e Sharpley, 1997). Vários estudos têm relacionado o GSP com o P perdido por escoamento superficial (Sharpley, 1995; Pote et al., 1996; Pote et al., 1999; Sharpley et al., 2003). Para o GSP ser um índice ambiental adequado para estimar as perdas de P do solo para o ambiente, devem ser estabelecidas correlações com alto grau de associação deste e as formas de P mais suscetíveis às perdas por escoamento superficial (P particulado ou dissolvido). Diversos estudos têm demonstrado altas correlações entre o P dissolvido reativo em águas de escoamento superficial e o P extraível em água (Pote et al., 1996; Pote et al., 1999; Sharpley et al., 2008; Agin-Birikorang et al., 2008; Dougherty et al., 2004; Dougherty et al., 2008). Deste modo, o P extraível em água pode ser utilizado como um índice de forma de P no solo que é rapidamente perdido por escoamento superficial.

O GSP é obtido pela relação entre o valor de P determinado pelo método de extração de P do solo (Mehlich-1, Mehlich-3, resina, água, etc.) e a capacidade de adsorção de P no solo, obtida pela isoterma de adsorção de Langmuir (Hughes et al., 2000; Maguire & Sims, 2002). Os teores analíticos de P tem sido utilizados para estimar o risco de perda de P em países onde o "Phosphorus Index" (PI) é adotado; entretanto, a utilização do GSP apresenta maior segurança do que somente o resultado de análise de solo, pois considera a capacidade do solo em reter P, com base em resultados obtidos em estudos de correlação entre o GSP e o P dissolvido em águas superficiais entre diferentes tipos de solos (Sharpley et al., 2003; Ige et al., 2005). Sharpley et al. (1996)

obtiveram alto grau de correlação entre o P dissolvido por escoamento superficial e o P determinado pela solução de Mehlich-3 (0,72); esta solução, entretanto, aumentou com a utilização do GSP (0,86).

No Brasil, e no caso deste trabalho, conduzido no estado do RS, são escassas as informações sobre perdas de P e sua relação com o P do solo (determinado por Mehlich-1, resina, etc.), P dissolvido ou particulado na água. Desta maneira, o GSP poderia ser um índice importante para a estimativa do risco de perdas de P em solos do Sul do Brasil. Além disso, poderia ser incluído no sistema de recomendações de adubação, otimizando o manejo do P em áreas de risco, aumentando a eficiência do uso do P na agricultura e contribuindo para a manutenção das reservas globais de P, frente ao desafio de crescente demanda alimentar e produção de bioenergia (Ige et al., 2005; Sharpley et al., 2003; Kleinmann & Sharpley, 2002; Maguire & Sims, 2002).

## **2.6. Técnicas de determinação de fósforo em solos**

A solução de Mehlich-1 e a determinação do P extraído por colorimetria são as técnicas utilizadas para avaliação da disponibilidade de P para as plantas nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, e também em vários Estados brasileiros. No entanto, podem ser adotadas técnicas que determinam simultaneamente vários elementos com o objetivo de aumentar a eficiência dos laboratórios de análises de solos.

Em âmbito mundial, alguns laboratórios utilizam, a técnica de espectrometria de emissão ótica por plasma induzido (ICP) para a determinação simultânea de vários elementos. Esta técnica baseia-se na emissão ótica dos átomos excitados no plasma (8.000 a 10.000°C), possibilitando a determinação simultânea de vários elementos (Mallarino, 2003). A solução (contendo moléculas) é injetada no plasma, vaporizada instantaneamente, dissociada e ionizada; por essa técnica, portanto, podem ser determinadas outras formas de P em adição ao ortofosfato. Por essa razão, o teor de P determinado por ICP, algumas vezes, é de aproximadamente 50% maior em relação ao determinado por colorimetria. Algumas pesquisas indicam que o P adicional provém, principalmente, das formas orgânicas (Hylander et al. 1995; Eckert & Watson, 1996; Nathan et al 2002; Sikora et al. 2005).

Nos EUA, a utilização da técnica do ICP em laboratórios de análise de solo expandiu-se rapidamente a partir do início dos anos 90 (Munter, 1990). A

utilização da técnica do ICP para a determinação do teor de P é criticada porque os valores obtidos diferem entre os métodos, necessitando-se de alterações nas tabelas de interpretação dos teores de P no solo.

A utilização da técnica de ICP em laboratórios de análise de solo é recente no Brasil, devido ao alto custo de aquisição e manutenção do equipamento e pela escassez de trabalhos de pesquisa que mostrem a eficiência desta técnica em solos brasileiros, necessitando-se de estudos que comprovem a eficiência da técnica na interpretação e recomendação de P.

## 2.7 Referências bibliográficas

- AGBENIN, J.O.; TIESSSEN, H. Phosphorus transformations in a toposequence of Lithosols and Cambisols from semi-arid northeastern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v.62, n.4, p.345-362, 1994.
- AGYIN-BIRIKORANG, S.; O'CONNOR, G.A.; BRINTON, S.R. Evaluating phosphorus loss from a Florida Spodosol as affected by phosphorus-source application methods. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.37, n.3, p.1180-1189, 2008.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUMA, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular a carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.189-197, 2001.
- ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R.F. et al (ed). **Fertilidade do solo**. Viçosa : SBCS, 2007. p. 873-928, 2007.
- BAYER, C.; DIEKOW, J.; CARNEIRO, A.T.J.; ELTZ, F.F.L.; VIEIRA, F.C.B. Cover Crop Effects Increasing Carbon Storage in a Subtropical No-Till Sandy Acrisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.40, n.8, p.2094-2110, 2009.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; GIASSON, E.; MARTIN NETO, L.; PAVINATO, A. Tillage effects on particulate and mineral-associated organic matter in two tropical Brazilian soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.37, n.2, p.389-400, 2006.
- BERTOL, I.; COGO, N.P.; SCHICK, J.; GUADAGNIN, J.C.; AMARAL, A.J. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.133-142, 2007a.
- BERTOL, I.; ENGEL, F.L.; MAFRA, A.L.; BERTOL, O.J.; RITTER, S.R. Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water

and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, n.2, p.142-150, 2007b.

- BERTOL, I.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.3, p.409-418, 1997.
- BREEUWSNA, A.; SILVA, S. **Phosphorus fertilization and environmental effects in The Netherlands and the Po region (Italy)**. Wageningen, The Netherlands : Agric. Res. Dep. the Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil, and Water Research, 1992. Rep. 57.
- CARBALLO, A. **Atributos químicos do solo afetados por sistemas de preparos e culturas**. 93f. 2004. Dissertação (Mestrado) –Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- CASSOL, E.A.; DENARDIN, J.E.; KOCHANN, R.A. Sistema plantio direto: evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. **Tópicos Especiais em Ciência do Solo**, Viçosa, n.5, p. 333-370, 2007.
- CASTRO FILHO, C.; HENCLAIN, J.C.; VIEIRA, M.J.; CASÃO JR, R. Tillage methods and soil and water conservation in southern Brazil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.20, n.3, p.271-283, 1991.
- CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; ALBUQUERQUE, J.A.; WOBETO, C. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n.3, p.1055-1064, 2002.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 2. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1989. 128p.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1995. 224p.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: SBCS-Núcleo Regional Sul, 2004. 410p.
- CORDELL, D.; DRANGERT, J.A.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global environmental change**, The Netherlands, v.19, n.2, p.292-305, 2009.
- 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.314, p.197-214, 1995.

- DOUGHERTY, W.J.; NICHOLLS, P.J.; MILHAM, P.J.; HAVILAH, E.J.; LAWRIE, R.A. Phosphorus fertilizer and grazing management effects on phosphorus in runoff from dairy pastures. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.37, n.3, p.417-428, 2008.
- DOUGHERTY, W.J.; FLEMING, N.K.; COX, J.W.; CHITTLEBOROUGH, D.J. Phosphorus transfer in surface runoff from intensive pasture systems at various scales: a review. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.33, n.6, p.1973-1988, 2004.
- DRIVER, J. Phosphates recovery for recycling from sewage and animal waste. **Phosphorus and Potassium**, Roma, v.216, n.1, p. 17–21, 1998.
- ECKERT, D.J.; WATSON, M.E. Integrating the Mehlich-3 extractant into existing soil test interpretation schemes. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.27, n.6, p.:237-1249, 1996.
- ECOSANRES. **Closing the Loop on Phosphorus**. Stockholm : Stockholm Environment Institute (SEI), 2003. 489p.
- ELTZ, F.L.P.; PEIXOTO, R.T.G.; JASTER F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um latossolo bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, n.3, p.259-267, 1989.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro : CNP Solos, 1997. 212 p.
- EUROPEAN FERTILIZER MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Phosphorus: essential element for food production**. Brussels : European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA), 2000. 127p.
- FRANCHINI, J.C.; BORKERT, C.M.; FERREIRA, M.M.; GAUDÊNCIO, C.A. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.459-467, 2000.
- GATIBONI, L. C. ; KAMINSKI, João ; RHEINHEIMER, Danilo dos Santos ; FLORES, João Paulo Cassol . Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p. 691-699, 2007.
- GILLES, L.; COGO, N.P.; BISSANI, C.A.; BAGATINI, T. Perdas de solo, água, matéria orgânica e nutrientes por erosão na cultura do milho, implantada sobre campo nativo, em diferentes métodos de preparo do solo e tipos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 2009 (no prelo).
- GUERRA, J.G.M.; ALMEIDA, D.L.; SANTOS, G.A. Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.31, n.4, p.291-299, 1996.

- GUNTHER, F. **A solution to the heap problem:** the doubly balanced agriculture: integration with population. 2005. Available: <http://www.holon.se/folke/kurs/Distans/Ekofys/Recirk/Eng/balanced.shtml>.
- 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.
- HUGHES, S.B.; REYNOLDS, B.; BELL, S.A.; GARDNER, C. Simple phosphorus saturation index to estimate risk of dissolved phosphorus in runoff from arable soils. **Soil Use and Management**, London, v.16, n.2, p.206-210, 2000.
- HYLANDER, L.D.; SVENSSON, H.I. AND SIMAN, G. Comparison of different methods for determination of phosphorus in calcium chloride extracts for prediction of availability to plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.26, n5, p.913-925, 1995.
- IGE, D.V.; AKINREMI, A.A.; FLATEN, D.N. Environmental index for estimating the risk of phosphorus loss in calcareous soils of Manitoba. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.34, n.6, p.1944-1951, 2005.
- JASINSKI, S.M. **Phosphate Rock, Statistics and Information**. Washington : USGS, 2006. 148p.
- JASTROW, J.D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.28, n.3, p.665-676, 1996.
- KLEINMANN, P.J.A.; SHARPLEY, A.N. Estimating soil phosphorus sorption saturation from Mehlich-3 data. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.33, n.11, p.1825-1839, 2002.
- LAL, R.; LOGAN, T.J.; FAUSEY, N.R. Long-term tillage effects on a Mollic Ochraqualf in North-west Ohio. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.15, n.2, p.371-382, 1990.
- LEITE, P. B. ; ALVAREZ V., V. H. ; BARROS, N. F. ; NEVES, J. C. L. ; MARTINS, A.G. Níveis críticos de fósforo, para milho, em casa de vegetação, de acordo com a sua localização no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n.3, p.497-508, 2006.
- MAGUIRE, R.O.; SIMS, J.T. Measuring agronomic and environmental soil phosphorus saturation predicting phosphorus leaching with Mehlich-3. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, n.4, p.483-486, 2002.
- MALLARINO, A.P. Field calibration for corn of the Mehlich-3 soil phosphorus test with colorimetric and inductively coupled plasma emission spectroscopy determination methods. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, n.6, p.1928-1934, 2003.

- MIELNICZUK, J. Manejo do solo no Rio Grande do Sul: Uma síntese histórica. **Revista da Agronomia**, Porto Alegre, v.12, n.2, p.11-22, 1999.
- MUNTER, R.C. Advances in soil testing and plant analysis analytical technology. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.21, n.9, p.1831-1841, 1990.
- NATHAN, M.V.; MALLARINO, A.P.; ELIASON, R AND MILLER, R. ICP vs. colorimetric determination of Mehlich III extractable phosphorus. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.33, n.11, p.2432, 2002.
- NÚÑEZ, J.E.V.R.; SOBRINHO, N.M.B.A.; MAZUR, N. Conseqüências de diferentes sistemas de preparo do solo sobre distribuição química e perdas de fósforo de um Argissolo. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.1, p.101-109, 2003.
- POTE, D.H.; DANIEL, T.C.; SHARPLEY, A.N.; MOORE, P.A.; EDWARDS, D.R.; NICHOLS, DJ. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, n.5, p.855-859, 1996.
- POTE, D.H.; DANIEL, T.C.; SHARPLEY, A.N.; MOORE, P.A.; EDWARDS, D.R.; NICHOLS, DJ. Relationship between phosphorus levels in three Ultisols and phosphorus concentrations in runoff. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.28, n.1, p.170-175, 1999.
- RHEINHEIMER, D.S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 211f. 2000. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000.
- ROBERTS, T.L.; STEWART, J.W.B.; BETTANY, J.R. The influence of topography on the distribution of organic and inorganic soil phosphorus across a narrow environmental gradient. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.65, n.4, p.651-665, 1985.
- ROSMARIN, A. The precarious geopolitics of phosphorous, down to earth. **Science and Environment Fortnightly**, Roma, v.72, n.1, p.27-31, 2004.
- RUNGE-METZGER, A. **Closing the cycle**: obstacles to efficient p management for improved global food security. SCOPE 54 – Phosphorus in the Global Environment – Transfers, Cycles and Management. Roma: FAO, 1995. 211p.
- SANCHES, P.A.; UEHARA, G. Management consideration for acid soil with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F.R.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: SSSA, 1980. p.471-514.
- SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S; TOM, G.O.; SPERA, S.T. Efeito de sistemas de produção mistos sob plantio direto sobre fertilidade do solo após oito anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.3, p.545-552, 2003.

- SCHLINDWEIN, J.A. **Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto**. 169f. 2003. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- SCHLINDWEIN, J.A.; ANGHINONI, I. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.5, p.611-617, 2000.
- SCHLINDWEIN, J.A.; GIANELLO, C. Necessidades de novos estudos de calibração e recomendações de fertilizantes para as culturas sob sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.79, n.1, p.12-15, 2004.
- SEGANFREDO, M.L.; ELTTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.287-291, 1997.
- SHARPLEY, A.N.; KLEIMANN, P.J.A.; HEATHWAITE, A.L. Phosphorus loss from an agricultural watershed as a function of storm size. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.37, n.2, p.362-368, 2008.
- SHARPLEY, AN; HERRON, S; DANIEL, T. Phosphorus-based management challenges and strategies for poultry farming. **Journal of Soil and Water Conservation**, Madison, v.62, n.6, 150-158. 2007.
- SHARPLEY, A.N.; WITHERS, P.; ABDALLA, C.; DODD, A. Strategies for the sustainable management of phosphorus. Chapter VI-5. In: SIMS, J.T.; SHARPLEY, A. N. (Eds). **Phosphorus: Agriculture and the Environment**. Madison : American Society of Agronomy, 2005. p. 1069-1070. Special Publication
- SHARPLEY, A.N.; WELD, J.L.; BEEGLE, D.B.; KLEINMAN, P.J.A.; GBUREK, W.J.; MOORE, P.A., JR.; MULLINS, G. Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the U.S. **Journal of Soil and Water Conservation**, Madison, v.58, n.1, p.137- 52, 2003.
- SHARPLEY, A.N.; KLEINMAN, P.J.A; MCDOWELL, R. Innovative management of agricultural phosphorus to protect soil and water resources. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.32, n.12, p.1071-1100, 2001.
- SHARPLEY, A.N.; TUNNEY, H. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges in the 21st century. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.29, n.1, p.176-181, 2000.
- SHARPLEY, A.N.; DANIEL, T.C.; SIMS, J.T.; POTE, D.H. Determining environmentally sound soil phosphorus levels. **Journal of Soil and Water Conservation**, Madison, v.51, n.1, p.160-166, 1996.
- SHARPLEY, A.N. Dependence of runoff P on extractable soil P. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.24, n.4, p.920-926, 1995.

- SHARPLEY, A.N.; MENZEL, R.G. The impact of soil and fertilizer phosphorus on the environment. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.41, p.297-324, 1987.
- SIKORA, F.J.; HOWE, P.S.; HILL, L.E.; REID, D.C.; HAROVER, D.E. Comparison of colorimetric and ICP determination of phosphorus in Mehlich3 soil extracts. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.36, n.5, p.875-887, 2005.
- SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. Teores de nutrientes e de matéria orgânica afetados pela rotação de culturas e sistema de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.387-394, 2001.
- SIQUEIRA, O. J. W. de ; SCHERER, E. E. ; TASSINARI, G. ; ANGHINONI, I. ; PATELLA, J. F. ; TEDESCO, M. J. ; MILAN, P. A. ; ERNANI, P. R. . **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo : / SBCS. Núcleo Regional Sul, 1987. 100 p.
- SIX, J.; ELLIOT, M. E.T.; PAUSTIAN, K. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n.5, p.1367-1377, 1998.
- SMECK, N.E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. **Geoderma**, Amsterdam, v.36, n.3, p.185-199, 1985.
- SMIL, V. **Feeding the World: A Challenge for the 21st Century**. Cambridge : The MIT Press, 2000a. 412p.
- SMIL, V. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. **Annual Review Entire Environment**, Amsterdam, v.25, n.1, 53-88, 2000b.
- STEEN, I. Phosphorus availability in the 21st Century: management of a nonrenewable resource. **Phosphorus and Potassium**, Roma, v.217, n.1, 25-31, 1998.
- TIESSEN, H.; STEWART, W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.48, n.4, p.853-858, 1984.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Soil Science**. London, v. 33, n.1, 141-163, 1982.
- WALKER, T.W.; SYERS, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, Amsterdam, v.15, n.1, p.1-19, 1976.
- WRIGHT, A.L.; HONS, F.M. Tillage impacts on soil aggregation and carbon and nitrogen sequestration under wheat cropping sequences. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.84, n.1, p.67-75, 2005.

WRIGHT, A.L. Phosphorus sequestration in soil aggregates after long-term tillage and cropping. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.103, n.2, p.406-411, 2009.

WUNSCHE, W.A. ; DENARDIN, J.E. **Conservação e manejo dos solos: I.** Planalto Rio-Grandense, considerações gerais. Passo Fundo, RS : EMBRAPA-CNPT, 1980. 20p. (Circular Técnica 2).

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLO SOB PLANTIO DIRETO PARA ESTUDO EM CONDIÇÕES CONTROLADAS**

### 3.1 INTRODUÇÃO

A avaliação da fertilidade do solo pode ser feita por vários métodos, dentre eles os testes com plantas a campo ou em vasos. Os testes com plantas cultivadas em vasos, conduzidos em casas-de-vegetação, podem ser utilizados para diversos estudos (comparação de fontes de nutrientes, relações solo-planta, estudos de nutrição de plantas, comparações de métodos de análises de solo, dentre outros) (Bissani et al. 2008). Além disso, permite o estudo simultâneo de um grande número de solos, conduzidos em qualquer época do ano, com reduzido tempo de duração (semana ou meses), e a baixo custo.

O modo de condução desses experimentos representa bem o sistema convencional de cultivo, pois o solo coletado é desagregado, passado em peneira (aproximadamente 5 mm de abertura) e posteriormente colocado nos vasos. No entanto, esse procedimento dificulta os estudos em vasos com amostras de solos sob sistema plantio direto, pois o revolvimento do solo para o acondicionamento do mesmo nos vasos altera as suas características físicas (estrutura, porosidade, densidade, agregação, dentre outras) (Hillel, 1982). Além disso, alteram a distribuição dos nutrientes, especialmente o carbono e o fósforo que se acumulam na superfície do solo nesse sistema, formando um gradiente de concentração (Anghinoni, 2007, Gatiboni et al., 2007). Nesse caso, avaliações conduzidas em solos sob plantio direto, em vasos, devem preservar ao máximo as condições físicas originais, destacando a importância de coletas de amostras com estrutura indeformada representativas destas condições.

Dentre os diversos indicadores do estado físico do solo, principalmente de compactação, os mais utilizados são a densidade e a resistência mecânica à penetração (Raper, 2005). Reichert et al. (2003), Reichert et al. (2009) definiram limites críticos de densidade do solo de acordo com

classes texturais, e dessa forma seria possível inferir sobre o estado de compactação do solo a partir dos valores críticos de densidade do solo. O método padrão para quantificação da densidade do solo, que envolve a coleta de amostras indeformadas por anéis volumétricos (Embrapa, 1997), é trabalhoso, demorado e destrutivo.

Há vários trabalhos publicados na literatura, com estudos em vasos, utilizando solo sob sistema plantio direto, porém os que utilizaram amostras indeformadas não especificaram qual o critério adotado para defini-las como tal (Gatiboni et al., 2007; Rheinheimer et al., 2007; Leite et al., 2006; Pavinato & Rosolem, 2008; Diekow et al., 2006; Schlindwein et al. 2003). O objetivo do presente trabalho foi propor um equipamento de obtenção de amostras indeformadas, de solos sob sistema plantio direto, para estudos em vasos conduzidos sob condições controladas, e a validação do mesmo pela comparação de alguns atributos físicos do solo nas amostras obtidas e no local de coleta.

### 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido inicialmente no Laboratório de Análises de Solo da UFRGS, na elaboração de um equipamento de coleta de amostras indeformadas de solo. O amostrador foi feito em forma cilíndrica, em aço inoxidável, com as dimensões de 208 mm de diâmetro externo, 300 mm de comprimento e 4 mm de espessura, tendo 200 mm de diâmetro interno para acoplar um tubo de PVC de 200 mm de diâmetro (Figura 1). A borda inferior do amostrador foi acabada em formato de bisel, com espessura menor do que um milímetro e afiada para facilitar a penetração no solo. Na borda inferior em bisel, com tamanho de 50 mm, foi feita uma sobreposição interna com espessura de 2 mm, para suportar um cilindro de PVC de mesma espessura. Um cilindro de PVC com as dimensões de 200 mm de diâmetro externo, 250 mm de profundidade e 2 mm de espessura foi acoplado dentro do cilindro, de forma que a parte inferior do PVC ficasse apoiada na sobreposição. Desta maneira se tem a uniformidade entre parede interna do bisel e parede interna do PVC, permitindo a penetração contínua no solo.

Para avaliação da metodologia, foram selecionadas áreas conduzidas em sistema plantio direto, no estado do Rio Grande do Sul, com mais de 15 anos de adoção, em solos com diferentes teores de argila, num total de quatro locais, sendo: um Argissolo Vermelho Distrófico típico (Pvd) localizado na Estação Experimental Agronômica da UFRGS (Lat. S 30°05'42" e Long. O 51°40'32"), em Eldorado do Sul; um Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd2) localizado em área de produção (Lat. S 28°44'17" e Long. O 53°41'54") em Cruz Alta; um Latossolo Vermelho Distroférico típico (LVdf2) localizado em área de produção (Lat. S 28°19'55" e Long. O 53°55'54") em Ijuí; e um Latossolo Vermelho Distroférico típico (LVdf2) localizado em área de produção em São Miguel das Missões (Lat. S 28°55'53" e Long. O 54°20'47"). Algumas características físicas e químicas avaliadas nos solos amostrados são dadas no Tabela 3.1.

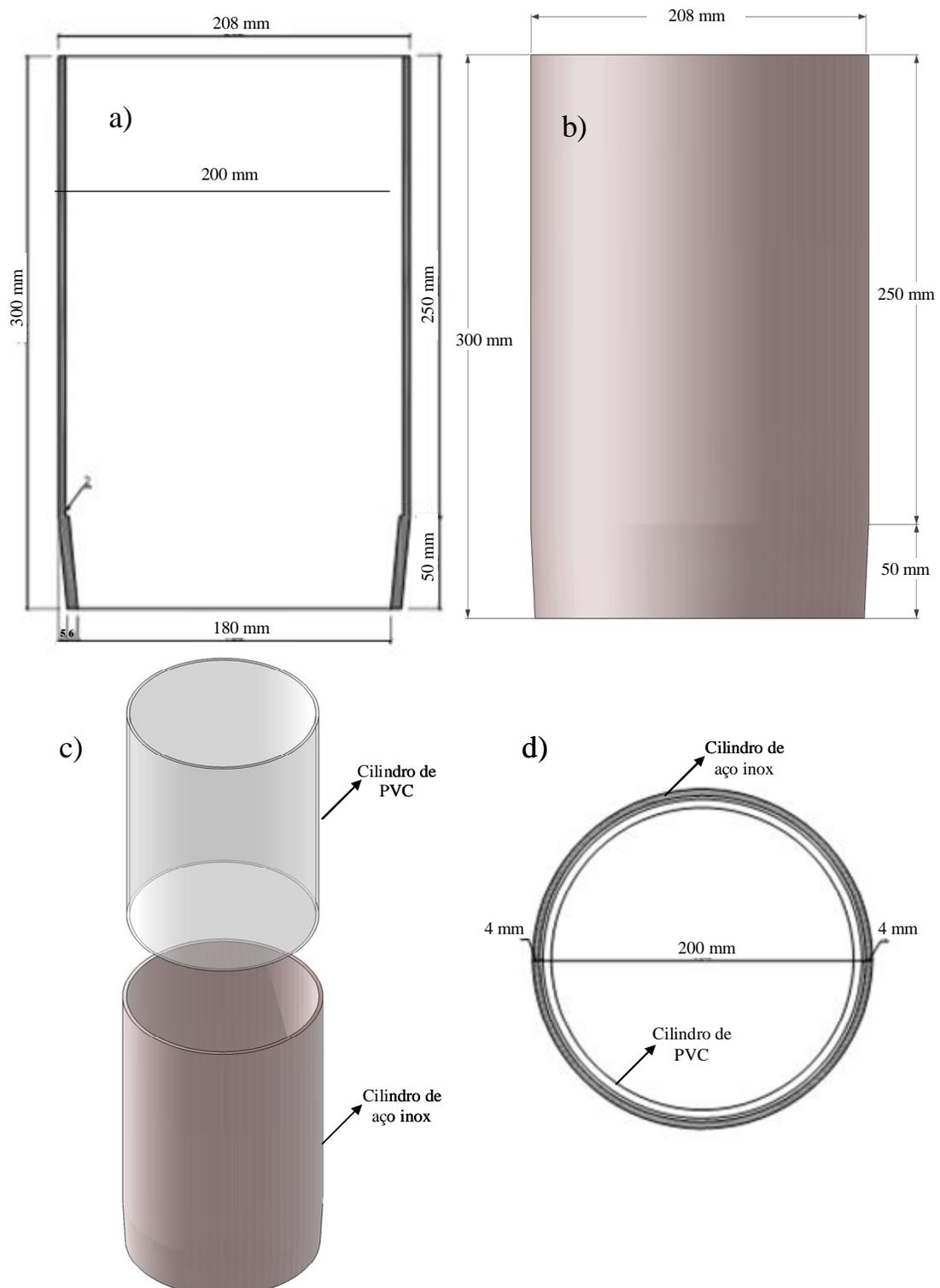


Figura 3.1. Detalhe do amostrador: corte frontal (a); vista frontal (b); projeção amostrador e PVC (c); e vista superior (d)

Tabela 3.1. Atributos físicos e químicos dos solos utilizados no estudo, na profundidade de zero – 20 cm.

Atributos <sup>1</sup>	Solos			
	PVd	LVd2	LVdf2	LVdf2
	Municípios de coleta			
	Eldorado do Sul	Cruz Alta	São Miguel das Missões	Ijuí
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	530	640	190	100
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	270	280	270	190
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	200	360	540	710
COT (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	21	25	23	30
pH em água	5,2	5,3	5,2	5,5

<sup>1</sup> Conforme Tedesco et al. (1995); <sup>2</sup> Carbono orgânico total

O amostrador foi introduzido no solo por um sistema de levante hidráulico manual (macaco hidráulico tipo garrafa com capacidade de 16 t). Na extremidade superior do cilindro foi colocada uma tampa de aço com diâmetro de 250 mm e com espessura de 10 mm. O sistema de levante hidráulico manual foi acoplado sobre a tampa do amostrador. Como contrapeso, maior que a resistência do solo, foi utilizado um trator agrícola. O sistema de levante hidráulico manual foi acionado e como o peso do trator é maior que a resistência do solo, o amostrador foi então, introduzido no solo por pressão lenta e contínua, sem impacto. Previamente, foi passado óleo mineral na parte externa do amostrador, com a finalidade de reduzir o atrito entre o solo e o amostrador. O óleo mineral não entrou em contato com o solo dentro do tubo de PVC; foi um procedimento adotado para facilitar a introdução do cilindro, principalmente em solos com altos teores de argila e de umidade.

Foram introduzidos dois amostradores simultaneamente no solo, utilizando-se dois macacos hidráulicos, um para cada amostrador. Após a introdução completa dos mesmos, foi determinada a resistência do solo à penetração (índice de cone) dentro de um dos amostradores e na área adjacente ao mesmo, na profundidade de zero a 20 cm, com um penetrômetro eletrônico com configurações de acordo com as normas contidas na ASAE (2004). A introdução completa do cilindro foi definida quando a extremidade superior do amostrador ficasse aproximadamente a 1 cm do nível do solo. Deste modo, evitou-se a compactação da camada superficial pelo contato com a tampa de suporte do sistema de levante hidráulico manual. No outro amostrador, a amostra foi mantida indeformada para a determinação da densidade. Após essa avaliação, o amostrador foi retirado do solo pelo sistema de levante hidráulico do trator

agrícola. A retirada do amostrador foi feita acoplado-se uma corrente nos braços do levante hidráulico. Essa corrente, por sua vez, foi acoplada em outra corrente colocada na parte externa do amostrador, fixadas no mesmo por meio de um encaixe circular de aço de 10 mm em duas extremidades do amostrador. A corrente do amostrador possui ajuste de tamanho para acoplar o mesmo em diferentes modelos de tratores agrícolas (altura de trabalho, ajustes de largura, etc.). A retirada do amostrador foi feita pelo acionamento do sistema hidráulico do trator (levante de três pontos ou equipamento de levante acoplado ao sistema de comando hidráulico), de forma lenta e contínua. Após, foi feita a retirada do tubo de PVC do amostrador, removendo o excesso de solo da extremidade inferior (50 mm), utilizando-se uma faca. O tubo de PVC foi removido manualmente do amostrador, deslocando-se a parte inferior no sentido da superior. Após a retirada do tubo de PVC, o solo restante na extremidade inferior foi removido com faca, mantendo-se como nível a extremidade inferior do tubo de PVC. Na extremidade superior não é necessário ajuste no volume de solo, pois a introdução no solo é realizada até restar aproximadamente 1cm de distância da extremidade superior do cilindro. Para evitar perda de solo na extremidade inferior, foi colocada uma tela de nylon de abertura  $< 0,3$  mm, fixada com atilho de borracha. Durante todo esse processo, foi mantido um ângulo de aproximadamente  $30^\circ$  na mobilização do amostrador/PVC para evitar que a superfície do solo fosse mobilizada.

Foram também coletadas amostras indeformadas de solo pelo método do anel volumétrico (Embrapa, 1997) nas profundidades de zero a 5,0, 5,0 a 10,0, 10,0 a 15,0 e 15,0 a 20,0 cm na área adjacente de onde o amostrador foi retirado. Foram evitadas nesse caso áreas com tráfego do rodado do trator, bem como as desestruturadas por ocasião da retirada do sistema. No Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da UFRGS, foi determinada a densidade do solo nas amostras coletadas com o amostrador, em cada local, pelo método do anel volumétrico, conforme recomendações Embrapa (1997), nas mesmas profundidades avaliadas no campo, bem como o teor de umidade em cada profundidade de amostragem. Para cada local foram feitas quatro repetições de cada avaliação (densidade do solo e resistência do solo à penetração).

A análise estatística dos dados foi feita com o teste t para comparação de médias pareadas, ao nível de significância de 1% de probabilidade.

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de resistência do solo à penetração, expressa em kPa (índice de cone), e a densidade do solo, em cada classe de solo e em cada profundidade, obtidos no solo e no amostrador são mostrados nas Tabelas 3.2 e 3.3. A comparação foi feita em cada solo, na mesma profundidade dos valores médios obtidos das análises físicas no solo e no amostrador proposto.

Não foram obtidas diferenças estatísticas significativas nos valores de resistência do solo à penetração, independentemente do tipo de solo e profundidade de amostragem (Tabela 3.2). A compactação do solo reduz o índice de vazios (relação volume de vazios/volume de sólidos) pela reorganização das partículas do solo, quando submetido a uma força de compressão (Costa et al., 2003). A introdução do amostrador no solo não causou compactação do solo, possivelmente pelo modo de introdução do mesmo ser por pressão lenta e contínua, sem impacto. Alterações na estrutura física das amostras podem ocorrer próximo da parede do cilindro devido à acomodação nas partículas de solo e a entrada do amostrador no perfil do solo.

Tabela 3.2. Índice de cone obtido em quatro classes de solo, em duas condições de amostragem para cada solo, calculado em intervalos de 5 cm até 20 cm de profundidade.

Profundidade	Classe de solo							
	PVd		LVdf2		LVdf2		LVdf2	
(cm)	A <sup>1</sup>	S	A	S	A	S	A	S
	----- Índice de cone (kPa) -----							
0-5	1393	1391	1478	1429	516	605	1699	1802
5-10	2040	1600	1923	1746	1199	1334	2634	2597
10-15	2175	1655	1965	1989	1856	1629	2194	2335
15-20	2079	1901	2048	2088	1946	1783	2220	2381
<i>Média</i>	1922	1639	1853	1823	1379	1338	2187	2279
CV (%)	20	14	13	17	23	24	7	4
Ug (kg kg <sup>-1</sup> )	0,13	0,13	0,23	0,21	0,27	0,29	0,21	0,22

<sup>1</sup> A – amostrador e S – solo.

Tabela 3.3. Densidade do solo obtida em quatro classes de solo, em duas condições de amostragem para cada solo, em intervalos de 5 cm até 20 cm de profundidade.

Profundidade	Classe de solo							
	PVd		LVd2		LVdf2		LVdf2	
(cm)	A <sup>1</sup>	S	A	S	A	S	A	S
	Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )							
0-5	1,41	1,51	1,48	1,54	1,18	1,15	1,27	1,32
5-10	1,50	1,57	1,47	1,55	1,28	1,27	1,41	1,42
10-15	1,53	1,62	1,50	1,50	1,32	1,25	1,42	1,43
15-20	1,55	1,63	1,50	1,51	1,30	1,24	1,42	1,44
<i>Média</i>	<i>1,50</i>	<i>1,58</i>	<i>1,49</i>	<i>1,53</i>	<i>1,27</i>	<i>1,23</i>	<i>1,38</i>	<i>1,40</i>
CV (%)	4	4	5	3	8	6	5	4
Ug (kg kg <sup>-1</sup> )	0,13	0,13	0,23	0,21	0,27	0,29	0,21	0,22

<sup>1</sup> A – amostrador e S – solo.

A mesma tendência foi observada para todos os solos, independentemente da classe textural. Desse modo, a metodologia de obtenção de amostras indeformadas com uso do equipamento proposto em áreas sob plantio direto pode ser utilizada em solos com diferentes classes texturais. A introdução do amostrador no solo por impacto, possivelmente favoreceria a desestruturação do solo, o rearranjo das partículas de solo, modificando os valores de resistência do solo à penetração e densidade.

Não foram observadas diferenças estatísticas significativas nos valores de densidade do solo nas condições estudadas (Tabela 3.3). O rearranjo das partículas do solo pela acomodação natural de partículas e pelo tráfego contínuo de máquinas e implementos na superfície do solo ou pelo impacto direto, resulta em aumento da densidade do solo e modificações no sistema poroso (Hillel, 1982; Costa et al., 2003), bem como em aumento na resistência do solo à penetração (Costa et al., 2003). A introdução do equipamento no solo não modifica os valores de densidade do solo, independentemente da classe textural.

Quanto à obtenção de amostras por meio do amostrador proposto notou-se boa eficiência e agilidade no processo, com poucos eventos de descarte de amostras por problemas. Um dos maiores cuidados na utilização é com relação à introdução do cilindro metálico, que deve permanecer exatamente na posição vertical a fim de evitar inclinações durante penetração no solo, que se acaso ocorrer tornará necessário reiniciar o processo. Devido à boa resistência do metal e a borda em bisel não foram observados problemas quanto à presença de raízes na coleta em áreas agrícolas. Possivelmente seria uma limitação para uso em coletas onde houvesse vegetação arbustiva ou florestas, em que o diâmetro das raízes é maior. O mesmo impedimento pode ocorrer em solos com

textura grosseira, com presença de cascalho e calhaus ou então rochas, onde estas poderiam ser um entrave à introdução do cilindro no perfil, ou então danificando a borda em bisel e causando desvio no ângulo de introdução. Em solo com elevado teor de argila, e principalmente se ocorrer a presença de argilominerais expansíveis, na condição de umidade elevada do solo, a obtenção de amostras pode ser dificultada ou até impedida pela adesão solo-metal. Recomenda-se a coleta quando o teor de água no solo abaixo do limite inferior de plasticidade, para permitir boas condições de trabalho.

Neste estudo avaliou-se a eficácia do amostrador na obtenção de amostras indeformadas em sistema plantio direto justamente pela dificuldade de simular as condições de estrutura de solo encontradas a campo, mas isso não restringe sua aplicação somente para essas situações. Seu uso para amostragem em sistemas convencional de preparo de solo é possível e provavelmente o processo seja mais ágil devido à menor resistência a introdução no perfil do solo. Neste caso apresentaria a vantagem de manter a estrutura em termos de não misturar camadas de solo de interesse, podendo as amostras ser dispostas para cultivo assim como são obtidas no campo. Como não foi avaliado nessas condições, são necessários estudos de adequação de uso ou ao menos comprovar se esta técnica é mais eficiente em termos de agilidade na amostragem, visto que a integridade estrutural das amostras, nesse caso, é menos relevante.

O uso de amostras indeformadas de solos sob sistema plantio direto permite a avaliação controlada de diversos tipos de estudo na área da Ciência do Solo. Pode ser estudada a dinâmica de nutrientes e água em solos sob esse sistema, comparação de fontes de nutrientes, degradação de resíduos mantidos em superfície, adição de resíduos orgânicos ou de outra natureza, avaliar o impacto dos mesmos no solo, estudos de mobilidade de nutrientes, poluentes e elementos tóxicos no solo. Embora os estudos dessa natureza sejam de caráter exploratório, são de grande relevância pesquisas em condições controladas, para posterior aplicabilidade a campo. Além disso, é um tipo de estudo que pode ser executado simultaneamente com vários tipos de solos, conduzido em qualquer época do ano a um custo relativamente baixo, o que proporciona agilidade na condução de experimentos.

### **3.4 CONCLUSÕES**

O equipamento apresentado é eficiente para a obtenção de amostras indeformadas de solos, não tendo alterado a densidade e a resistência do solo à penetração em sistema plantio direto, podendo ser usado para estudos em condições controladas.

### 3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R.F. et al (ed). **Fertilidade do solo**. Viçosa : SBCS, 2007. p. 873-928.
- ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Soil Cone Penetrometer** –ASAE S313.3. Saint Joseph, 2004. 124 p.
- BISSANI, C.A.; CAMARGO, F. A. O.; GAINELLO, C.; TEDESCO, M. J. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 344 p.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.3, p.:527-535, 2003.
- DIECKOW, J.; MEURER, E.J.; SALET, R.L. Nitrogen application timing and soil inorganic nitrogen dynamics under no-till oat/maize sequential cropping. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.4, p.707-714, 2006.
- EMBRAPA. **Manual de métodos e análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.
- GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; FLORES, J.P.C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.4, p.691-699, 2007.
- HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1982. 364 p.
- LEITE, P. B. ; ALVAREZ V., V. H. ; BARROS, N. F. ; NEVES, J. C. L.; MARTINS, A.G. Níveis críticos de fósforo, para milho, em casa de vegetação, de acordo com a sua localização no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.3, p.497-508, 2006.
- PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. . **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.5, p.911-920, 2008.

- RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, London, v.42, n.2, p.259-280, 2005.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J.A. Manejo, qualidade do solo e sustentabilidade: condições físicas do solo agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003. **Anais...** Ribeirão Preto, 2003. CD-ROM.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L. E. A.S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.102, n.2, p.242–254, 2009.
- RHEINHEIMER, D.S.; ALVAREZ, J.R.; OSÓRIO FILHO, B.; SOUSA, L.S. Resposta à aplicação e recuperação de enxofre em cultivos de casa-de-vegetação em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica. **Ciência Rural**, Santa, Maria, v.37, n.3, p.363-371, 2007.
- SCHLINDWEIN, J.A.; NOLLA, A.; ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. Redução da toxidez de alumínio em raízes de soja por culturas antecessoras no Plantio Direto. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.9, n.2, p.85-88, 2003.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5).

### **CAPÍTULO III**

## **RESPOSTA DAS CULTURAS À ADIÇÃO DE SUPERFOSFATO TRIPLO E O RISCO DE PERDAS DE FÓSFORO EM SOLOS COM DIFERENTES HISTÓRICOS DE USO E MANEJO**

#### 4.1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é o nutriente que atualmente representa o maior custo no programa de adubação para as culturas. Além disso, as reservas fosfáticas poderão suprir as necessidades de P para as culturas somente por aproximadamente 100 anos (Cordell et al., 2009). Dos vários estudos que relatam a problemática do P como recurso finito, alguns destacam que uma das formas de controlar ou reduzir o consumo de P será o aumento do preço do produto, tanto da matéria prima quanto dos fertilizantes comerciais. Deste modo, práticas agronômicas visando ao melhor aproveitamento do P do solo ou do adicionado por fertilizantes, minerais ou orgânicos, serão necessárias para aumentar a eficiência do uso do P na agricultura.

Lavouras conduzidas em sistemas conservacionistas de manejo do solo, como o plantio direto, ocupam aproximadamente quatro milhões de hectares no estado do Rio Grande do Sul, principalmente para a produção de grãos (Cassol et al., 2007). Nesse sistema, o aporte de resíduos na superfície do solo, e a redução na mobilização do solo pelo preparo, produzem mudanças na ciclagem e transformações dos nutrientes no solo (Hedley et al., 1982), tendo, por consequência, acúmulo de P nas camadas superficiais do solo, dependendo do histórico de uso e do manejo. O acúmulo de P na superfície do solo, no sistema plantio direto, requer alterações na profundidade de amostragem de solo, nas classes de interpretação e nos teores críticos de P para cada classe, bem como alterações nas recomendações de adubação para as culturas.

As doses de fertilizantes fosfatados recomendadas pela CQFS (2004) são maiores do que as das recomendações anteriores de Siqueira et al. (1987) e Comissão... (1989; 1995). No entanto, as faixas de teores de nutrientes e seus respectivos teores críticos, embora tenham sido ajustados, são os mesmos

dessas recomendações. Schlindwein (2003) e Schlindwein & Gianello (2004) criticaram os valores de teores críticos utilizados pela CQFS (2004), e por consequência as faixas de interpretação dos teores de P, por ter sido a calibração feita no sistema convencional de cultivo. No entanto, atualmente, a maior parte das lavouras de soja, trigo e milho no estado do RS é cultivada no sistema plantio direto. Além disso, a amostragem de solo é feita na camada de solo com maior concentração de P (0-10 cm), e atualmente as culturas têm um potencial de rendimento maior, necessitando de maiores quantidades de nutrientes para seu crescimento e exportação.

Há relatos de produtores, consultores agrônômicos, responsáveis técnicos de Cooperativas e Fundações de Pesquisa, no estado do RS, de que há resposta econômica da aplicação de P em doses maiores das recomendadas pelo Manual de Adubação para os estados do RS e de SC. Os mesmos consideram baixo o valor do teor crítico de P estabelecido no Manual de Adubação. No entanto, o aumento das doses de P nas condições de solo e clima do estado do RS, especialmente em relação ao relevo, pode proporcionar, além de perdas econômicas, danos ambientais pelo transporte do P, via escoamento superficial, para os mananciais de água, favorecendo o processo de eutrofização. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta das culturas ao P.

## 4.2. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi efetuado em experimentos realizados em duas etapas, uma a campo e outra em condições controladas, utilizando-se áreas com diferentes históricos de uso e manejo. Foram selecionadas três áreas, com diferentes históricos de uso e manejo, situadas em importantes regiões de produção de grãos do estado do RS, localizadas nos municípios de Ijuí, Cruz Alta e Vacaria. A descrição detalhada das áreas será apresentada a seguir.

### 4.2.1. Histórico de uso e manejo do solo das áreas experimentais

#### 4.2.1.1. Ijuí

A área originalmente coberta por mata nativa, sob Latossolo Vermelho Distroférico típico (LVdf2), foi inicialmente cultivada em 1900 com mão-de-obra familiar, utilizando-se práticas agrícolas nos moldes europeus. Ocorreu um período de agricultura colonial (entre 1900 e 1970) com preparo de solo por tração animal, criação de animais e cultivos de milho, trigo, feijão, lentilha, mandioca e soja (a partir de 1956), entre outras espécies para subsistência, sendo o cultivo dependente da fertilidade natural do solo. Na década de 1970, iniciou o período de agricultura mecanizada com preparo convencional (PC) do solo com aração e gradagem, aplicação de fertilizantes minerais, sucessão de cultivos de trigo e soja, além da queima da palha do trigo, com grande degradação física do solo. A partir de 1987 foram adotadas práticas conservacionistas de manejo do solo, utilizando preparo reduzido (PR), com escarificador e grade, sem queima da palha do trigo, inserindo-se a cultura da aveia em rotação com o trigo. Em 1995 foi iniciado o plantio direto (PD), mantido até os dias atuais. A correção da acidez é feita a cada três anos, com aplicação superficial de  $2,0 \text{ t ha}^{-1}$  de calcário. A aplicação de fertilizantes é feita na linha de semeadura. Nessa área são utilizadas práticas conservacionistas, como terraços e cultivo em contorno.

#### 4.2.1.2. Cruz Alta

A área foi iniciada com agricultura em 1945 a partir de campo nativo, sob Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd2), no sistema convencional de cultivo. Em 1970 foi convertido para pastagem e criação de gado de corte, e em 1989 foi iniciado o sistema plantio direto com rotação de culturas sendo soja e milho no verão e aveia+ervilhaca, nabo+tremoço e trigo no inverno. A correção da acidez é feita a cada 5 anos, superficialmente, na dose de 2,0 t de calcário  $\text{ha}^{-1}$ . A aplicação de fertilizantes é feita na linha de semeadura. Nas gramíneas são utilizados em média  $180 \text{ kg}^{-1}\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$  de N. Nessa área é utilizado somente o cultivo em contorno como prática conservacionista de suporte.

#### 4.2.1.3. Vacaria

O campo nativo, sob Latossolo Bruno Aluminoférrico típico (LBaf), foi utilizado para a criação de gado de corte desde 1930. A área começou a ser cultivada em 1991. Foi feita uma aração, duas gradagens, sem aplicação de calcário no início do uso agrícola. A partir dessa data o solo não foi mais revolvido e a aplicação de fertilizantes é feita na linha de semeadura. A correção da acidez é feita a cada cinco anos, com aplicação superficial de calcário na dose de  $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ . Nessa área é feita rotação de culturas sendo cultivados soja e milho no verão e aveia+ervilhaca e trigo no inverno. Nas gramíneas são utilizados em média  $180 \text{ kg}^{-1}\text{ha}^{-1}\text{ano}$  de N. São utilizadas práticas conservacionistas, como terraceamento e cultivo em contorno.

#### 4.2.2. Experimentos de campo

O experimento foi instalado em parcelas de campo com dimensões diferentes para cada local, dependendo do tipo de semeadora e colhedora utilizadas e disponibilidade de área. Além disso, as doses de P aplicadas foram diferentes entre os locais, conforme a capacidade de distribuição de fertilizante das semeadoras. Em todos os locais o P foi aplicado somente uma vez não sendo aplicado nos cultivos subsequentes. Os resultados das análises dos solos das áreas, coletadas antes da instalação do experimento são dadas na Tabela 4.1, nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm de profundidade.

Tabela 4.1. Caracterização físico-química<sup>1</sup> dos solos das áreas utilizadas.

Profundidade	DS	Argila	P disp	K disp	MO	Ca troc	Mg troc	Al troc	CTC pH 7,0	pH água	Índice SMP
cm	g cm <sup>-3</sup>	g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	g dm <sup>-3</sup>	-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----	-----	-----	-----
						LVdf2					
0-10	1,27	670	3,9	157	33	6,4	2,6	0,2	15,7	5,2	5,9
10-20	1,31	740	1,8	37	21	5,6	2,2	0,0	14,5	5,5	6,0
20-40	1,42	790	2,0	28	15	5,3	2,5	0,0	13,6	5,4	6,2
						LVdf					
0-10	1,52	640	5,0	76	40	4,7	2,3	0,4	15,9	5,1	5,7
10-20	1,44	670	1,0	25	31	4,8	2,5	0,0	13,8	5,5	6,1
20-40	1,39	740	0,8	21	26	3,2	1,9	0,0	11,0	5,4	5,9
						LBaf					
0-10	1,01	650	13	198	62	4,8	3,2	2,0	20,8	4,4	4,9
10-20	1,10	690	3,1	107	49	1,7	1,2	4,8	27,7	4,1	4,5
20-40	1,11	790	2,0	57	37	1,0	0,6	5,9	29,2	3,9	4,4

<sup>1</sup>Tedesco et al. (1995); argila, método do densímetro; P e K disponíveis extraídos pela solução de Mehlich-1; MO = matéria orgânica, por digestão úmida; Ca, Mg e Al trocáveis, extraíveis por KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; CTC a pH 7,0; pH em água (1:1); índice SMP. DS = densidade do solo, método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997)

Em Ijuí, foram utilizadas parcelas com 5,4 m de largura (12 linhas com espaçamento de 0,45 cm) por 50 m de comprimento. Foram aplicadas as doses de: 0, 30, 60, 120, 240, 450 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> na forma de superfosfato triplo, na linha de semeadura. Foram feitos três cultivos, sendo o primeiro de soja (safra 2007/2008), o segundo de trigo (2008) e o terceiro de soja (2008/2009); no entanto, o cultivo de trigo foi perdido devido ao excesso de chuva no período da colheita. Foi utilizada a cultivar de soja “branquinho” em ambos os cultivos, sendo as sementes tratadas com fungicida e inseticida e inoculadas com “Rhyzobium”. A adubação potássica foi feita conforme a recomendação com base na análise de solo, aplicando-se 75 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> por cultivo, na forma de cloreto de potássio, aplicado a lanço em superfície, após a semeadura da soja. A colheita da soja foi feita manualmente, colhendo-se 4 linhas centrais de 2 m de comprimento (área útil de 3,6 m<sup>2</sup>) com 4 repetições. Não foram utilizadas as áreas de 5 m de bordadura nas extremidades do comprimento das parcelas.

Em Cruz Alta, foram utilizadas parcelas com 2,8 m de largura (6 linhas com espaçamento de 0,47 cm) por 28 m de comprimento. Foram aplicadas as doses de: 0, 40, 60, 120, 170, 225 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> na forma de superfosfato triplo, na linha de semeadura. Foram feitos dois cultivos, sendo o primeiro de soja (safra 2007/2008), o segundo de trigo (2008). As sementes de soja (FUNDACEP 59 RR) foram tratadas com fungicida e inseticida e inoculadas com “Rhyzobium”. A adubação potássica foi feita conforme a

recomendação com base na análise de solo, aplicando-se  $110 \text{ kg de K}_2\text{O ha}^{-1}$  por cultivo, na forma de cloreto de potássio, a lanço em superfície, após a semeadura da soja. A colheita da soja foi feita por amostragem, colhendo-se 4 linhas centrais de 2 metros de comprimento (área útil de  $3,6 \text{ m}^2$ ) com 4 repetições. Foram descartadas as áreas de 3 m de bordadura nas extremidades do comprimento das parcelas. A cultivar de trigo utilizada foi a FUNDACEP RAÍZES, tratadas com fungicida e inseticida. A adubação com N foi de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , sendo 20 kg na semeadura,  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  no início do afilhamento e  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  no início do alongamento. A fonte de N utilizada foi uréia e as aplicações foram feitas a lanço em superfície. A adubação potássica foi feita conforme a recomendação com base na análise de solo, aplicando-se  $110 \text{ kg de K}_2\text{O ha}^{-1}$  por cultivo, na forma de cloreto de potássio, a lanço em superfície, após a semeadura do trigo. A colheita do trigo foi feita por amostragem, colhendo-se 4 linhas centrais de 2 m de comprimento (área útil de  $3,6 \text{ m}^2$ ) com 4 repetições. Não foram utilizadas as áreas de 3 m de bordadura nas extremidades do comprimento das parcelas.

Em Vacaria, foram utilizadas parcelas de 7,2 m de largura (16 linhas com espaçamento de 0,45 cm) por 100 m de comprimento. Foram aplicadas as doses de: 0, 28, 55, 110, 147 e  $276 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  na forma de superfosfato triplo, na linha de semeadura. Foi feito um cultivo de soja (safra 2007/2008). As sementes de soja (cultivar FUNDACEP 59 RR), foram tratadas com fungicida e inseticida e inoculadas com "Rhyzobium". A adubação potássica foi feita conforme a recomendação (CQFS, 2004), com base na análise de solo, aplicando-se  $60 \text{ kg de K}_2\text{O ha}^{-1}$  por cultivo, na forma de cloreto de potássio, aplicado a lanço em superfície, após a semeadura da soja. A colheita da soja foi feita com colhedora automotriz, colhendo-se 12 linhas centrais de 75 m de comprimento, com área útil de  $405 \text{ m}^2$ . Foram descartadas as áreas de 12,5 m de bordadura nas extremidades do comprimento das parcelas.

Além do rendimento das culturas, foi avaliado o teor de P nas folhas das plantas, coletadas na época do florescimento. Na cultura da soja, foi coletado o terceiro trifólio aberto a partir do ápice (30 folhas por parcela). No trigo, foi coletada a folha bandeira (30 folhas por parcela). O P nas folhas foi determinado no extrato sulfúrico por colorimetria (Tedesco et al., 1995).

Após a colheita da soja (safra 2007/2008), em todos locais (a aproximadamente 170 dias após a semeadura) foram coletadas amostras de

solos na profundidade de 0-10 cm. Foram determinados o P total ( $P_t$ ), o P orgânico total ( $P_o$ ) e o P inorgânico total ( $P_i$ ) (Kuo, 1996), e o P disponível extraído pelas soluções de Mehlich-1 ( $PM_1$ ) (Tedesco et al., 1995) e de Mehlich-3 ( $PM_3$ ) (Schlindwein & Gianello, 2008). Para avaliar o potencial de perda de P destes solos, foram determinados o P solúvel em água ( $P_a$ ) (Kuo, 1996) e o grau de saturação de P (GSP) (Ige et al., 2005). O GSP foi obtido pela relação  $GSP = (P \text{ extraível} / P \text{ máximo adsorvido}) \times 100$ , onde o P extraível foi o teor determinado pela solução de Mehlich-1 ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) e o P adsorvido foi determinado pela capacidade máxima de adsorção de P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (Volkweiss, 1973).

#### 4.2.3. Experimento em condições controladas

Foram coletadas 24 amostras indeformadas de solos nos mesmos locais do experimento a campo, em área próxima ao mesmo. As amostras foram coletadas conforme a metodologia descrita no Capítulo II, utilizando-se os vasos de PVC como unidades experimentais, com 4 repetições. Os resultados das análises de solo coletadas antes da instalação do experimento, nas profundidades de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15 e 15 a 20 cm de profundidade são dadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Caracterização físico-química<sup>1</sup> dos solos nas amostras indeformadas das áreas utilizadas.

Profundidade cm	DS g cm <sup>-3</sup>	Argila g dm <sup>-3</sup>	P disp mg dm <sup>-3</sup>	K disp mg dm <sup>-3</sup>	MO g dm <sup>-3</sup>	Ca troc ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Mg troc ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Al troc ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	CTC pH 7,0 -----	pH água	Índice SMP
----- LVdf2 -----											
0-5	1,08	650	8,0	290	36	5,5	2,7	0,3	16,1	5,3	5,9
5-10	1,15	670	4,8	131	25	5,1	2,5	0,2	15,1	5,2	5,6
10-15	1,27	750	2,6	68	30	5,3	4,0	0,3	14,9	5,4	5,9
15-20	1,39	790	2,4	43	18	5,3	2,6	0,3	13,1	5,5	6,0
----- LVd2 -----											
0-5	1,55	640	9,5	70	43	5,9	3,2	0,2	17,3	5,4	5,6
5-10	1,48	670	3,2	29	31	6,1	3,1	0,0	15,3	5,7	6,0
10-15	1,40	670	3,1	27	35	5,9	2,7	0,0	14,9	5,7	6,1
15-20	1,33	690	2,3	54	29	4,5	2,6	0,2	14,0	5,6	6,1
----- Lbaf -----											
0-5	1,01	640	9,7	252	71	6,0	5,1	0,1	22,4	5,6	5,8
5-10	1,06	670	4,2	127	56	4,0	3,4	1,2	21,0	4,9	5,3
10-15	1,19	750	3,0	72	51	2,0	1,9	3,6	25,7	4,8	5,0
15-20	1,11	790	3,1	69	48	1,3	1,4	4,8	27,3	4,4	4,8

<sup>1</sup>Tedesco et al. (1995); argila, método do densímetro; P e K disponíveis extraídos pela solução de Mehlich-1; MO = matéria orgânica, por digestão úmida; Ca, Mg e Al trocáveis, extraíveis por KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; CTC a pH 7,0; pH em água (1:1); índice SMP. DS = densidade do solo, método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997)

O experimento foi conduzido em condições de precipitação natural em área cercada do Departamento de Solos da UFRGS. Foi aplicado P em doses de 0, 30, 60, 120, 240 e 480 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  na forma de superfosfato triplo, no início do período experimental. O superfosfato triplo foi previamente moído em gral de porcelana, e distribuído uniformemente na superfície dos solos. Foram feitos cinco cultivos, sendo a sequência composta por aveia, milho, milho, feijão e trigo, com intervalos sem cultivo aproximadamente 30 dias entre os mesmos. Após o desbaste, foram mantidas até a colheita 10 plantas de aveia e de trigo e três de milho e de feijão por vaso. Em cada cultivo foram aplicados 180 kg de N  $ha^{-1}$  N (uréia) e 100 kg de  $K_2O$   $ha^{-1}$  (cloreto de potássio). A aplicação destes, em solução, foi parcelada em duas vezes, sendo metade na semeadura e metade a 15 dias após a primeira. Na ausência de precipitação, os solos foram irrigados com água destilada para atingir um teor de umidade entre 75 a 80% da capacidade de campo. Plantas daninhas e insetos foram controlados manualmente, e não tendo sido observada a ocorrência de doenças nas plantas. Após 45 dias de cultivo, as plantas foram cortadas a 1 cm da superfície do solo. O material vegetal foi seco em estufa, com circulação de ar a 65°C, para a determinação do rendimento de matéria seca. Posteriormente, o material foi moído e o P determinado no extrato sulfúrico por colorimetria (Tedesco et al., 1995).

Ao final dos cinco cultivos (365 dias após a aplicação dos tratamentos), numa repetição de cada tratamento foi feita a separação do solo nas mesmas profundidades de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15 e 15 a 20 cm, e feitas as mesmas avaliações do P no solo especificadas para as amostras coletadas no campo.

#### 4.2.4. Análise estatística

O estudo dos dados foi feito pela análise da variância e regressão polinomial entre o rendimento de plantas (teor na folha, produtividade dos grãos, P absorvido) e doses de P e a significância verificada pelo teste F ( $p < 0,05$ ). Foi estudada a relação entre os teores de P disponível no solo extraído pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3 e a relação com o potencial de perda de P.

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.3.1. Experimento de campo

Os teores de P disponível ( $PM_1$ ,  $PM_3$ ,  $P_a$ ), P total e P inorgânico total em todos os solos estudados (Tabela 4.3) aumentaram com as quantidades de P aplicadas. Os teores de P orgânico não foram afetados pela adubação fosfatada. Os aumentos nos teores de P nos solos foram observados somente na fração inorgânica, não sendo afetados pela adubação fosfatada. Este fato é devido à ausência de variação nos teores de matéria orgânica pela aplicação do P mineral e à forte competição exercida pelos colóides inorgânicos (Rheinheimer, 2000). Assim, a proporção de  $P_o$  diminui à medida que aumenta o P solúvel adicionado (Tabela 4.3 e Tabela 4.4).

As quantidades de P do solos extraído pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3, aumentaram com as doses de adubo fosfatado adicionado, apresentando um alto grau de correlação entre as variáveis (Tabela 4.4). Os teores de P extraído pelas soluções não diferiram entre si; no entanto, as quantidades de P extraído pela solução de Mehlich-3 foram em média, 15% menores do que as extraídas pela solução de Mehlich-1. Bortolon & Gianello (2008) também observaram que, em solos argilosos, a solução de Mehlich-3 extrai quantidades menores de P em relação à solução de Mehlich-1.

Em geral, a dose de 60 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  foi suficiente para atingir o teor crítico estabelecido pela CQFS (2004), para os solos LVdf2 e LVdf, já que o solo LBaf, no início do experimento, apresentava um teor de P na classe “Muito Alto”. As diferenças nos teores iniciais de P disponível se devem às diferenças no histórico de uso e manejo dos solos. No caso da área sob solo LBaf, tinham sido adicionadas doses de P maiores do que as exportadas pelas culturas, não tendo ocorrido nessa área o período de cultivo com preparo convencional de solo, que propiciou perdas de solo, água, e nutrientes, atingindo até a degradação físico-química, como ocorreu nas áreas sob LVdf2 e LVdf.

Tabela 4.3. Análise dos solos na profundidade de 0-10 cm após a colheita da soja e dados de rendimento das plantas cultivadas submetidas às doses de fósforo.

Doses P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg ha <sup>-1</sup>	Solo <sup>1</sup>						Planta <sup>2</sup>				
	PM <sub>1</sub>	PM <sub>3</sub>	P <sub>t</sub>	P <sub>i</sub>	P <sub>o</sub>	P <sub>a</sub>	GSP	P <sub>f</sub>	Rend <sup>a</sup>	P <sub>f</sub>	Rend <sup>b</sup>
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----						%	g kg <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>
	(LVdf2)										
0	3,7	4,2	637	457	180	0,2	0,4	2,0	2783	2,2	2889
30	5,1	5,2	642	469	173	0,8	0,6	2,5	2781	2,4	3089
60	7,7	6,7	682	508	174	1,6	0,9	3,3	3380	2,7	3297
120	9,5	10,3	702	521	181	2,1	1,2	3,7	4141	2,7	3554
240	22,2	18,3	742	568	174	3,5	2,9	4,3	4626	3,3	3947
450	58,1	51,2	762	608	154	4,8	8,0	4,5	4816	3,3	3821
	ANOVA P>F										
Doses	0,02	0,04	0,04	0,03	0,10	0,07	0,04	0,01	0,01	0,04	0,06
	(LVd2)										
0	5,3	3,5	685	489	196	0,3	0,7	1,8	2207	2,2	2623
40	6,3	4,3	692	501	191	0,6	0,8	2,0	2377	2,1	2490
60	6,5	6,9	705	521	184	1,2	0,9	2,0	2326	2,8	2880
120	18,7	16,8	721	551	170	2,2	2,5	2,1	2334	2,5	2668
170	28,3	25,6	738	589	149	3,4	4,5	2,2	2495	2,2	2867
225	38,1	32,4	799	601	198	4,1	6,5	2,2	2515	2,7	2866
	ANOVA P>F										
Doses	0,01	0,01	0,03	0,01	0,81	0,02	0,01	0,46	0,37	0,25	0,61
	(LBaf)										
0	12,2	10,8	705	489	216	0,8	1,0	1,8	1417	-	-
25	16,6	17,0	712	501	211	1,1	1,4	2,1	1575	-	-
55	20,1	24,1	725	521	204	1,5	2,4	2,2	1950	-	-
110	28,4	28,5	773	551	222	2,8	3,9	2,7	2063	-	-
147	32,8	36,7	812	597	215	3,2	4,7	2,8	2444	-	-
276	36,1	52,3	869	628	241	4,5	5,8	3,0	2650	-	-
	ANOVA P>F										
Doses	0,01	0,01	0,03	0,01	0,66	0,04	0,03	0,02	0,01	-	-

<sup>1</sup>PM<sub>1</sub> = P extraível com a solução de Mehlich-1; PM<sub>3</sub> = P extraível com a solução de Mehlich-3; P<sub>t</sub> = P total; P<sub>i</sub> = P inorgânico total; P<sub>o</sub> = P orgânico total; P<sub>a</sub> = P extraível em água; GSP = grau de saturação de P; <sup>2</sup> P<sub>f</sub> = teor de P na folha; Rend = rendimento de grãos; <sup>a</sup> Safra 2007/2008 com a cultura da soja em todos os locais; <sup>b</sup> Safra 2008 no LVdf2 com trigo e safra 2008/2009 com soja no LVdf2.

Tabela 4.4. Correlação entre as formas<sup>1</sup> de fósforo nos solos e entre as doses de adição de fósforo

	PM <sub>1</sub>	PM <sub>3</sub>	P <sub>t</sub>	P <sub>i</sub>	P <sub>o</sub>	P <sub>a</sub>	GSP
Dose	0,87**	0,84**	0,68*	0,86**	-0,19 <sup>ns</sup>	0,93**	0,90**
PM <sub>1</sub>	-	0,98**	0,86**	0,90**	0,16 <sup>ns</sup>	0,91**	0,98**
PM <sub>3</sub>	-	-	0,88**	0,89**	0,25 <sup>ns</sup>	0,89**	0,94**
P <sub>t</sub>	-	-	-	0,91**	0,49 <sup>ns</sup>	0,84**	0,82**
P <sub>i</sub>	-	-	-	-	0,08 <sup>ns</sup>	0,96**	0,92**
P <sub>o</sub>	-	-	-	-	-	-0,01 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>
P <sub>a</sub>	-	-	-	-	-	-	0,94**

<sup>1</sup>PM<sub>1</sub> = P extraível com a solução de Mehlich-1; PM<sub>3</sub> = P extraível com a solução de Mehlich-3; P<sub>t</sub> = P total; P<sub>i</sub> = P inorgânico total; P<sub>o</sub> = P orgânico total; P<sub>a</sub> = P extraível em água; GSP = grau de saturação de P.

Embora o teor crítico tenha sido alcançado com a aplicação de uma dose relativamente baixa, as culturas apresentaram aumento de rendimento com a aplicação do P à excessão do solo LVdf (Figura 4.1). A ausência de

resposta no solo LVdf pode ter sido motivada pela baixa precipitação durante o desenvolvimento das culturas, e tendo ocorrido num período de 30 dias sem chuvas na região, na fase de florescimento e início do enchimento dos grãos. O mesmo período de estiagem ocorreu no solo LVdf2; no entanto, a porcentagem de cobertura do solo após a semeadura foi maior no LVdf2 do que no LVdf (90 e 60% respectivamente; método da transecta, realizado após a semeadura em todos os locais). A maior porcentagem de cobertura do solo favorece a infiltração de água no solo, reduz as diferenças térmicas e a evapotranspiração do solo, retendo mais umidade, e reduzindo os efeitos de estresse hídrico durante o desenvolvimento da cultura.

O tipo de equipamento utilizado na semeadura afeta diretamente a porcentagem de cobertura do solo, refletindo-se no crescimento e desenvolvimento das culturas. Outro fator que pode ter contribuído para a ausência de resposta em rendimento no solo LVdf, foi a alta densidade do solo na camada superficial (Tabela 4.1). O aumento na densidade do solo reduz a taxa de difusão de oxigênio para as raízes, prejudicando o desenvolvimento do sistema radicular superficial, e reduzindo a absorção de água e nutrientes (Camargo & Alleoni, 1997; Dias Junior, 2000; Meurer, 2007). Nesse solo ocorreu um período de vários anos sob pastagem com gado de corte, propiciando a compactação superficial pelo pisoteio dos animais na área.

A resistência do solo à penetração das raízes, além da dependência de fatores como textura, estrutura, mineralogia, dentre outros, é altamente dependente da umidade do solo. Neste caso, nos dias de baixa disponibilidade hídrica, o solo retém a água com maior tensão nos poros, diminuindo a disponibilidade de água, e reduzindo a difusão do P até a superfície das raízes. A essa tensão, somam-se as forças já existentes entre as partículas da fase sólida do solo, fazendo com que, em solos com menor umidade, a resistência à penetração de raízes seja maior, dificultando a absorção de água em subsuperfície (Meurer, 2007).

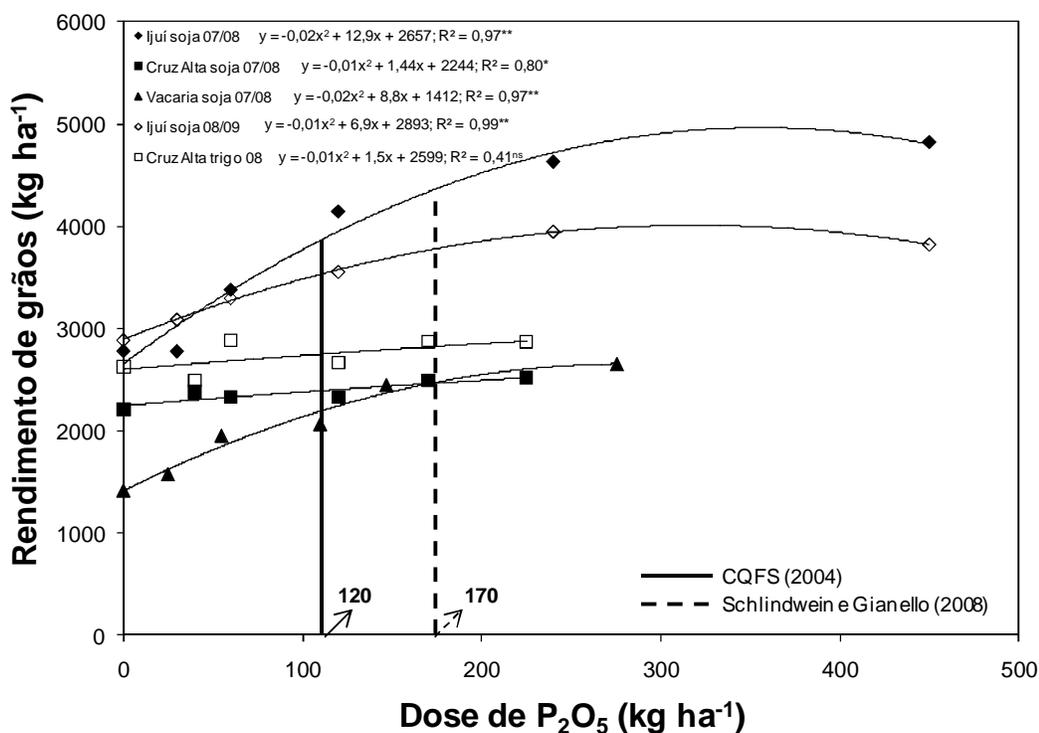


Figura 4.1. Respostas em rendimento de grãos de soja e de trigo em Ljuí (solo LVdf2), Cruz Alta (solo LVdf) e Vacaria (solo LBaf) pela aplicação de doses crescentes de fósforo.

As respostas das culturas ao P foram significativas, sendo que as mesmas responderam a adições de doses maiores do que as recomendadas pela CQFS (2004). A maior resposta obtida em relação à dose proposta pode ser devida ao fato de que as recomendações de adubação e de calagem nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS, 2004) foram elaboradas com base em estudos de calibração de P e K com poucas informações referentes ao sistema plantio direto. Além disso, foram introduzidas, nos últimos anos, mudanças significativas nos sistemas de cultivo, destacando-se que a maior parte das áreas de produção das culturas de soja, trigo e milho cultivadas no estado do RS está sob sistema plantio direto; a profundidade de amostragem do solo sob sistema plantio direto é feita na camada de maior concentração de nutrientes (0–10 cm); e o rendimento médio das principais culturas aumentou ao longo do tempo (Schlindwein & Gianello, 2008), o que contribui para as observações frequentes de resposta ao P em doses maiores das recomendadas.

A dose de 170 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  proporcionou os maiores rendimentos de grãos. Esta quantidade é próxima à sugerida por Schlindwein & Gianello

(2008) para solos com mais de 60% de argila ( $190 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ), sugerindo que as doses atualmente recomendadas podem estar subestimadas em relação ao potencial produtivo das culturas, sendo necessária a continuação de estudos em condições de campo para calibração de doses de P para as culturas.

Embora este estudo tenha sido conduzido num curto período experimental, os resultados indicam a necessidade de revisão das doses recomendadas, corroborando com relatos de produtores e de responsáveis técnicos que utilizam o Manual de Adubação, e com dados obtidos por Schlindwein & Gianello (2008). Além disso, o teor de P em que houve maior resposta das culturas, foi maior que o teor crítico estabelecido pela CQFS (2004) (Figura 4.2). Em geral, o teor no solo em que foi observada maior resposta das culturas esteve próximo ao sugerido por Schlindwein & Gianello (2008) para solos argilosos, que, neste caso, é duas vezes o valor estabelecido pela CQFS (2004). No entanto, no solo LBaf a resposta ao P foi linear até a dose máxima, sendo que o teor de P no início do experimento foi maior do que o teor crítico.

Os teores de P nas folhas aumentaram com as doses de P (Tabela 4.3) e em todos os casos; na dose equivalente a  $60 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  foi atingido o valor mínimo de P na folha considerado adequado para o desenvolvimento das culturas, de  $2,6$  e  $2,0 \text{ g kg}^{-1}$  para soja e trigo, respectivamente (CQFS, 2004).

De modo geral, no estado do RS, não foram observadas respostas das culturas à adição de P em solos com alto teor deste nutriente (Anghinoni, 2007). No entanto, os estudos foram conduzidos entre 1994 e 1997 e dessa data até hoje, ocorreram mudanças, principalmente no potencial de rendimento das culturas, com maior probabilidade de resposta ao P nesses solos. Assim, são necessários estudos em condições controladas em experimentos com os objetivos de avaliar a resposta ao P, visando à obtenção de dados para a calibração de doses de adubo fosfatado a campo.

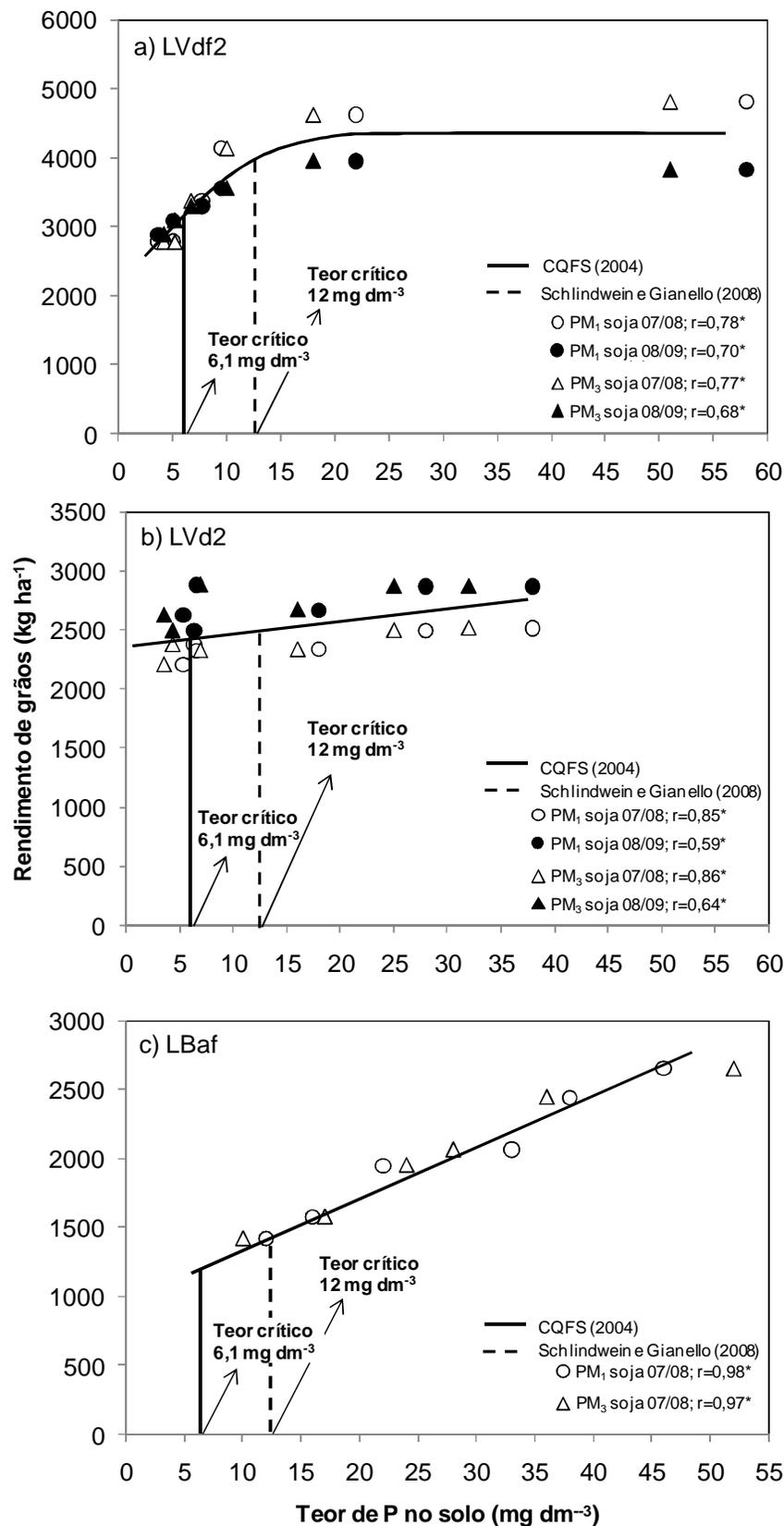


Figura 4.2. Relação entre o rendimento de grãos e o teor de fósforo nos solos com adição de doses crescentes de fósforo.

### 4.3.2. Experimento em condições controladas

Em geral, os resultados obtidos no estudo conduzido em condições controladas apresentaram a mesma tendência dos obtidos a campo, aumentando os teores de  $PM_1$ ,  $PM_3$ ,  $P_t$  e  $P_i$  com o aumento do P aplicado (Tabela 4.5).

Tabela 4.5. Análise dos solos na profundidade de 0-5 cm após a sequência de cinco cultivos com doses de fósforo

Doses $P_2O_5$ kg ha <sup>-1</sup>	Solo						GSP %
	$PM_1$	$PM_3$	$P_t$	$P_i$	$P_o$	$P_a$	
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----						
	LVdf2						
0	4,7	4,1	673	498	175	0,6	0,4
30	6,9	7,1	699	529	170	0,8	2,1
60	5,0	4,8	716	564	152	1,8	3,8
120	15,6	13,6	739	588	151	2,7	6,3
240	12,7	14,1	768	622	146	4,1	8,4
480	47,1	41,2	804	632	172	5,3	13,0
	ANOVA P>F						
Doses	0,03	0,01	0,02	0,03	0,23	0,01	0,03
	LVd2						
0	4,2	3,9	712	523	189	0,5	0,9
30	5,5	5,1	724	539	185	1,2	1,8
60	8,3	7,6	746	551	195	1,7	2,6
120	12,7	11,4	793	583	210	2,4	4,6
240	13,0	14,6	812	614	198	2,8	6,1
480	22,0	19,7	827	637	190	3,9	9,3
	ANOVA P>F						
Doses	0,01	0,01	0,02	0,04	0,64	0,03	0,03
	LBaf						
0	5,2	5,4	739	533	206	0,6	1,1
30	9,9	9,3	742	547	195	1,3	2,3
60	14,2	15,7	785	589	196	2,1	4,1
120	18,6	17,5	824	603	221	3,2	5,8
240	25,5	29,3	898	652	273	3,6	7,3
480	43,1	39,7	902	687	215	5,9	12,1
	ANOVA P>F						
Doses	0,02	0,02	0,04	0,02	0,79	0,02	0,04

<sup>1</sup> $PM_1$  = P extraível com a solução de Mehlich-1;  $PM_3$  = P extraível com a solução de Mehlich-3;  $P_t$  = P total;  $P_i$  = P inorgânico total;  $P_o$  = P orgânico total;  $P_a$  = P extraível em água; GSP = grau de saturação de P.

Os rendimentos de matéria seca de aveia, milho, feijão e trigo aumentaram com o aumento das doses de P, assim como o P contido na matéria seca e o P absorvido (Tabela 4.6). Os teores de P extraídos pela soluções de Mehlich-1 e Mehlich-3 tiveram alto grau de correlação (Tabela 4.7).

A resposta das plantas em produção de matéria seca foi observada em doses acima de 120 kg ha<sup>-1</sup>  $P_2O_5$ , corroborando com os dados obtidos a campo, demonstrando, ainda, a eficácia e representatividade da metodologia de coleta de amostras indeformadas para uso em condições controladas (Figura 4.2).

Tabela 4.6. Resposta das culturas<sup>1</sup> à adição de fósforo no eperimento conduzido em condições controladas.

Doses P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg ha <sup>-1</sup>	Aveia			Milho			Milho			Feijão			Trigo			
	Rend g/vaso	P <sub>f</sub> g kg <sup>-1</sup>	P <sub>abs</sub> mg/vaso	Rend g/vaso	P <sub>f</sub> g kg <sup>-1</sup>	P <sub>abs</sub> mg/vaso	Rend g/vaso	P <sub>f</sub> g kg <sup>-1</sup>	P <sub>abs</sub> mg/vaso	Rend g/vaso	P <sub>f</sub> g kg <sup>-1</sup>	P <sub>abs</sub> mg/vaso	Rend g/vaso	P <sub>f</sub> g kg <sup>-1</sup>	P <sub>abs</sub> mg/vaso	
LVdf2																
0	2,4	1,7	4,1	5,1	1,1	5,6	5,5	1,4	7,7	2,3	1,9	4,4	2,9	1,6	4,6	
30	3,6	1,8	6,5	5,8	1,3	7,5	8,2	2,5	20,5	3,1	2,6	8,1	3,3	1,6	5,3	
60	5,4	2,2	11,9	7,5	1,9	14,3	8,7	2,4	20,9	3,6	2,7	9,7	4,2	1,8	7,6	
120	6,1	2,5	15,3	8,2	1,9	15,6	10,2	2,7	27,5	3,4	2,8	9,5	5,1	2,3	11,7	
240	7,5	2,8	21,0	7,8	2,3	17,9	12,0	3,1	37,2	4,1	3,1	12,7	5,8	2,4	13,9	
480	7,4	2,8	20,7	9,0	2,1	18,9	12,8	3,1	39,7	4,9	3,1	15,2	6,3	2,6	16,4	
ANOVA P>F																
Doses	0,01	0,03	0,02	0,01	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02
LVd2																
0	1,6	1,5	2,4	5,1	1,3	6,6	6,0	1,1	6,6	2,8	1,8	5,0	2,1	1,3	2,7	
30	2,6	2,1	5,5	7,1	2,2	15,6	7,4	1,5	11,1	4,5	2,3	10,4	2,8	1,6	4,5	
60	3,3	2,3	7,6	7,6	2,2	16,7	6,7	1,5	10,1	3,7	2,3	8,5	3,5	2,3	8,1	
120	4,2	2,8	11,8	6,9	1,9	13,1	8,4	2,0	16,8	4,8	2,6	12,5	3,1	2,3	7,1	
240	5,5	3,2	17,6	8,4	2,4	20,2	10,1	2,3	23,2	5,4	2,7	14,6	4,2	2,4	10,1	
480	6,0	3,3	19,8	11,6	2,5	29,0	11,1	2,7	30,0	6,7	3,0	20,1	4,3	2,4	10,3	
ANOVA P>F																
Doses	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	
LBaf																
0	3,0	1,9	5,7	5,4	1,5	8,1	5,5	1,3	7,2	3,3	1,8	5,9	2,6	1,3	3,4	
30	3,8	2,5	9,5	7,5	1,9	14,3	8,2	1,9	15,6	4,1	1,7	7,0	2,7	1,8	4,9	
60	4,4	2,7	11,9	8,6	1,9	16,3	8,7	2,0	17,4	5,7	2,3	13,1	3,6	1,6	5,8	
120	5,3	2,9	15,4	7,9	1,9	15,0	10,2	2,3	23,5	4,8	2,0	9,6	4,3	2,3	9,9	
240	6,0	3,3	19,8	9,4	2,3	21,6	12,8	2,0	25,6	6,8	2,5	17,0	4,1	2,1	8,6	
480	5,4	3,3	17,8	11,0	2,8	30,8	12,0	2,2	26,4	7,7	2,9	22,3	4,8	2,6	12,5	
ANOVA P>F																
Doses	0,01	0,02	0,01	0,01	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	

<sup>1</sup> Rend = rendimento de massa seca de plantas; P<sub>f</sub> = teor de P na folha; P<sub>abs</sub> = P absorvido pela planta.

Tabela 4.7. Correlação entre as formas<sup>1</sup> de fósforo nos solos e entre as doses de adição de fósforo

	PM <sub>1</sub>	PM <sub>3</sub>	P <sub>t</sub>	P <sub>i</sub>	P <sub>o</sub>	P <sub>a</sub>	GSP
	----- r -----						
Dose	0,85**	0,84**	0,70**	0,87**	0,13 <sup>ns</sup>	0,91**	0,95**
PM <sub>1</sub>	-	0,99**	0,76**	0,82**	0,26 <sup>ns</sup>	0,91**	0,92**
PM <sub>3</sub>	-	-	0,82**	0,87**	0,34 <sup>ns</sup>	0,91**	0,91**
P <sub>t</sub>	-	-	-	0,92**	0,66*	0,81**	0,76**
P <sub>i</sub>	-	-	-	-	0,33 <sup>ns</sup>	0,95**	0,92**
P <sub>o</sub>	-	-	-	-	-	0,15 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>
P <sub>a</sub>	-	-	-	-	-	-	0,98**

Os rendimentos de matéria seca de plantas foram semelhantes entre os solos, sendo, em média, maiores no solo LBaf. Mesmo com um alto teor de alumínio trocável nas camadas subsuperficiais (Tabela 4.2), o rendimento não foi negativamente afetado. Este fato pode ser devido ao alto teor de matéria orgânica do solo, reduzindo o efeito tóxico do alumínio pela complexação por ácidos orgânicos (Meurer, 2007). Foi visto que no solo LVdf não foi observada resposta à adição de P a campo; no entanto, em condições controladas, as plantas responderam em rendimento (Figura 4.3), confirmando, em parte, o efeito negativo da baixa disponibilidade hídrica no solo sobre a resposta das plantas em rendimento, ocorrido em campo.

Os valores de P extraído pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3 nas amostras de solo do experimento a campo, não podem ser comparados com os valores determinados nas amostras do estudo em condições controladas pelos seguintes motivos: a profundidade de solo amostrado foi diferente entre os dois estudos (0 a 10 cm no campo e 0 a 5 cm em casa de vegetação); estudos de resposta de doses de nutrientes visando à calibração das mesmas ou recomendações de adubação, devem ser preferencialmente feitos em condições de campo, devido às variações das condições locais, especialmente o clima. No entanto, estudos em condições controladas podem dar suporte ao entendimento da resposta a campo, pela facilidade de controle de algumas variáveis como, por exemplo, o suprimento de água.

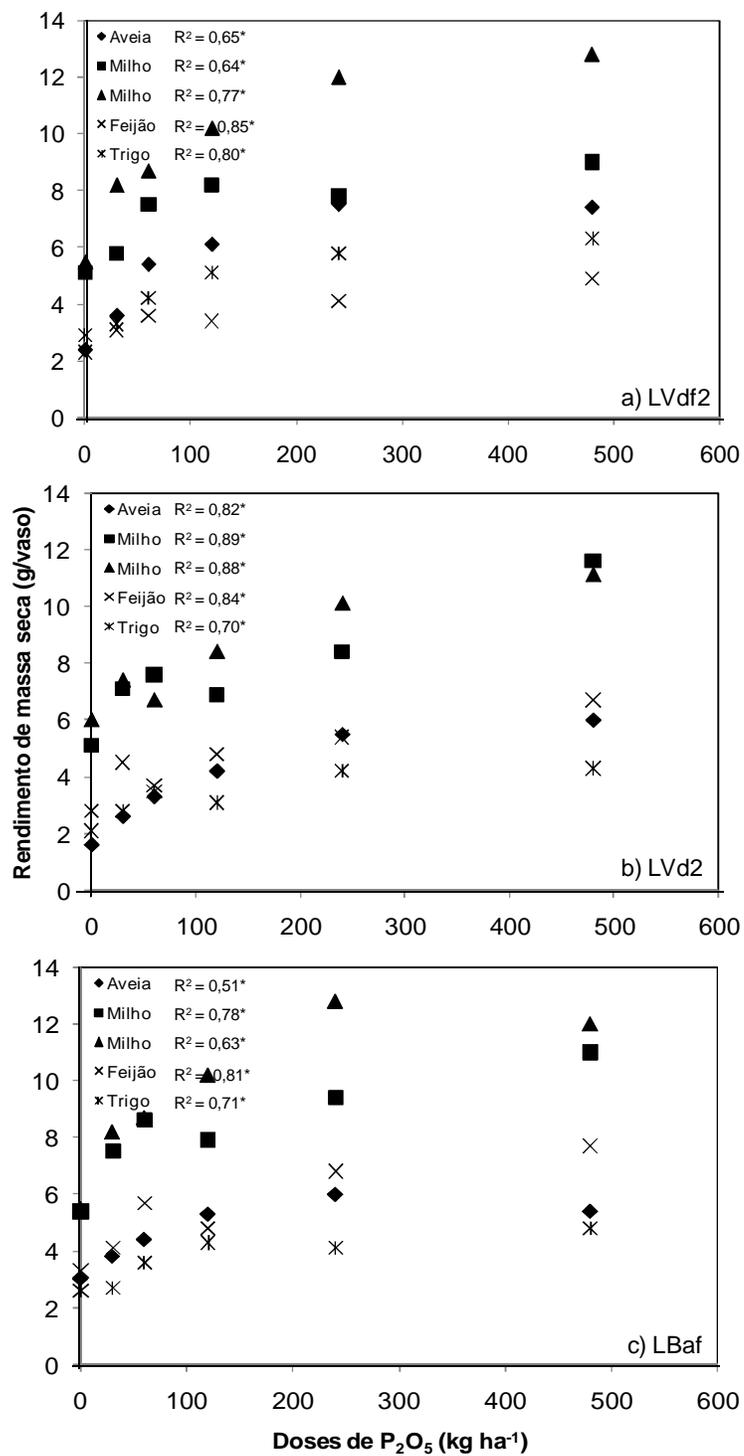


Figura 4.3. Relação entre o rendimento de matéria seca de plantas em solos com adição de fósforo.

#### 4.3.3. Relação entre aumento do fósforo no solo e o potencial de perda

Embora os resultados destes estudos indiquem a necessidade de aumentos das doses de adubo fosfatado e do valor do teor crítico de P no solo para as culturas, o aumento destes, dependendo da magnitude, pode provocar problemas econômicos e danos ambientais.

O estabelecimento das doses de P (CQFS, 2004), pressupõe que os outros fatores limitantes ao desenvolvimento vegetal estejam otimizados e o único fator limitante é o nutriente em estudo. Deste modo, entende-se que não ocorra limitações devidas às propriedades físicas do solo, que sejam utilizadas práticas conservacionistas de apoio ao sistema plantio direto, como terraços, plantio em contorno, cobertura permanente e de alta adição de material vegetal, dentre outros.

Entretanto, a realidade do sistema plantio direto no estado do RS é preocupante. É crescente a redução de uso das práticas conservacionistas de suporte por parte dos produtores, sem nenhuma base técnica de que isso possa ser feito. A semeadura vem sendo feita no sentido do declive do terreno, com o objetivo de aumentar o rendimento operacional. Porém, dependendo do tipo de semeadora utilizada, pode-se reduzir consideravelmente a cobertura do solo, pelo enterrio do resíduo vegetal durante a operação, ficando o solo exposto ao impacto direto das gotas da chuva, provocando a desagregação do solo e formação de caminhos preferenciais para o escoamento de água, perdendo-se solo, água e nutrientes. Além disso, grande parte das terras cultivadas no sistema plantio direto no estado do RS apresenta teores de P no solo nas classes “alto” ou “muito alto” (73% das áreas) (Martinazzo, 2006), sendo a adubação fosfatada, nesse caso, feita a lanço em superfície, antes da semeadura para diminuir custos e aumentar o rendimento operacional.

O acúmulo de P nas camadas superficiais do solo (Tabela 4.2), o modo de adubação a lanço em superfície em áreas declivosas, comum nas lavouras no estado do RS sob sistema plantio direto, potencializam a perda de P nesses solos, sendo o mesmo transportado pelo escoamento superficial para os mananciais de água, favorecendo a eutroficação, conforme reportado em estudos sob condições de chuva natural e simulada em solos dos estados do RS e de SC (Bertol et al., 2007a; Bertol et al., 2007b; Gilles et al., 2008). No entanto não há estudos desta natureza no Brasil que relacionem o teor de P no solo (extraível pela solução de Mehlich-1) com as aplicações recomendadas de

adubo fosfatado e o potencial de perdas de P, objetivando reduzir estas perdas e proteger o ambiente aquático.

O P extraível por água ( $P_a$ ) apresenta alta relação com o P perdido por escoamento superficial (Pote et al., 1999; Sharpley et al., 2008), sendo a forma mais facilmente transportada com a enxurrada. Teores de P entre 0,03 e 0,1 mg L<sup>-1</sup> determinados em água para consumo (humano ou animal) ou para atividades de recreação são considerados altos e o ambiente está em estado de eutrofização, afetando as qualidades organolépticas da mesma (cor, sabor e odor) e com alto custo de tratamento (Sharpley et al., 2008).

As doses de P adicionadas aos solos nos experimentos de campo e sob condições controladas, propiciaram o aumento dos teores de  $P_a$ , apresentando altas correlações com o P extraível pelas soluções de Mehlich-1 e de Mehlich-3 (Tabelas 4.3, 4.4, 4.5 e 4.7). Além disso, o grau de saturação de P (GSP), um importante índice ambiental para avaliar o potencial de transporte de P por erosão, aumentou com as doses de P e teve alto grau de correlação com o P disponível. Os valores de GSP e  $P_a$  foram maiores para os solos avaliados na camada de 0-5 cm, enfatizando o fato que a estratificação do P no solo favorece o transporte do mesmo pelo escoamento superficial; no estado do RS, no período de inverno, em que as chuvas são de baixa intensidade mas de longa duração, é favorecida a saturação do solo por longo período, ocorrendo perdas de solo, água e P pela enxurrada.

Para o GSP ser um efetivo indicador ambiental do potencial de perda de P em solos, um alto grau de correlação deve ser obtido com as formas de P no solo mais suscetíveis à erosão. Diversos autores (Ige et al., 2005; Pote et al., 1999; Pote et al., 1996; Sharpley et al., 2008) observaram alta relação entre o P reativo dissolvido no escoamento superficial e o  $P_a$ , podendo ser utilizado como um índice da forma de P rapidamente perdida por erosão.

Foi obtida uma correlação de alto grau de associação entre o GSP e o  $P_a$ , sendo uma ferramenta útil para otimizar o uso do P em solos sob plantio direto no estado do RS, podendo ser facilmente incluído no sistema de recomendação de adubação. Geralmente, valores de GSP maiores do que 5% obtidos em solos ácidos são considerados de alto risco de perda de P, com efeito direto nas águas superficiais (Smil, 2000). O valor de 5% foi atingido nos solos avaliados na profundidade de 0 a 5 cm adubados com doses de 120 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. Para a mesma dose, no entanto, na profundidade de 0 a 10 cm,

os valores de GSP foram menores que 5%, porém os valores de  $P_a$  são considerados altos e com risco de perdas por erosão.

De forma ideal deve ser buscada a associação entre os teores críticos (TC) para as culturas e para o ambiente, de forma a minimizar as perdas de P para o ambiente (Figura 4.4). Para a obtenção do TC de P para o ambiente, podem ser utilizadas as relações entre o P disponível, extraível pelas soluções de Mehlich-1 ou de Mehlich-3, e as formas de P mais susceptíveis à erosão, como o P extraível em água ( $P_a$ ) ou o GSP. No entanto, para maior acuracidade desta relação, estudos para a obtenção do TC de P para o ambiente devem ser feitos “in situ”, utilizando simuladores de chuva em locais representativos de onde o valor será utilizado (Sharpley et al., 2008).

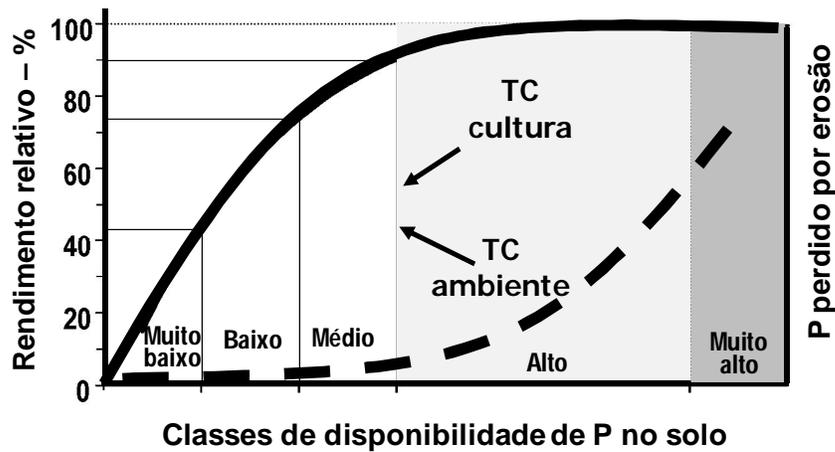


Figura 4.4. Relação entre o rendimento relativo de uma cultura e teores de P no solo extraído pela solução de Mehlich-1 e P perdido por erosão (P extraível em água ou GSP) (TC = teor crítico (adaptado de Gianello & Wietholter, 2004).

#### **4.4. CONCLUSÕES**

Foi observada resposta das culturas à adubação fosfatada em solos com diferentes históricos de uso e manejo, com adição de doses de P maiores do que as atualmente recomendadas. O teor crítico de P foi duas vezes maior do que está sendo utilizado. O uso de amostras indeformadas é eficiente para o estudo da resposta das plantas à adubação fosfatada. O aumento das doses de P pode propiciar perdas de P por erosão, em formas suscetíveis de serem transportadas pelo escoamento superficial.

#### 4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R.F. et al (ed). **Fertilidade do solo**. Viçosa : SBCS, 2007. p. 873-928.
- BERTOL, I.; COGO, N.P.; SCHICK, J.; GUADAGNIN, J.C.; AMARAL, A.J. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.133-142, 2007a.
- BERTOL, I.; ENGEL, F.L.; MAFRA, A.L.; BERTOL, O.J.; RITTER, S.R. Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, n.2, p.142-150, 2007b.
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Interpretação de resultados analíticos de fósforo pelos extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 em solos do rio grande do sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, p.2751-2756, 2008.
- CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e desenvolvimento das plantas**. Piracicaba : ESALQ, 1997. 132p.
- CASSOL, E.A.; DENARDIN, J.E.; KOCHANN, R.A. Sistema plantio direto: evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. **Tópicos Especiais em Ciência do Solo**, Viçosa, n.5, p. 333-370, 2007.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 2. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1989. 128p.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1995. 224p.
- CQFS (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO). **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: SBCS-Núcleo Regional Sul, 2004. 410p.

- CORDELL, D.; DRANGERT, J.A.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global environmental change**, The Netherlands, v.19, n.2, p.292-305, 2009.
- DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds.) **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, n.5, v.1, p.55-94, 2000.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro : CNPS, 1997. 212 p.
- GILLES, L.; COGO, N.P.; BISSANI, C.A.; BAGATINI, T. Perdas de Solo, Água, Matéria Orgânica e Nutrientes por Erosão na Cultura do Milho, Implantada sobre Campo Nativo, em Diferentes Métodos de Preparo do Solo e Tipos de Adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 2009 (no prelo).
- GUERRA, J.G.M.; ALMEIDA, D.L.; SANTOS, G.A. Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.31, n.4, p.291-299, 1996.
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, n.5, p.970-976, 1982.
- IGE, D.V.; AKINREMI, A.A.; FLATEN, D.N. Environmental index for estimating the risk of phosphorus loss in calcareous soils of Manitoba. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.34, n.6, p.1944-1951, 2005.
- KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D.L. et al. (ed.) **Methods of soil analysis**. Madison : SSSA, 1996. p.869–920. Part 3. (SSSA Book Ser. 5).
- MARTINAZZO, R. **Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado**. 84f. 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- MEURER, E.J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R.F. et al (ed). **Fertilidade do solo**. Viçosa : SBCS, 2007. p. 65-90.
- POTE, D.H.; DANIEL, T.C.; SHARPLEY, A.N.; MOORE, P.A.; EDWARDS, D.R.; NICHOLS, DJ. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, n.5, p.855-859, 1996.
- POTE, D.H.; DANIEL, T.C.; SHARPLEY, A.N.; MOORE, P.A.; EDWARDS, D.R.; NICHOLS, DJ. Relationship between phosphorus levels in three Ultisols and phosphorus concentrations in runoff. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.28, n.1, p.170-175, 1999.

- RHEINHEIMER, D.S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 211f. 2000. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000.
- SCHLINDWEIN, J.A. **Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto**. 169f. 2003. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- SCHLINDWEIN, J.A.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, p.2037-2049, 2008.
- SCHLINDWEIN, J.A.; GIANELLO, C. Necessidades de novos estudos de calibração e recomendações de fertilizantes para as culturas sob sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.79, n.1, p.12-15, 2004.
- SHARPLEY, A.N.; KLEIMANN, P.J.A.; HEATHWAITE, A.L. Phosphorus loss from an agricultural watershed as a function of storm size. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.37, n.2, p.362-368, 2008.
- SIQUEIRA, O. J. W. de ; SCHERER, E. E. ; TASSINARI, G. ; ANGHINONI, I. ; PATELLA, J. F. ; TEDESCO, M. J. ; MILAN, P. A. ; ERNANI, P. R. . **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo, RS: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo : SBCS.Núcleo Regional Sul, 1987. 100 p.
- SMIL, V. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. **Annual Review Entire Environment**, Amsterdam, v.25, n.1, 53–88, 2000.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5).
- VOLKWEISS, S.J. **Factors affecting phosphate sorption by soils and minerals**. 178f. 1973. Thesis (Ph.D) - University of Wisconsin, Madison, 1973.

## **CAPÍTULO IV**

### **FÓSFORO EXTRAÍDO PELA SOLUÇÃO DE MEHLICH-1 DETERMINADO POR COLORIMETRIA E ICP EM SOLOS DO SUL DO BRASIL**

## 5.1. INTRODUÇÃO

A solução de Mehlich-1 é utilizada para avaliação do fósforo disponível para as plantas em solos do Estado do Rio Grande do Sul. A metodologia de determinação de fósforo é baseada na espectrometria de absorção molecular (colorimetria - COL). Em âmbito mundial, alguns laboratórios utilizam, alternativamente, a técnica de espectrometria de emissão ótica por plasma induzido (ICP) para a determinação simultânea de vários elementos

A solução de Mehlich-1 ( $M_1$ ) foi proposta por Mehlich (1953) para a avaliação da disponibilidade de P, K e de outros nutrientes; a determinação do teor de P é feita por espectrometria de absorção molecular (colorimetria-COL). A determinação colorimétrica do P extraído é feita com a adição de molibdato de amônio que reage com o fosfato na solução, formando um complexo fosfomolibdico. A solução de 1,2,4 amino-naftol-sulfônica é utilizada como solução redutora, conferindo coloração azul ao extrato. A cor da solução aumenta com a concentração de fosfato extraído (Tedesco et al. 1995). A forma de P determinada por esta técnica é o ortofosfato.

As determinações individuais dos teores de P (por colorimetria - COL) e de outros elementos contidos no extrato requerem maior tempo, diversidade de reagentes e custo de mão-de-obra. Atualmente há a possibilidade de utilização da técnica analítica de espectrometria de emissão ótica por plasma induzido (ICP-OES), pela qual podem ser determinados vários elementos (inclusive o P), aumentando a eficiência do laboratório. Esta técnica baseia-se na emissão ótica dos átomos excitados no plasma (8000 a 10000°C), possibilitando a determinação simultânea de vários elementos (Mallarino, 2003). A solução (contendo moléculas) é injetada no plasma, vaporizada instantaneamente, dissociada e ionizada; por essa técnica, portanto, podem ser determinadas

outras formas de P em adição ao ortofosfato. Por essa razão, o teor de P determinado por ICP, algumas vezes, é de aproximadamente 50% maior em relação ao determinado por COL. Algumas pesquisas indicam que o P adicional provém, principalmente, das formas orgânicas (Hylander et al. 1995; Eckert & Watson, 1996; Nathan et al 2002; Sikora et al. 2005).

Nos EUA, a utilização da técnica do ICP em laboratórios de análise de solo expandiu-se rapidamente a partir do início dos anos 90 (Munter, 1990). A utilização da técnica do ICP para a determinação do teor de P é criticada porque os valores obtidos diferem entre os métodos, necessitando-se de alterações nas tabelas de interpretação dos teores de P no solo. Além disso, as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> recomendadas atualmente foram determinadas com a utilização da técnica colorimétrica. No entanto, há diversos trabalhos de calibração das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> recomendadas com base no teor de P no solo determinado por ICP, em alguns Estados deste país (Mallarino, 2003; Pittman et al, 2005).

A utilização da técnica de ICP-OES em laboratórios de análise de solo é recente no Brasil, devido ao alto custo de aquisição e manutenção do equipamento e pela escassez de trabalhos de pesquisa que mostrem a eficiência desta técnica em solos brasileiros. No Estado do Rio Grande do Sul, não foram observadas diferenças apreciáveis entre os teores de P extraído pela solução de Mehlich-1 em alguns solos utilizando a técnica de ICP e por COL (Bortolon et al., 2007a; Bortolon et al 2007b), necessitando-se ampliar esta verificação com maior abrangência de solos.

O objetivo deste trabalho foi: (1) determinar a relação entre o P extraído pela solução de Mehlich-1 determinado por COL e por ICP em solos do Estado do Rio Grande do Sul; (2) verificar possíveis diferenças nas recomendações de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para o milho, utilizando-se a tabela de interpretação e as recomendações de adubação utilizando-se os teores de P disponível determinado por colorimetria e por ICP.

## 5.2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no Laboratório de Análises de Solo do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS. Foram utilizadas 595 amostras de solo representativas de diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul, com ampla variação nas características físicas, químicas e mineralógicas, pertencentes às classes Latossolo, Argissolo, Cambissolo, Planossolo, Neossolo, Nitossolo, Vertissolo, Chernossolo, Luvisolo e Gleissolo, (Tabela 5.1).

Tabela 5.1. Caracterização química e física dos solos utilizados no estudo<sup>(1)</sup>.

Parâmetros	pH	Índice SMP	Argila	MO
			----- g dm <sup>-3</sup> -----	
Mínimo	4,2	4,9	60	7
Máximo	7,0	7,0	790	71
Média	5,4	5,9	360	37
Mediana	5,3	5,9	380	34

<sup>(1)</sup> Conforme Tedesco et al. (1995); MO – matéria orgânica do solo.

O P foi extraído conforme a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Foram utilizados 3 dm<sup>3</sup> de solo e 30 mL de solução extratora Mehlich-1. As amostras foram agitadas por 5 minutos em agitador horizontal com 120 oscilações por minuto e após, decantação por 16 horas. A determinação do P no extrato foi feita por duas metodologias: colorimetria (Tedesco et al., 1995) e por ICP (Sikora et al. 2005).

Os teores de P no solo foram determinados em triplicata no mesmo dia e em três dias diferentes, num total de nove repetições. As quantidades de P extraído pela solução de Mehlich-1, determinado pelas duas metodologias,

foram relacionadas entre si e as médias comparadas pelo teste de comparação simples de médias pareadas (teste t). Foi determinado o coeficiente de correlação para verificar o grau de associação entre as variáveis. Foi feita a relação entre o P determinado pelas duas técnicas com os atributos do solo. Além disso, foram relacionadas as quantidades de  $P_2O_5$  recomendadas para a cultura do milho (expectativa de rendimento de  $8,0 \text{ t ha}^{-1}$ ), de acordo com o teor de P no solo extraído pela solução de Mehlich-1 determinado por COL e por ICP, utilizando-se a tabela de interpretação estabelecida para o método colorimétrico (CQFS, 2004).

### 5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes de variação entre repetições de determinações de P extraído pela solução de Mehlich-1 diferiram, sendo de 26% e 16% para as técnicas COL e por ICP, respectivamente. O menor coeficiente de variação da técnica do ICP pode ser atribuído à maior sensibilidade (menor limite de detecção - Tabela 5.2) e à menor variabilidade na execução da mesma. A maior variabilidade observada na determinação do teor de P por COL pode ser devida às diferenças no preparo de soluções, temperatura ambiente, pH e tempo decorrido entre a adição do redutor (ácido 1,2,4 amino-naftol sulfônico) e a determinação analítica. Estas interferências não são observadas na técnica do ICP, em que a solução extraída é vaporizada diretamente no atomizador. Os espectrômetros disponíveis atualmente no mercado apresentam tecnologia adequada para minimizar as fontes de variação intrínseca do equipamento como transporte da solução para o nebulizador, potência do gerador de radiofrequência, vazão do argônio e do gás de corte, dentre outros (Skoog et al, 2002; Boss & Fredeen, 2004).

As quantidades de P extraído do solo pela solução de Mehlich-1 determinado pelas duas técnicas são mostradas na Tabela 5.2. O P determinado por COL variou de 2,0 até 77,1 mg dm<sup>-3</sup> e por ICP variou de 0,6 até 83,3 mg dm<sup>-3</sup>. A relação entre as quantidades de P determinado por COL e por ICP teve alto grau de associação ( $r=0,94^{**}$ ) (Figura 5.1a). A distribuição de frequência das amostras corresponde a 26, 34, 16, 23 e 1 % nas classes Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto, respectivamente, sendo que 76% das mesmas estão abaixo da classe Alto. Conforme o Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS, 2004), a quantidade de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> recomendada para adubação em solos com teor de P na classe Muito Alto corresponde à exportada pelas culturas. Foi, portanto, estabelecida a relação entre os teores de P determinado por COL

menores do que  $30 \text{ mg dm}^{-3}$  e os determinados por ICP (Figura 5.1b). Este valor é o centro da faixa de variação dos teores de P da classe Alto. A relação entre o P determinado por ICP e por COL (Figura 1b) teve alto grau de associação ( $r=0,84^{**}$ ) e as quantidades médias de P extraído pelas duas técnicas não diferiram estatisticamente (Tabela 5.2), podendo ser utilizadas as duas técnicas de determinação de P no solo.

Tabela 5.2. Amplitude dos teores de P extraído por Mehlich-1 determinado por colorimetria (COL) e por espectrometria de emissão ótica por plasma induzido (ICP), em 595 amostras de solo do RS, e o limite de detecção dos métodos

Parâmetros	Teor de P no solo ( $\text{mg dm}^{-3}$ )	
	COL <sup>1</sup>	ICP <sup>2</sup>
	<i>Todos os solos</i>	
Média	8,4	9,6
Mínimo	2,0	0,6
Máximo	77,1	83,3
Mediana	5,7	6,6
	<i>Solos com teor de P &lt; 30,0 <math>\text{mg dm}^{-3}</math> (Mehlich-1)</i>	
Média	6,9	7,4
Mínimo	2,0	0,6
Máximo	25,0	31,0
Mediana	5,6	6,4
Limite de Detecção	1,3	0,7

<sup>(1)</sup> Conforme Tedesco et al. (1995); <sup>(2)</sup> conforme Sikora et al. (2005).

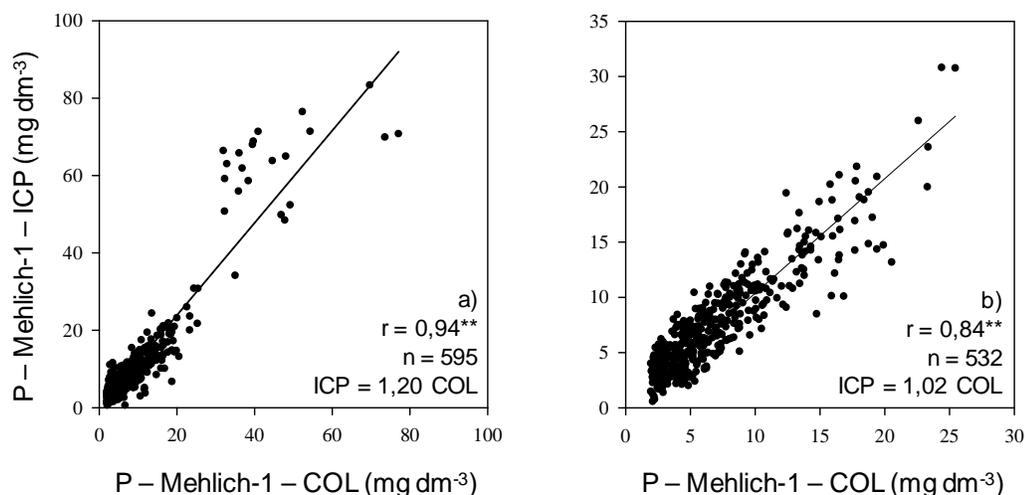


Figura 5.1. Relações entre os teores de P extraído pela solução de Mehlich-1 determinado por COL e por ICP : a) em todos os solos; b) em solos com  $P < 30 \text{ mg dm}^{-3}$ .

A separação dos solos por classes de argila (Figura 5.2) não afetou negativamente a correlação entre os teores de P determinados pelos dois métodos. Os coeficientes de correlação apresentaram alto grau de associação entre as variáveis, dentro de cada classe de argila, e as quantidades médias de P determinado por ambas as metodologias não diferiram estatisticamente dentro das mesmas (dados não mostrados). O teor de argila dos solos, portanto, não afetou a determinação do P por ICP. A relação feita entre a diferença relativa (ICP-COL), e os valores de pH e os teores de matéria orgânica, apresentaram um baixo grau de relação, sem significância estatística (dados não mostrados). Este fato possibilita afirmar que as formas de P determinadas por ambas as metodologias não diferem, e que a solução de Mehlich-1 não extrai grandes quantidades de P orgânico do solo. Embora tenha ocorrido a variação de 6% a mais nos valores de P determinado por ICP em solos argilosos (>60% de argila) comparado ao colorimétrico, em média, os valores não diferiram entre si pelo teste de comparação de médias (teste t).

Os trabalhos publicados comparando as duas técnicas de determinação de P extraído pela solução de Mehlich-1 são escassos (Milagres, et al., 2007). Entretanto, para a solução de Mehlich-3, há diversos trabalhos que mostram diferenças entre as mesmas. As diferenças são atribuídas aos teores de matéria orgânica, valores de pH e textura do solo. Porém não há convergência entre os autores e as diferenças nem sempre são observadas para os mesmos atributos (Mallarino, 2003; Hylander et al, 1995; Eckert & Watson, 1996; Nathan et al, 2002; Sikora et al, 2005; Pittman et al, 2005). Nos Estados Unidos o uso do ICP para análise de P no solo é criticada, pois a calibração dos teores no solo foi estabelecida com base no método colorimétrico. Diversos Estados americanos possuem a calibração feita para o P determinado por ICP; no entanto, alguns Estados utilizam uma equação de conversão dos valores de P determinado por ICP para o COL (Mallarino, 2003; Hylander et al, 1995; Eckert & Watson, 1996; Nathan et al, 2002; Sikora et al, 2005; Pittman et al, 2005).

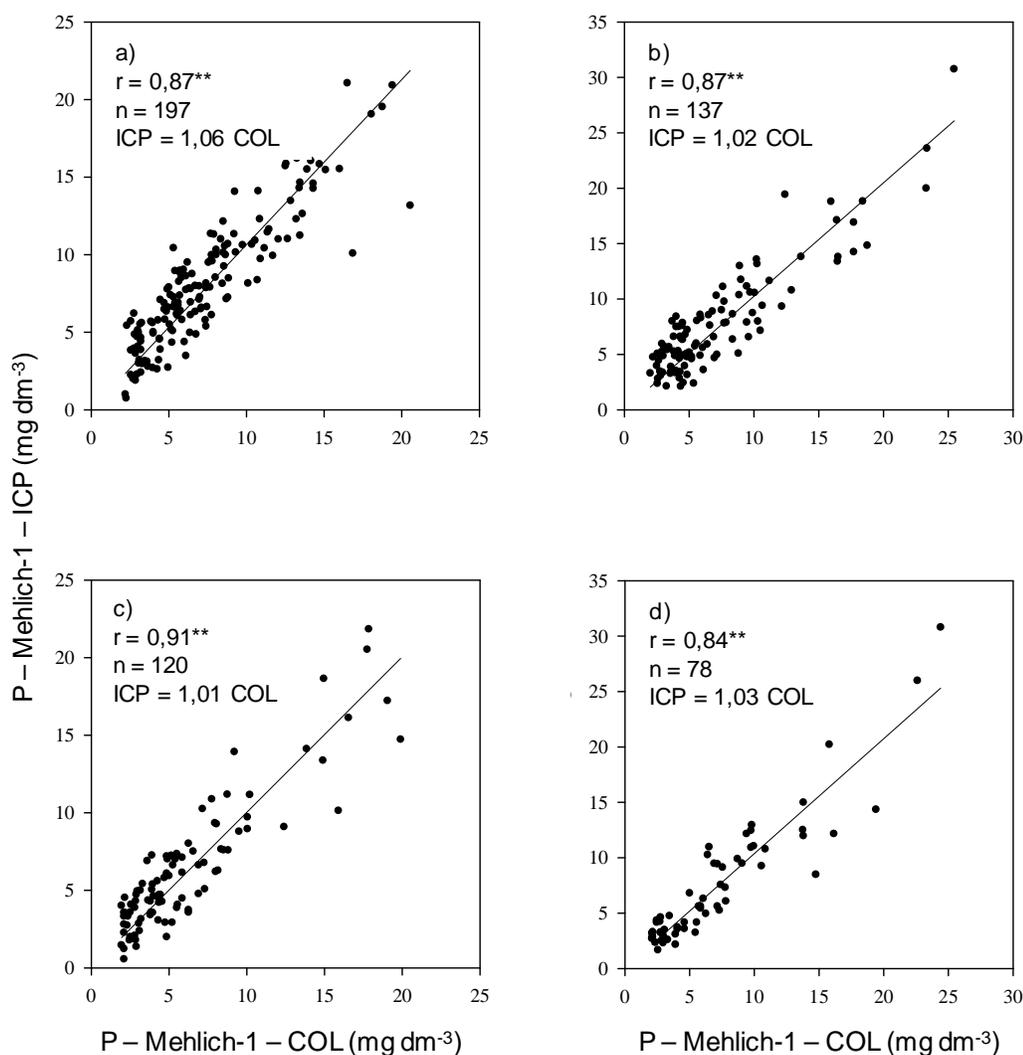


Figura 5.2. Relações entre os teores de P extraído pela solução de Mehlich-1 determinado por colorimetria (COL) e por ICP, conforme as classes de textura: a) classe 1: > 60%; b) classe 2: 40-60%; c) classe 3: 20-40%; d) classe 4: < 20% de argila, respectivamente.

Foi feita a relação entre as quantidades de  $P_2O_5$  recomendadas para o milho (expectativa de rendimento de  $8,0 \text{ t ha}^{-1}$ ) utilizando-se os teores de P determinado por COL e por ICP. Para esta relação foram utilizadas as amostras (532) com teores no solo menores  $30 \text{ mg dm}^{-3}$ . Neste conjunto, as amostras foram divididas em seis intervalos de teores de P, determinados por COL:  $2,0 \text{ a } 4,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ;  $4,0 \text{ a } 8,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ;  $8,0 \text{ a } 12,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ;  $12,0 \text{ a } 14,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ;  $14,0 \text{ a } 20,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ; e  $> 20 \text{ mg dm}^{-3}$ .

Após esta classificação foi calculada a média dentro de cada intervalo; com os valores assim obtidos foi feita a recomendação de adubação conforme a CQFS (2004). As relações entre as quantidades recomendadas de  $P_2O_5$  para a cultura do milho apresentaram um alto grau de associação e diminuíram com o aumento do teor de P no solo (Figura 5.3). As quantidades médias de  $P_2O_5$  recomendadas para a cultura do milho não diferiram entre as metodologias de determinação de P. A separação dos solos por classes de argila não afetou a estimativa das doses (dados não mostrados). Os interceptos das equações de regressão ajustados para os dados não diferiram estatisticamente, sendo semelhantes para as duas metodologias, independentemente da classe de argila. A tabela de interpretação do teor de P estabelecido pelo método colorimétrico pode ser, portanto, utilizada para a interpretação dos valores de P determinado por ICP, sendo recomendadas quantidades semelhantes de fertilizante fosfatado para as culturas.

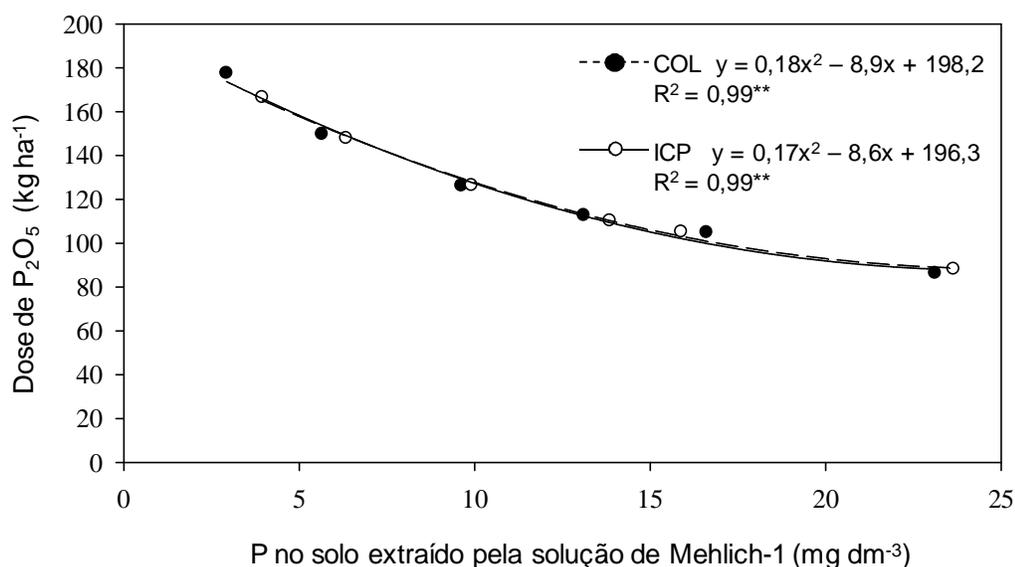


Figura 5.3. Relações entre os teores de P extraído pela solução de Mehlich-1 determinado por colorimetria (COL) e por ICP, e as doses de  $P_2O_5$  recomendadas para o milho (para uma expectativa de rendimento de  $8,0 \text{ t ha}^{-1}$ ).

#### **5.4. CONCLUSÃO**

A técnica de espectrometria de emissão atômica por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) pode ser utilizada para a determinação do P extraído do solo pela solução de Mehlich-1 em solos do Estado do Rio Grande do Sul, e a interpretação dos teores de P determinado por esta técnica pode ser feita com a tabela estabelecida para o método.

## 5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; KROTH, P.L. Extração simultânea de P, K, Ca, Mg, Cu e Zn pela solução de Mehlich-1 determinados por ICP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007a, Gramado, RS. **Anais...Viçosa**, 2007a. CD-ROM.
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; KROTH, P.L. Fósforo extraído do solo pela solução de Mehlich-1 determinado por colorimetria e por ICP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007b, Gramado, RS. **Anais...Viçosa**: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007b. 1CD-ROM.
- BOSS, C.B.; FREDEEN, K.J. **Concepts, instrumentation and techniques in inductively coupled plasma optical emission spectrometry**. Shelton: Perkin Elmer, 2004. 76p.
- ECKERT, D.J.; WATSON, M.E. Integrating the Mehlich-3 extractant into existing soil test interpretation schemes. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.27, n.6, p.237-1249, 1996.
- HYLANDER, L.D.; SVENSSON, H.I.; SIMAN, G. Comparison of different methods for determination of phosphorus in calcium chloride extracts for prediction of availability to plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.26, n5, p.913-925, 1995.
- MALLARINO, A.P. Field calibration for corn of the Mehlich-3 soil phosphorus test with colorimetric and inductively coupled plasma emission spectroscopy determination methods. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, n.6, p.1928-1934, 2003.
- MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH<sub>4</sub> by North Carolina Soil Testing Laboratories**. Raleigh: University of North Carolina, 1953. 4p.
- MILAGRES, J. J. M. ; ALVAREZ V., V. H. ; GONÇALVES, J.G. Determinação de P extraído do solo por Mehlich-1 e Mehlich-3 e dosado por espectrometria de emissão ótica em plasma induzido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007b, Gramado, RS. **Anais...Viçosa**, 2007b. CD-ROM.

- MUNTER, R.C. Advances in soil testing and plant analysis analytical technology. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.21, n.9, p.1831-1841, 1990.
- NATHAN, M.V.; MALLARINO, A.P.; ELIASON, R.; MILLER, R. ICP vs. colorimetric determination of Mehlich III extractable phosphorus. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.33, n.11, p.2432, 2002.
- PITTMAN, J.J.; ZHANG, H.; SCHRODER, J.L.; PAYTON, M.E. et al. Differences of phosphorus determined by colorimetric and spectroscopy methods. **in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.36, n.7, p.1641-1659, 2005.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre : SBSC/NRS, 2004. 410p.
- SIKORA, F.J.; HOWE, P.S.; HILL, L.E.; REID, D.C.; HAROVER, D.E. Comparison of colorimetric and ICP determination of phosphorus in Mehlich3 soil extracts. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.36, n.5, p.875-887, 2005.
- SKOOG, D.A. et al. **Princípios de análise instrumental**. Porto Alegre: Bookman, 2002. 628p.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5).

## **CAPÍTULO V**

### **POSSIBILIDADES PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DO USO DO FÓSFORO NA AGRICULTURA E PARA A PROTEÇÃO AMBIENTAL**

## 6.1. INTRODUÇÃO

O P é um nutriente essencial para todas as formas de vida, sendo utilizado intensivamente na agricultura para a produção de alimentos. Em solos tropicais, o P é um nutriente limitante para as culturas, requerendo a aplicação de alta quantidade de fertilizante fosfatado para a obtenção de rendimentos adequados. Devido a esse enfoque, muitos produtores que cultivam o solo sob sistemas conservacionistas de manejo, como o plantio direto, aplicam quantidades de P no solo maiores que as necessárias, originando um acúmulo desse nutriente em superfície (Sá, 1993; 1999; Rheinheimer, 2000), principalmente na camada de zero-2,5 cm, podendo atingir valores próximos a  $100 \text{ mg dm}^{-3}$  (P-M<sub>1</sub>).

O acúmulo de P nessa profundidade pode deteriorar a qualidade da água, pela transferência do P pela enxurrada. O P originado da agricultura é reconhecidamente poluidor de águas superficiais (Sharpley et al., 2008) e práticas adequadas de manejo do P devem ser adotadas para o melhor aproveitamento deste nutriente no processo produtivo.

Há anos, países como os Estados Unidos, Reino Unido e Holanda, adotaram medidas para otimizar o processo produtivo com ênfase no manejo do P. Por exemplo, nos Estados Unidos foram implantadas as denominadas “melhores práticas de manejo do P” (*best managements practices - BMP of P*), visando a aumentar a eficiência do uso do P na agricultura para proteger o sistema aquático (Sharpley et al., 2003).

As medidas diferem conforme o nível de aplicabilidade, sendo agrupadas em quatro grupos principais, sendo: (a) controle local (na propriedade) e em micro bacia hidrográfica, (b) controle de P na dieta animal visando ao uso dos dejetos animais como fonte de P; (c) manejo adequado de fontes de P; e (d)

manejo dos processos de transferência do P de áreas agrícolas para águas superficiais (Sims & Kleinmann, 2005). Considerando a realidade brasileira, em especial o estado do RS, algumas dessas “melhores práticas” de manejo de P poderiam ser introduzidas, com o objetivo de reduzir as perdas desse nutriente para o ambiente. Desta forma, aumentar-se-ia a eficiência do uso do P na agricultura, pela redução dos impactos na qualidade da água e pela reciclagem do P (dejetos de animais), contribuindo para a sustentabilidade da produção agrícola a longo prazo, e reduzindo o consumo das reservas finitas de P.

## 6.2. TEORES DE FÓSFORO E MANEJO DO SOLO

A implementação de práticas de manejo de P depende de fatores de natureza econômica, social e política. Porém, há algumas práticas que podem ser facilmente implementadas sem uma dependência direta de outros fatores.

No âmbito de microbacia hidrográfica, o uso do solo em conformidade com a sua aptidão é uma prática de fácil execução. No estado do RS, são frequentemente utilizadas terras em desacordo com sua capacidade de uso, como por exemplo, áreas com solos arenosos, rasos e de declividade acentuada, utilizadas para produção de fumo, olerícolas ou horticultura, frequentes nas regiões da Serra, Depressão Central e no Litoral. Em muitos casos é utilizado o sistema convencional de cultivo, propiciando a perda de P do solo para o ambiente aquático. Além disso, lavouras para produção de grãos sob plantio direto estão localizadas em áreas de declive acentuado. Neste último caso, devido à alta frequência de teores de P nas classes “alto” e “muito alto”, é utilizada a adubação das culturas a lanço e em superfície; esta prática constitui um grande potencial de perda de P em solos sob plantio direto, sendo necessária a adequação da capacidade de uso do solo ou a adoção de práticas de controle da erosão hídrica.

Outra alternativa viável para otimizar o manejo do P é a utilização da análise de solo. Nos estados do RS e de SC é utilizado o sistema de recomendações de adubação e de calagem para as culturas (CQFS, 2004) baseado na análise de solo e no rendimento das culturas. Assim, a utilização dos teores de P no solo associada às formas de aplicação do adubo fosfatado menos suscetíveis à erosão podem ser uma ferramenta útil para reduzir o impacto da adubação fosfatada para o ambiente, conforme comentado no Capítulo III. No entanto, o extrator de Mehlich-1 utilizado para avaliar a disponibilidade de P para as plantas não associa o aumento da disponibilidade de P no solo com os aumentos do pH ou dos teores de matéria orgânica (Figura 6.1). Pode-se observar na Figura 6.1 que a ocorrência de um grande

número de solos com teores de P até  $20 \text{ mg dm}^{-3}$ , e com valores de pH menores que 5,5, com possível ocorrência de Al trocável.

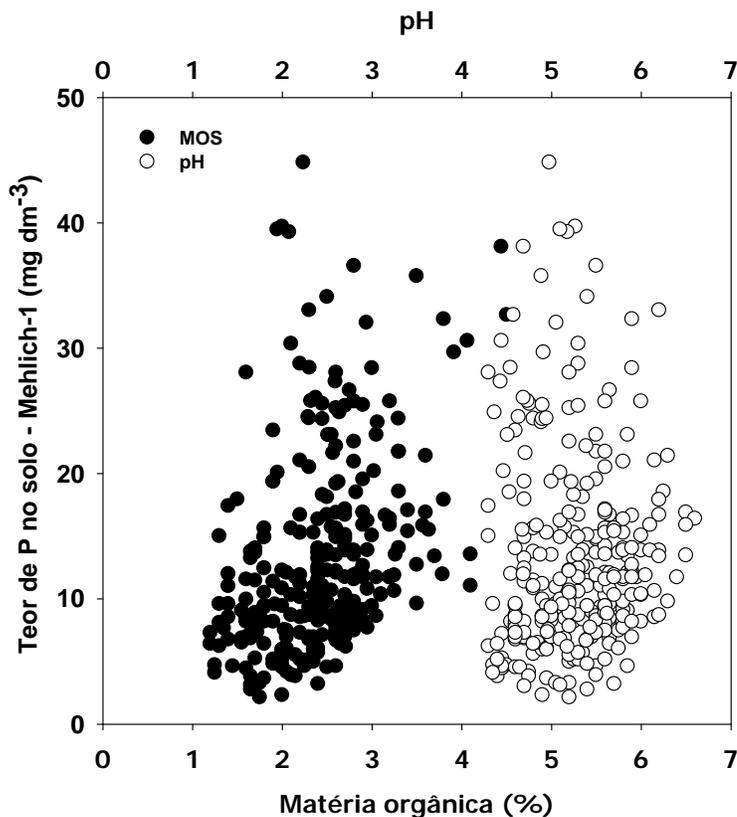


Figura 6.1. Relações entre o teor de P no solo extraído pela solução de Mehlich-1 e os teores de matéria orgânica (MOS) e os valores de pH em água em amostras de solo sob plantio direto (Informação do laboratório de Análise de Solos - UFRGS, 2008).

#### 6.2.1. Propriedades químicas do solo

A utilização de classes de pH e de teores de matéria orgânica do solo poderia ser considerada como alternativa viável para aumentar a confiança na estimativa de interpretação da disponibilidade de P para as culturas.

Este procedimento pode ser testado utilizando-se os dados obtidos por Nicolodi (2003) em 125 lavouras de soja e cevada sob plantio direto consolidado, nos municípios de Cruz Alta, Não-me-Toque e Ibirubá, no estado do RS. Os teores de argila variaram de 3 a 75%; os teores de P no solo variaram de 2,3 a 36,6  $\text{mg dm}^{-3}$ ; os teores de MOS variaram de 1,2 a 3,8%; os valores de pH em água variaram de 4,3 a 4,2; os rendimentos variaram de 0,2 a 6,0  $\text{kg ha}^{-1}$ ; e o rendimento relativo variou de 7 a 100% (Tabela 6.1). Foi calculada a correlação entre o rendimento relativo destas culturas e os teores de P no solo, nas diferentes classes de interpretação utilizadas atualmente (CQFS, 2004).

Pode-se observar na Tabela 6.2 que os coeficientes de correlação foram estatisticamente significativos nas classes de interpretação “muito baixo”, “baixo” e “médio” dos teores de P no solo. Na curva média de respostas das culturas à adubação fosfatada, estas classes situam-se abaixo do teor crítico de P, que representa a obtenção de 90% do rendimento relativo. Nos locais em que os teores de P no solo situaram-se nas classes “alto” e “muito alto”, a correlação não foi significativa. Estas classes correspondem às situações em que é recomendada a adubação fosfatada de manutenção (classe “alto”) ou de reposição (classe “muito alto”) (CQFS, 2004). Nestas duas situações, a quantidade recomendada de adubo fosfatado poderia ser excessiva ou com baixa eficiência, gerando desperdício de P e poluição ambiental, caso ocorra erosão do solo. Deve-se salientar, entretanto, que a população das lavouras estudadas é bastante homogênea quanto aos fatores de clima, solo, práticas culturais, etc. Em condições diferentes, entretanto, foi observada resposta positiva à adubação fosfatada, mesmo com teores de P nas classes “alto”, conforme foi apresentado no Capítulo III.

Tabela 6.1. Estatística decritiva de alguns atributos<sup>1</sup> e dados de rendimento<sup>2</sup> das áreas utilizadas.

Parâmetros	Argila	P	MOS	pH	Rend	RR
	%	mg dm <sup>-3</sup>	%		kg ha <sup>-1</sup>	%
Mínimo	34	2,3	1,2	4,3	0,2	7
Máximo	75	36,6	3,8	6,2	6,0	100
Média	36	14,2	2,3	5,3	3,5	75
Mediana	37	12,4	2,4	5,3	3,6	80

<sup>1</sup> Tedesco et al. (1995); MOS: matéria orgânica do solo. <sup>2</sup> Rend: rendimento; RR: rendimento relativo

Tabela 6.2. Coeficientes correlação (r) entre os teores de P nas diferentes classes de interpretação e o rendimento relativo das culturas.

Classes de interpretação dos teores de P <sup>1</sup>	Rendimento relativo
	---- r ----
Muito Baixo	0,30*
Baixo	0,43*
Médio	0,53*
Alto	-0,28 <sup>ns</sup>
Muito Alto	-0,07 <sup>ns</sup>

<sup>1</sup> Conforme a CQFS (2004); \* coeficiente de correlação significativo à 95% de probabilidade; <sup>ns</sup>: não significativo

Foram também calculadas as correlações entre os rendimentos relativos das culturas obtidos nas 125 lavouras (Nicolodi, 2003), nas diferentes classes de interpretação dos teores de P no solo e os valores de pH (em água) e os teores de matéria orgânica (Tabela 6.3). Pode-se observar que foram obtidos coeficientes de correlação significativos nos casos em que os teores de P no solo situaram-se abaixo do teor crítico (“muito baixo”, “baixo” e “médio”), em solos com pH <5,5 e teor baixo de matéria orgânica ( $\leq 2,5\%$ ). Nestes caso há possibilidade de ocorrência de Al trocável, que prejudica o desenvolvimento das culturas. Semelhantemente ao que foi observado para o rendimento (Tabela 6.2), não foi observada correlação nas doses “alto” e “muito alto” de teores de P. Entretanto, coeficientes de correlação estatisticamente significativos foram também obtidos nos casos em que os teores de P situaram-se nas classes “alto” e “muito alto”, em solos ácidos (pH <5,5), mas com teor mais alto de matéria orgânica (> 2,5) (Tabela 6.3). O adubo fosfatado nesse caso pode ter apresentado efeito neutralizante da acidez, potencializado pelo maior teor de matéria orgânica do solo.

Tabela 6.3. Coeficientes de correlação (r) entre os teores de P nas diferentes classes de interpretação e o rendimento relativo das culturas, em duas classes de pH e do teor de matéria orgânica dos solos.

Classes de Interpretação dos teores de P <sup>1</sup>	Classe pH			
	<5,5		≥5,5	
	Classe de matéria orgânica do solo (%)			
	≤2,5	2,6-5,0	≤2,5	2,6-5,0
Muito Baixo	0,46*	-	-	-
Baixo	0,48*	-	-	-
Médio	0,53*	-	-	-
Alto	-0,04 <sup>ns</sup>	0,45*	0,46*	0,11 <sup>ns</sup>
Muito Alto	0,08 <sup>ns</sup>	0,43*	0,19 <sup>ns</sup>	-0,10 <sup>ns</sup>

<sup>1</sup> Conforme a CQFS (2004); \* coeficiente de correlação significativo à 95% de probabilidade; <sup>ns</sup>: não significativo

No sistema plantio direto, solos com valores que propiciam a ocorrência de Al trocável (pH <5,5) podem indicar que: a) a correção inicial da acidez do solo foi inadequada; b) a manutenção de valores adequados de pH no solo (>5,5) está sendo descuidada; e/ou, c) a perda de solo por erosão superficial está ocorrendo em quantidades excessivas para este sistema.

O levantamento feito por Nicolodi (2003) não inclui um número suficiente de pontos para calcular as correlações em todas as classes de teores de P. Como primeira aproximação, poder-se-ia conduzir um estudo em vasos, com as diferentes classes de teores de P e de matéria orgânica, em

dois níveis de pH do solo, conforme previsto na Tabela 6.3. Poderiam ser coletadas amostras indeformadas de solo, utilizando-se o equipamento descrito no Capítulo II.

### 6.2.2. Práticas de controle da erosão

A eficiência do uso do P na agricultura pode ser aumentada com a utilização de práticas conservacionistas adequadas para o controle do transporte do solo e água em lavouras (Sharpley et al., 2008). Atualmente no estado do RS estão sendo descuradas as práticas conservacionistas de suporte no sistema plantio direto como terraços, curvas de nível, plantio em contorno, cultivo em faixas, além da aplicação de fertilizante fosfatado (mineral ou orgânico) a lanço em superfície, e não raramente com máquinas e equipamentos inadequados. Desta maneira há necessidade de incentivar a utilização das práticas conservacionistas, a sustentabilidade da produção agrícola, e a redução da transferência do P para o ambiente aquático.

A aplicação de P visando à redução de perda deste nutriente, conforme proposto por Whitters et al. (2003) (Tabela 6.4), pode ser feita pela identificação de áreas de risco. Para tanto, devem ser considerados: a) as classes de aptidão; b) a posição na paisagem; c) o tipo de solo, o regime hídrico e a intensidade das chuvas. Além disso, deve ser considerado o tipo de manejo do solo, o teor de P (disponível e suscetível à erosão) e a fonte a ser utilizada, propiciando o estabelecimento de doses, fonte e época de aplicação de P.

Tabela 6.4. Esquema para o manejo adequado das terras de acordo com o risco de perda de fósforo.

	Risco de perda de P na área			
	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Situação ba paisagem	Sem conexão direta com águas superficiais	Indireta (conexão com águas superficiais)	Rápida e direta conexão com águas superficiais	Prolongada conexão com águas superficiais
Forma de manejo	Sem restrições	Risco facilmente sevitado pelo controle da erosão	Restrições de uso no caso do controle de erosão não reduzir as perdas	Vedado o uso agrícola
Práticas requeridas	Práticas básicas de controle da erosão	Práticas básicas de controle da erosão	Práticas básicas de controle da erosão; adequação de doses, fontes e época de aplicação de P	Vedado o uso agrícola

O esquema proposto por Whilters et al. (2003) pode ser inserido nas condições do estado do RS, pois as ações necessárias para a redução das perdas de P são as práticas básicas de controle da erosão hídrica (terraços, plantio em contorno, cultivo em faixas, etc.). É necessário, portanto, estabelecer o risco de perda de P conforme a classificação da capacidade de uso do solo. No entanto, o estabelecimento da capacidade de uso das terras a campo apresenta alto custo.

Este procedimento pode ser exemplificado para o local em que foi conduzido o experimento de campo, no Distrito Santana do município de Ijuí, RS. A partir do levantamento geográfico, pode ser elaborado o mapa de elevações do terreno (em metros), conforme mostrado na Figura 6.2. Os elementos da paisagem (áreas deposicionais, encostas e topos das elevações do terreno) são localizadas a seguir (Figura 6.3).

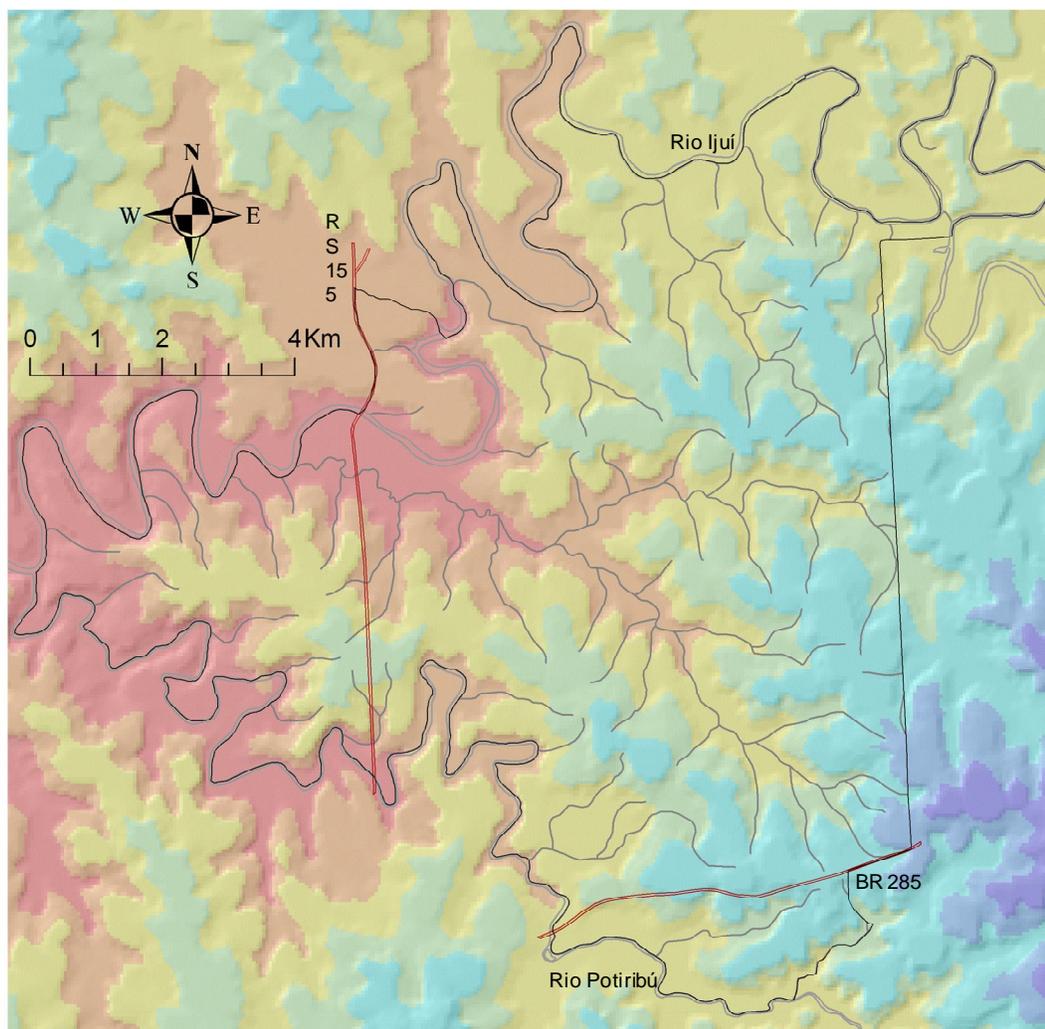
Com base nesses mapas, pode-se utilizar o sistema de informações geográficas, e imagens de satélite para localizar as áreas com risco de perda de P, estabelecendo-se as classes de risco; nesta avaliação, pressupõe-se que a elevação do terreno associada à posição na paisagem (proximidade do ambiente aquático) potencializa a transferência do P para esse ambiente, por transporte pela água da enxurrada. Conforme é mostrado na Figura 6.4, podem ser delimitadas na imagem de satélite as áreas com potencial de risco de perda de solo (e de P). Esta informação é essencial para a assistência técnica aos produtores.

Após a geração desses mapas, podem ser determinados os teores de P nessas áreas e estabelecidas as classes de disponibilidade, com a finalidade de indicar as melhores práticas de manejo de P para cada caso. Deste modo, pode-se otimizar o uso do P na agricultura, mantendo a sustentabilidade da atividade agrícola ao longo do tempo.

No entanto, para aumentar a acuracidade desta proposição, são necessários estudos "in situ" de avaliação de perdas de solo, água e P em cada classe de risco de perda de P. Podem ser testados níveis, fontes e modos de aplicação de P, além da intensidade, duração e frequência da chuva, visando, ambos, o rendimento das culturas com máximo retorno econômico e a proteção da qualidade da água (Sharpley et al., 2008).

A avaliação “in situ” pode ser feita utilizando a metodologia estabelecida pelo SERA-17 (*Southern Extension-Research Activity, 17th group*) descrita no “*National P Research Project Protocols*” (<http://www.sera17.ext.vt.edu>) onde é dada a descrição de simuladores de chuva para avaliação “in situ” (Sharpley et al., 2003; Shigaki et al., 2006), ou coleta de amostras de solo de cada local e avaliação das perdas (solo, água e P) em condições controladas (“Indoor”) (Shigaki et al., 2007). As metodologias propostas pelo SERA-17, tanto em campo quanto e em laboratório, podem ser extrapoladas para uma microbacia hidrográfica (Sharpley et al., 2003). A utilização combinada de mapeamento de solos, com avaliação das perdas de P nas condições citadas, podem contribuir significativamente para o aumento da eficiência do uso do P na agricultura brasileira, reduzindo o impacto econômico provocado pelas perdas de P em áreas de risco, e protegendo o ambiente aquático pela adequação do manejo do uso da terra e da adubação fosfatada.

Este procedimento pode ser inicialmente oneroso. Em áreas que apresentam topografia uniforme, entretanto, a possibilidade de extrapolação dos resultados obtidos pode viabilizar o custo do projeto inicial.



### Legenda

Distrito Santana, Ijuí - RS

Rodovias

Hidrografia

### Modelo de elevação (m)

220 - 270

280 - 290

300 - 310

320 - 330

340 - 360

370 - 390

400 - 420

Figura 6.2. Mapa hipsométrico do Distrito Santana, município de Ijuí-RS, obtido do modelo numérico do terreno, por interpolação das curvas de nível espaçadas de 20 em 20 metros (Brasil, 1980). (Informações obtidas por Bortolon, 2008, com permissão).

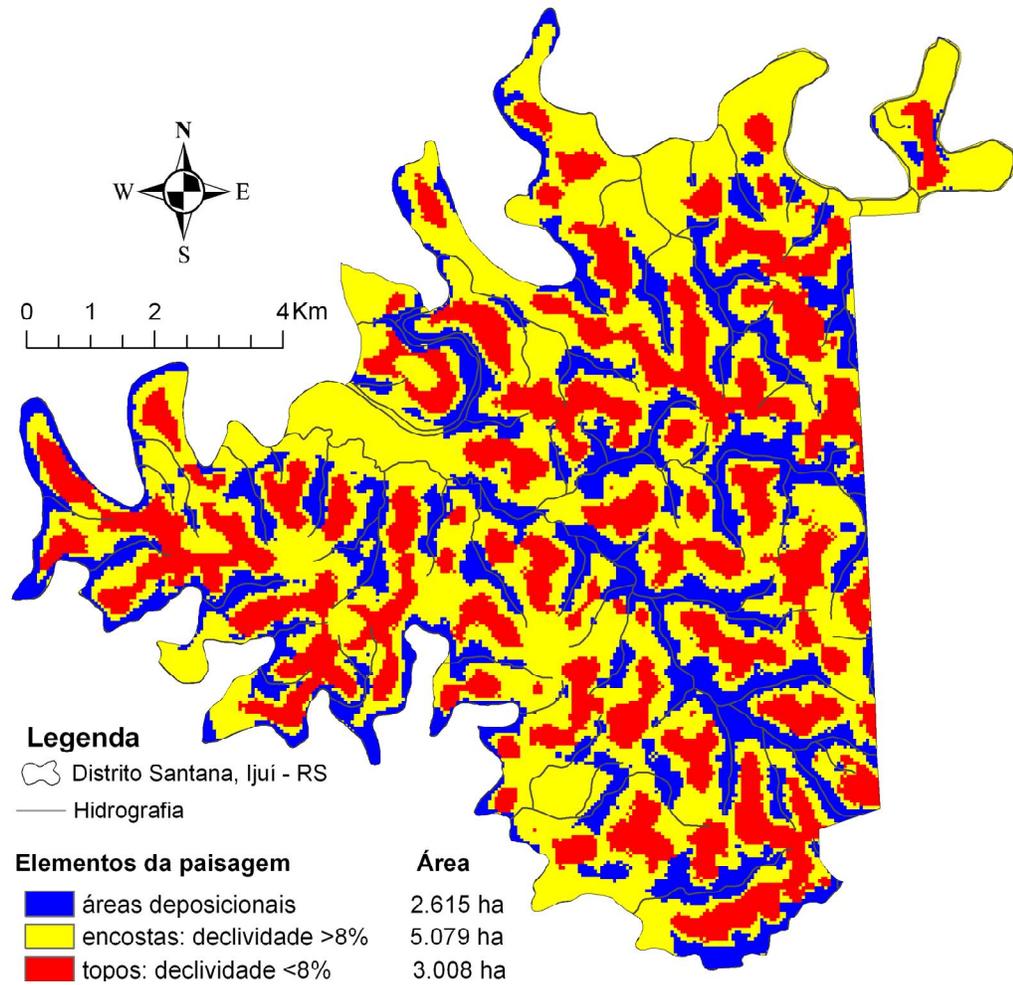


Figura 6.3. Elementos da paisagem obtido do modelo numérico do terreno, com base nas curvas de nível espaçadas de 20 em 20 m (Brasil, 1980), para o Distrito Santana, município de Ijuí-RS. (Informações obtidas por Bortolon, 2008, com permissão).

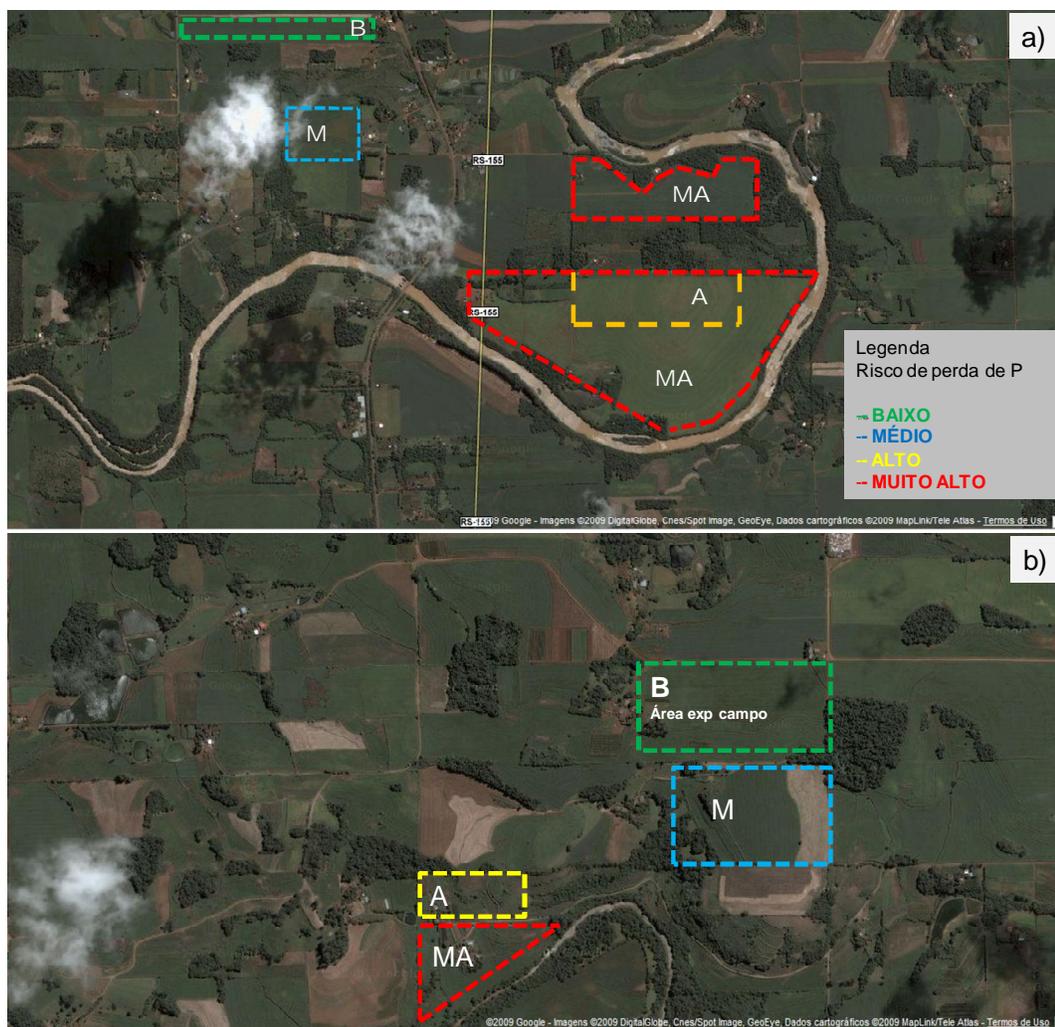


Figura 6.4. Imagens de satélite da região do Distrito Santana, município de Ijuí, RS, com a classificação das áreas de risco (a) de acordo com a elevação, a posição na paisagem, a hidrologia e a proximidade das áreas dos recursos hidrológicos. No mapa (b), a área classificada como baixo representa onde o experimento de campo foi conduzido.

### **6.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As práticas destinadas a reduzir as perdas de P e aumentar a sua eficiência na agricultura podem ser aplicadas com investimentos relativamente baixos no estado do Rio Grande do Sul. O uso da análise de solo, com separação das classes de disponibilidade de P de acordo com o valor de pH e o teor de matéria orgânica, poderá ser melhor estudado em condições controladas, em diferentes níveis de P, pH e matéria orgânica do solo e avaliando-se o rendimento das culturas. O uso de técnicas de levantamento do solo e mapeamento digital é uma alternativa eficaz para estabelecer potenciais áreas de risco, podendo-se indicar as práticas mais adequadas de manejo do adubo fosfatado.

#### 6.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORTOLON, E.S.O. **Simulação do impacto da agricultura sobre os estoques de carbono orgânico do solo e o balanço de CO<sub>2</sub> regionais integrando o modelo century e sistemas de informação geográfica.** 176f. 2008. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- BRASIL. **Folha topográfica 1:50.000 Ijuí.** Brasília. Ministério do Exército. Diretoria de Serviços Geográficos, 1980. (Folha SH.22 VAI3, MI-2915/3).
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** Porto Alegre: SBCS-Núcleo Regional Sul, 2004. 410p.
- NICOLODI, M. **Indicadores para a tomada de decisão para a calagem no sistema plantio direto.** 131f. 2003. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- RHEINHEIMER, D.S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos.** 211f. 2000. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- SÁ, J.C.M. **Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto.** Castro : Fundação ABC, 1993. 96p.
- SÁ, J.C.M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.(Eds.) **Interrelações fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas.** Lavras : UFLA, 1999. p.237-319.
- SHARPLEY, A.N.; KLEIMANN, P.J.A.; HEATHWAITE, A.L. Phosphorus loss from an agricultural watershed as a function of storm size. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v,37, n.2, p.362-368, 2008.
- SHARPLEY, A.N.; WELD, J.L.; BEEGLE, D.B.; KLEINMAN, P.J.A.; GBUREK, W.J.; MOORE, P.A., Jr.; MULLINS, G. Development of phosphorus

indices for nutrient management planning strategies in the U.S. **Journal of Soil and Water Conservation**, Madison, v.58, n.1, p.137- 52, 2003.

SHIGAKI, F.; SHARPLEY, A.N.; PROCHNOW, L.I. Source-related transport of phosphorus in surface runoff. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.35, n.8, p.2229-2235, 2006.

SHIGAKI, F.; SHARPLEY, A.N.; PROCHNOW, L.I. Rainfall intensity and phosphorus source effects on phosphorus transport in surface runoff from soil trays. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.373, n.3, p.334-343, 2007.

SIMS, J.T.; KLEINMAN, P.J.A. Managing agricultural phosphorus for environmental protection. In: SIMS, J.T.; SHARPLEY, A.N.(Eds). **Phosphorus : Agriculture and the Environment**. Madison : American Society of Agronomy, 2005. p. 1021-1068.

WITHERS, P.J.A.; ULEN, B.; STAMM, C.; BECHMANN, M. Incidental phosphorus losses – are they significant and can they be predicted? **Journal of Plant Nutrition and soil Science**, Toquio, v.166, n.2, p.459-168, 2003.

## **7. CONCLUSÕES FINAIS**

As amostras de solo coletadas com o equipamento proposto podem ser utilizadas para estudos em condições controladas. Há resposta das culturas ao fósforo em solos com diferente histórico de uso e manejo. As doses e o teor de fósforo onde foram obtidos os maiores rendimentos são maiores dos atualmente recomendados. A metodologia de coleta de amostras indeformadas de solo é eficiente para avaliar a resposta do fósforo em condições controladas. A adição de fósforo no solo aumenta as formas de fósforo suscetíveis à erosão, favorecendo as perdas e a eutrofização.

Foi observada resposta das culturas à adubação fosfatada em solos com diferentes históricos de uso e manejo, com adição de doses de P maiores do que as atualmente recomendadas. O teor crítico de P foi duas vezes maior do que está sendo utilizado. O uso de amostras indeformadas é eficiente para o estudo da resposta das plantas à adubação fosfatada. O aumento das doses de P pode propiciar perdas de P por erosão, em formas suscetíveis de serem transportadas pelo escoamento superficial.

Foram utilizados neste estudo solos argilosos, com alta capacidade de retenção de fósforo. Se forem considerados os mesmos princípios para solos com menores teores de argila, o potencial de risco de perda de fósforo é ainda maior. Desta maneira, é importante o estabelecimento de melhores práticas de manejo de fósforo na agricultura, frente aos desafios de aumento na demanda global por alimentos e produção de bioenergia, declínio das reservas finitas de rocha fosfática para suprimento global e a proteção da qualidade da água.

## 8. RESUMO BIOGRÁFICO

Leandro Bortolon, filho de Ady João Bortolon e Maria Machado Bortolon, nasceu em 03 de novembro de 1978, em Xanxerê, Santa Catarina. Estudou no Colégio La Salle, completando a formação elementar e a formação no ensino médio. Em 1997 ingressou na Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” da Universidade Federal de Pelotas, graduando-se como Engenheiro Agrônomo em 2003. Em março de 2003 iniciou seus estudos de Mestrado em Ciência do Solo no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do sul, obtendo o grau de Mestre em Ciência do Solo em agosto de 2005. De setembro de 2004 a Julho de 2005 foi coordenador de pesquisa em fertilidade do solo na Fundação Rio Verde (Lucas do Rio Verde, MT), e no mesmo período foi consultor agrônomo na região Médio Norte do MT. De setembro de 2005 até março de 2006 foi pesquisador associado do Laboratório de Análises de Solos da Universidade do Rio Grande do Sul. Em março de 2006 iniciou seus estudos de Doutorado em Ciência do Solo no Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. No período de setembro de 2008 a setembro de 2009 realizou estágio de doutoramento no *USDA-ARS-National Laboratory for the Agriculture and Environment*, Ames, Iowa, sob a orientação do Ph.D. John L. Kovar. Casou-se com Elisandra Solange Oliveira em maio de 2008. Recebeu em 2009 o prêmio internacional “*IPNI Scholar Award - In recognition of an outstanding scholastic record, and in appreciation of contributions to the agricultural sciences*”. É membro da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, do Núcleo Regional Sul e do International Union of Soil Science desde 2007; e da Soil Science Society of America, Agronomy Society of America e Crop Science Society of America desde 2008.