

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

**FORMAS E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS CULTIVADOS
COM ARROZ IRRIGADO NO RIO GRANDE DO SUL**

GUSTAVO KRÜGER GONÇALVES
(Tese)

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

**FORMAS E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS CULTIVADOS
COM ARROZ IRRIGADO NO RIO GRANDE DO SUL**

GUSTAVO KRÜGER GONÇALVES

Engenheiro Agrônomo (UFPel)

M.SC. Ciência do Solo (UFPel)

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

Porto Alegre (RS) Brasil

Maio de 2007

CIP - CATALOGAÇÃO INTERNACIONAL NA PUBLICAÇÃO

Gonçalves, Gustavo Krüger

Formas e disponibilidade de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul / Gustavo Krüger Gonçalves. -- Porto Alegre: G.K. Gonçalves 2007.

xx, 168f. : il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo,
Porto Alegre, 2007.

1. extratores : características eletroquímicas : fracionamento. Título

CDD:

CDU:

Catálogo na publicação:

Biblioteca Setorial da Faculdade de Agronomia da UFRGS

GUSTAVO KRÜGER GONÇALVES
Engenheiro Agrônomo (UFPel)
Mestre em Ciência do Solo (UFPel)

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

EGON JOSÉ MEURER
Professor Orientador
PPG - Ciência do Solo

RENATO LEVIEN
Coordenador do PPG - Ciência do
Solo

IBANOR ANGHINONI
Departamento de Solos/UFRGS

WALKYRIA BUENO SCIVITTARO
Embrapa Clima Temperado

GILMAR ARDUÍNO B. MARODIN
Diretor da Fac. de Agronomia

LEANDRO SOUZA DA SILVA
Departamento de Solos/UFSM

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Egon José Meurer, pela orientação e ensinamentos transmitidos durante a realização do curso;
- À Capes pela concessão da bolsa de Doutorado;
- Aos Professores Carlos Alberto Bissani e Cimélio Bayer, pelo empenho na obtenção de bolsas de estudos e outros recursos necessários para a realização das pesquisas dos discentes de mestrado e doutorado;
- Aos Professores Humberto Bohnen e Rogério Oliveira de Sousa pelas sugestões;
- Ao PPG Ciência do Solo/UFRGS e seus professores, pela formação acadêmica e convivência;
- Aos colegas do PPG Ciência do Solo/UFRGS e em especial à Edicarlos, Felipe, João Paulo, Marcio Wally, Sérgio, Sheila e Veridiana;
- À minha esposa Daiana pela compreensão, carinho, amizade e amor;
- Aos meus pais Altair e Nara pelo amor transmitido no decorrer da minha vida;
- A meu irmão caçula Matheus, companheiro constante nos jogos do Xavante;
- Aos meus sogros Evaldir e Islândia pela amizade e carinho;
- A Lourdes e Omar, amigos de qualquer ocasião e apoio constante;
- A José Luis Aires (PPG Zoocenia/UFRGS) pelas idas ao Beira-Rio;
- Aos Freis Antônio, Ademir, Gauchinho, Marcelo e Max, pela acolhida na casa Santo Antonio do Partenon;
- A Santo Antônio, pelas graças pedidas e atendidas.
- A Jesus Cristo.

FORMAS E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS CULTIVADOS COM ARROZ IRRIGADO NO RIO GRANDE DO SUL^{1/}

Autor: Gustavo Krüger Gonçalves

Orientador: Prof. Egon José Meurer

RESUMO

Os solos utilizados para a cultura de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul são oriundos de diferentes materiais de origem, os quais conferem diferentes características que afetam de forma diferenciada a disponibilidade do fósforo (P) para a cultura. As diferentes frações deste elemento nos solos podem, também, afetar a eficiência dos extratores. Com o objetivo de verificar essas diferenças, foram desenvolvidos quatro estudos. No primeiro, quantificaram-se os teores absolutos das formas de ferro (Fe) e de manganês (Mn) e a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) em seis solos e sorção do P em quatro solos durante quatro períodos de alagamento. No segundo comparou-se, em cinco solos, a eficiência de extratores para avaliar a disponibilidade de P para o arroz. No terceiro, em cinco solos, avaliou-se o efeito das características eletroquímicas e químicas na disponibilidade de P e no último estudo, avaliou-se relação entre as frações de P obtidas por fracionamento e o P acumulado pelo arroz. Os solos oriundos de sedimento de basalto apresentaram maiores teores de Fe, conferindo maior CMAP do que os solos derivados de granito e arenito. Houve sorção de P a partir dos 15 dias de alagamento no solo oriundo de sedimento de granito, enquanto os solos oriundos de sedimento de basalto apresentaram sorção no intervalo de 5 a 15 dias. A separação dos solos em dois grupos segundo os teores de Fe de baixa cristalinidade, resultou em melhor eficiência dos métodos testados para avaliar a disponibilidade de P para o arroz. Os Planossolos apresentaram redução mais rápida do Fe com liberação do P adsorvido, quando comparados aos solos oriundos de sedimento de basalto. Os teores de P acumulado pelas plantas foram associados com as frações de P Resina; Pi, Po NaHCO₃ e Pi NaOH 0,1M.

^{1/} 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. (168 p.) Maio, 2007. Trabalho realizado com apoio financeiro da Capes.

PHOSPHORUS FORMS AND AVAILABILITY IN CULTIVATED SOILS WITH FLOODED RICE IN THE RIO GRANDE DO SUL STATE, BRAZIL ^{1/}

Author: Gustavo Krüger Gonçalves

Adviser: Prof. Egon José Meurer

ABSTRACT

Soils used for the culture of flooded rice in the Rio Grande do Sul State are originated of different parent materials, resulting in different characteristics that affect the availability of phosphorus (P) for the culture. The different fractions of this element in the soils can affect the extractors efficiency. With the objective to verify these differences, four studies were carried. In the first, were determined iron (Fe) and of manganese (Mn) oxides and adsorption maxim capacity (MACP) in six soils and sorption of P in four soils for four flooding periods. In the second, were compared the extractors efficiency to evaluate the P availability to the rice in five soils. In third, the effect of the electrochemical and chemical characteristics in P availability was evaluated in five soils. In the last study, was evaluated the relationship between the P fractions obtained by the fractionation and the P accumulated by rice. The soils derived from basalt sediment presented the greatest iron forms absolute content, resulting in higher MACP than soils derived from granite and sandstone. In the soil derived from granite sediment occurred sorption from the 15° day of the flood, while in the soils derived from sediment basalt occurred sorption in the interval of 5 to 15 flooding days. The separation of soils in two groups according to the low crystalline iron oxides resulted in better efficiency of the tested methods to evaluate the availability of P to rice. The Planosols presented faster iron reduction with release of the adsorbed Fe-P, when compared with basaltic derivated soils. The P accumulated by plants were associates with the fractions of phosphorus Resin; Pi, Po NaHCO₃ and Pi NaOH 0,1M.

^{1/} Doctoral thesis in Soil Science. – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (168 p.) May, 2007. Research supported by Capes.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. CAPÍTULO I- Revisão bibliográfica	3
2.1. Características dos solos utilizados na cultura de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.....	3
2.2. Solos reduzidos.....	6
2.2.1. Alterações físicas.....	6
2.2.2. Alterações biológicas.....	6
2.2.3. Alterações eletroquímicas.....	7
2.2.4. Alterações químicas.....	9
2.2.5. Disponibilidade de fósforo.....	12
2.3. Recomendação de fósforo para a cultura de arroz irrigado.....	16
2.4. Metodologia de avaliação do fósforo disponível.....	17
2.5. Fracionamento de fósforo.....	22
3. RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS ESTUDADAS	26
4. CAPÍTULO II - Estudo 1: Óxidos de ferro e de manganês e a relação com a sorção de fósforo em solos reduzidos	29
4.1. Introdução.....	29
4.2. Hipóteses.....	31
4.3. Objetivos.....	31
4.4. Material e Métodos.....	32
4.4.1. Características e preparo dos solos.....	32
4.4.2. Extração química e quantificação dos óxidos de ferro e de manganês	32
4.4.3. Determinação do fósforo sorvido em condições oxidadas.....	33
4.4.4. Determinação do fósforo sorvido em condições reduzidas.....	35
4.5. Resultados e Discussão.....	36
4.6. Conclusões.....	46
5. CAPÍTULO III – Estudo 2: Disponibilidade de fósforo por diferentes extratores	47
5.1. Introdução.....	47
5.2. Hipóteses.....	49
5.3. Objetivos.....	49
5.4. Material e métodos.....	50
5.4.1. Características dos solos utilizados.....	50
5.4.2. Delineamento experimental e tratamentos.....	50

5.4.3. Condução do experimento.....	51
5.4.4. Análise estatística.....	52
5.5. Resultados e Discussão.....	52
5.6. Conclusões.....	60
6. CAPITULO IV – Estudo 3: Disponibilidade de fósforo em solos reduzidos oriundos de diferentes materiais de origem.....	61
6.1. Introdução.....	61
6.2. Hipóteses.....	62
6.3. Objetivos.....	63
6.4. Material e Métodos.....	63
6.4.1. Características dos solos utilizados.....	63
6.4.2. Delineamento experimental e tratamentos.....	64
6.4.3. Sistema de coleta da solução do solo.....	64
6.4.4. Condução do experimento.....	65
6.4.5. Indicadores avaliados.....	66
6.4.6. Análise estatística.....	67
6.5. Resultados e Discussão.....	67
6.5.1. pH na solução.....	67
6.5.2. Manganês na solução.....	70
6.5.3. Ferro na solução.....	73
6.5.4. Cálcio na solução.....	76
6.5.5. Fósforo na solução.....	79
6.5.6. Espécies de fósforo na solução.....	83
6.5.7. Parâmetros de plantas.....	89
6.5.7.1. Concentração de fósforo na parte aérea.....	89
6.5.7.2. Produção de matéria seca na parte aérea.....	91
6.5.7.3. Fósforo acumulado na parte aérea.....	93
6.6. Conclusões.....	95
7. CAPÍTULO V – Estudo 4: Formas de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul.....	96
7.1. Introdução.....	96
7.2. Hipóteses.....	97
7.3. Objetivos.....	98
7.4. Material e Métodos.....	98
7.4.1. Metodologia utilizada.....	98
7.5. Resultados e Discussão.....	99
7.6. Conclusões.....	110
8. CONCLUSÕES GERAIS.....	111
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	113
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
11. APÊNDICES.....	127
12. ANEXOS.....	161
13. RESUMO BIOGRÁFICO.....	168

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Semi-reações de redução de alguns compostos e seus respectivos potenciais redox.....	8
2. Recomendação de fósforo para a cultura de arroz irrigado em sistema de semeadura de solo seco... ..	17
3. Características químicas e físicas dos solos utilizados.....	34
4. Coeficiente linear (b_0), coeficiente angular (b_1) e coeficiente de determinação (R^2) da relação linear entre (P_{sol}/P_{ads}) x P_{sol} e a capacidade máxima de adsorção de fósforo (b) em seis solos orízícolas do Rio Grande do Sul.....	40
5. Teores absolutos de formas de ferro e de manganês e as relações entre os óxidos de baixa cristalinidade e cristalinos.....	41
6. Coeficientes de correlação linear simples (r) entre a CMAP e as variáveis: teores absolutos das formas de ferro e de manganês; relações entre os óxidos de baixa cristalinidade e os cristalinos nas amostras dos solos: Planossolo (SGe 3); Gleissolo; Planossolo (SGe 1); Luvissoilo; Vertissolo e Chernossolo.....	43
7. Coeficiente de correlação linear (r) entre as quantidades de fósforo extraído por diferentes métodos de extração.....	58
8. Coeficiente de determinação entre os teores de fósforo obtidos pelos extratores e as quantidades de fósforo acumulados pelas plantas de arroz considerando todos os solos como um único conjunto e separando-os em grupos de acordo com os teores de ferro de baixa cristalinidade extraídos por oxalato a pH 6.....	59
9. Fração molar de ferro na solução do solo aos 14 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados.....	84
10. Fração molar do ferro na solução do solo aos 28 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados.....	87

11. Concentração de fósforo na parte aérea das plantas de arroz em função dos tratamentos utilizados.....	91
12. Produção de matéria seca de plantas de arroz em função dos tratamentos utilizados.....	93
13. Rendimento relativo.....	93
14. Valores de fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz em função dos tratamentos utilizados.....	94
15. Teores de fósforo extraído pela Resina em função tratamentos utilizados.....	102
16. Teores de fósforo inorgânico extraídos pelo extrator NaHCO_3 em função dos tratamentos utilizados.....	103
17. Teores de fósforo orgânico extraídos pelo extrator NaHCO_3 em função dos tratamentos utilizados.....	103
18. Teores de fósforo inorgânico extraídos pelo extrator NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ em função dos tratamentos utilizados.....	103
19. Teores de fósforo inorgânico extraídos pelo extrator NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em função dos tratamentos utilizados.....	104
20. Coeficiente de correlação linear entre as frações de fósforo obtidas no fracionamento e o fósforo extraído pela Resina e Mehlich-1.....	108

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Materiais de origem dos solos utilizados na cultura de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.....	4
2. Esquema representativo da adsorção de fósforo através das ligações monodentadas e bidentadas.....	23
3. Diagrama de relacionamento das variáveis em estudo.....	27
4. Relação entre o P-solução e o P-sorvido na amostra do solo Planossolo hidromórfico eutrófico solódico.....	36
5. Relação entre o P-solução e o P-sorvido na amostra do solo Gleissolo háplico Ta distrófico.....	37
6. Relação entre o P-solução e o P-sorvido na amostra do solo Planossolo hidromórfico eutrófico arênico.....	37
7. Relação entre o P-solução e o P-sorvido na amostra do solo Luvisolo crômico pálico abruptico.....	38
8. Relação entre o P-solução e o P-sorvido na amostra do solo Vertissolo ebânico órtico típico.....	38
9. Relação entre o P-solução e o P-sorvido na amostra do solo Chernossolo ebânico carbonático vértico.....	39
10. Teor de fósforo sorvido após a adição de 200 mg kg ⁻¹ P, em amostras dos solos: Planossolo; Luvisolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas a diferentes períodos de alagamento...	44
11. Concentração de ferro na solução após a adição de 200 mg kg ⁻¹ P, em amostras dos solos: Planossolo; Luvisolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas a diferentes períodos de alagamento...	45
12. Valores de pH na solução após a adição de 200 mg kg ⁻¹ P, em amostras dos solos: Planossolo; Luvisolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas a diferentes períodos de alagamento...	45

13.	Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo; Gleissolo; Luvissolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg de P Kg ⁻¹	52
14.	Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Mehlich-3 e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo; Gleissolo; Luvissolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg de P Kg ⁻¹	54
15.	Relação entre os teores de fósforo extraídos pela Resina e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo; Gleissolo; Luvissolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg de P Kg ⁻¹	55
16.	Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Olsen e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo; Gleissolo; Luvissolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg de P Kg ⁻¹	56
17.	Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo P oxalato e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: a) Planossolo; b) Gleissolo; c) Luvissolo; d) Vertissolo; e) Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg de P Kg ⁻¹	57
18.	Sistema de coleta da solução do solo.....	64
19.	Valores de pH na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	68
20.	Valores de pH na solução do Planossolo SGe 1 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	68
21.	Valores de pH na solução do Luvissolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	69
22.	Valores de pH na solução do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	69
23.	Valores de pH na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	70

24.	Concentração de manganês na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	71
25.	Concentração de manganês na solução do Planossolo SGe 1 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	71
26.	Concentração de manganês na solução do Luvissole em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	72
27.	Concentração de manganês na solução do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	72
28.	Concentração de manganês na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	73
29.	Concentração de ferro na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	74
30.	Concentração de ferro na solução do Planossolo SGe 1 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	74
31.	Concentração de ferro na solução do Luvissole em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	75
32.	Concentração de ferro na solução do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	75
33.	Concentração de ferro na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	76
34.	Concentração de cálcio na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	77
36.	Concentração de cálcio na solução do Luvissole em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	78
37.	Concentração de cálcio na solução do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	78

38.	Concentração de cálcio na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	79
39.	Concentração de fósforo na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	80
40.	Concentração de fósforo na solução do Planossolo SGe 1 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	81
41.	Concentração de fósforo na solução do Luvisolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	81
42.	Concentração de fósforo na solução do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	82
43.	Concentração de fósforo na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	82
44.	Concentração relativa das espécies preditas de fósforo na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 14 dias de alagamento.....	84
45.	Concentração relativa das espécies preditas de fósforo na solução do Luvisolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 14 dias de alagamento.....	85
46.	Concentração relativa das espécies preditas de fósforo na solução do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 14 dias de alagamento.....	85
47.	Concentração relativa das espécies preditas de fósforo na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 14 dias de alagamento.....	86
48.	Concentração relativa das espécies preditas de fósforo na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 28 dias de alagamento.....	87

49.	Concentração relativa das espécies preditas de fósforo na solução do Luvissole em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 28 dias de alagamento.....	88
50.	Concentração relativa das espécies preditas de fósforo na solução do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 28 dias de alagamento.....	88
51.	Concentração relativa das espécies preditas de fósforo na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 28 dias de alagamento.....	89
52.	Frações de fósforo obtidas nas amostras do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	100
53.	Frações de fósforo obtidas nas amostras do Luvissole em função dos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	100
54.	Frações de fósforo obtidas nas amostras do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	101
55.	Frações de fósforo obtidas nas amostras do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	101
56.	Relação entre os teores de fósforo extraídos pela Resina e os teores de fósforo acumulado pelas plantas, nas amostras dos solos: Planossolo, Luvissole, Vertissolo e Chernossolo, submetidas aos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	106
57.	Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo $Pi NaHCO_3$ e os teores de fósforo acumulado pelas plantas, nas amostras dos solos: Planossolo, Luvissole, Vertissolo e Chernossolo, submetidas aos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	106
58.	Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo $Po NaHCO_3$ e os teores de fósforo acumulado pelas plantas, nas amostras dos solos: Planossolo, Luvissole, Vertissolo e Chernossolo, submetidas aos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	108

59.	Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Pi NaOH 0,1 mol L ⁻¹ e os teores de fósforo acumulado pelas plantas, nas amostras dos solos: Planossolo, Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo, submetidas aos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	109
60.	Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Mehlich-1 e os teores de fósforo acumulado pelas plantas, nas amostras dos solos: Planossolo, Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo, submetidas aos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.....	110

1. INTRODUÇÃO

No sistema de cultivo de arroz irrigado por alagamento, ocorre a manutenção de uma lâmina de água sobre a superfície do solo, ocasionando alterações físicas, biológicas, eletroquímicas e químicas. Dentre estas alterações, observa-se a maior disponibilidade de água as plantas, o metabolismo microbiano anaeróbico, o aumento do pH de solos ácidos e a concentração dos nutrientes na solução do solo.

A liberação de nutrientes para a solução do solo é influenciada por diversos fatores, destacando-se a disponibilidade de carbono para os microorganismos anaeróbicos, a temperatura e o pH do solo e a concentração de compostos passíveis de redução.

O alagamento do solo para o cultivo de arroz irrigado produz reações de oxirredução que podem alterar a disponibilidade de fósforo. Esta alteração depende das características eletroquímicas e químicas dos solos reduzidos, as quais estão relacionadas com os materiais de origem e com o sistema de cultivo utilizado.

A recomendação de fósforo para a cultura de arroz irrigado por alagamento foi obtida em solos derivados de arenito, siltito e granito, pertencentes à classe de solos Planossolos, ocorrendo, a partir daí, uma generalização da mesma para todos os tipos de solos, tendo sido classificada como classe solos alagados no Sistema de Recomendações de Adubação e de Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS RS/SC, 2004). Entretanto, a expansão do arroz irrigado para outras regiões agrícolas, como as localizadas na Fronteira Oeste, possibilitou a utilização de solos oriundos de sedimento de basalto, os quais podem proporcionar variações nas características mineralógicas, eletroquímicas e químicas, e

conseqüentemente, afetar a disponibilidade de fósforo de maneira diferenciada para a cultura de arroz irrigado em relação aos solos da classe Planossolos.

Os solos oriundos de diferentes materiais de origem podem, também, proporcionar diferentes formas e frações de fósforo no solo e, conseqüentemente, afetar a eficiência dos extratores desse elemento na cultura de arroz irrigado.

Em função do exposto, realizou-se o presente estudo, com os seguintes objetivos: a) quantificar as formas de ferro e de manganês e sua associação com a adsorção de fósforo, em solos oriundos de diferentes materiais de origem; b) determinar a eficiência de extratores de fósforo do solo para a cultura de arroz irrigado; c) determinar a influência das características eletroquímicas e químicas na disponibilidade de fósforo para a cultura de arroz irrigado, em solos oriundos de diferentes materiais de origem; e d) quantificar as frações de fósforo e sua associação com o fósforo acumulado pelas plantas de arroz, em solos oriundos de diferentes materiais de origem.

2. CAPÍTULO 1 - Revisão bibliográfica

2.1. Características dos solos utilizados na cultura de arroz irrigado no Rio Grande do Sul

Os solos de várzea utilizados na cultura de arroz irrigado apresentam uma característica comum, que é a deficiência de drenagem (hidromorfismo). Isso se deve ao relevo predominantemente plano, associado com um perfil de solo com camada superficial profunda e subsuperficial mais impermeável. Estas características tornam estes solos apropriados ao desenvolvimento da cultura de arroz irrigado, facilitando o acúmulo de água na lavoura. Por outro lado, apresentam problemas para as culturas de sequeiro, já que o excesso de água no solo modifica sua fisiologia, produzindo efeitos anatômicos e morfológicos nas plantas, devido à falta de oxigênio disponível às raízes (Porto et al., 2006). Além das características já mencionadas, apresentam heterogeneidade do material de origem, ocasionando uma grande variação nas características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas (Pinto et al., 1999). Esses solos são desenvolvidos a partir de sedimentos fluviolacustres, lagunares e marinhos das planícies costeiras, de rochas sedimentares silticas ou argilosas (siltitos, arenito, argilito), ou então de sedimentos de basaltos (Figura 1).

As principais classes de solos utilizadas para o cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul são as seguintes: Planossolos, Gleissolos, Chernossolos, Plintossolos, Luvisolos e Vertissolos.



Figura 1. Materiais de origem dos solos utilizados na cultura de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (Adaptado de Souza, 2004).

A classe dos Planossolos utilizados para a cultura de arroz irrigado é representada principalmente pelos Planossolos Hidromórficos típico e solódico. O Típico abrange a Unidade de mapeamento Vacacaí, sendo encontrado na Depressão Central, Campanha e Fronteira Oeste. A principal característica dessa classe é ser oriunda de sedimentos de arenito e siltitos. Já o Solódico abrange as Unidades de mapeamento Pelotas e parte da Mangueira, sendo encontrado nas Planícies Costeiras Internas e Externas, salientando-se como principais características: ser oriundo de sedimento de granito e apresentar saturação por sódio com valores entre 6 e 15% no horizonte B e/ ou C (Streck et al., 2002). Ambas as classes são típicas de áreas planas e extensas, onde a presença de um horizonte B argiloso proporciona uma saturação temporária de água, tendo como consequência o processo de redução do solo.

A classe de Gleissolos utilizados para o cultivo de arroz irrigado é representada pelos Gleissolos Melânicos e Háplicos. O Melânico abrange as Unidades de mapeamento Colégio, Itapeva e Taim. Suas principais características são a presença de um horizonte A escuro, argila de atividade alta e altos valores de saturação por bases (eutróficos). O Háplico abrange a Unidade de mapeamento Banhado. Entre as principais características destacam-se a presença de um horizonte superficial de menor espessura e/ou

teores mais baixos de matéria orgânica em relação ao Melânico. Ambos Gleissolos ocorrem nas partes mais baixas das várzeas e nas depressões das áreas dos Planossolos, sendo também cultivados em grande escala.

A classe dos Plintossolos utilizados para o cultivo de arroz irrigado é representada pelos Plintossolos Argilúvicos Alúminico abruptico e o Plintossolo Argilúvico Eutrófico abruptico. Estes solos estão localizados na Fronteira-Oeste e as suas principais características fundamentam-se no fato de serem oriundos de sedimentos de basalto apresentando formação de plintita. Além disso, são normalmente ácidos e com baixa saturação de bases, necessitando aplicação de adubos e corretivos (Streck et al., 2002).

A classe dos Luvisolos utilizados para o cultivo de arroz irrigado é representada pelo Luvisolo Crômico Pálico abruptico, pertencente à Unidade de mapeamento Virgínia. Este solo está localizado entre os municípios de Uruguiana e São Borja, tendo como principais características: ser oriundo de sedimento de basalto, ter acumulação subsuperficial de argila, alta CTC, alta saturação de bases e apresentar deficiência em fósforo.

A classe dos Chernossolos utilizados para o cultivo de arroz irrigado é representada pelos Chernossolos Ebânicos e o Chernossolos Argilúvicos carbonáticos. O Ebânico abrange as Unidades de mapeamento Uruguiana, sendo encontrados nos municípios de Alegrete, Uruguiana, Itaqui, Barra do Quaraí e Quaraí. Esta classe é oriunda de sedimentos de basalto que se distingue da classe Chernossolos Argilúvicos carbonáticos, a qual é derivada de sedimentos da formação Chuí. O Argilúvico abrange as Unidades de mapeamento Formiga ou estão associados com os Planossolos. São características comuns a essa classe o fato de que ambos são cultivados com arroz irrigado em locais que apresentam relevo plano e mal drenados, bem como são classificados como minerais 2:1, com presença do argilomineral esmectita, refletindo em propriedades físicas limitantes. Em relação às propriedades químicas apresentam altos valores de saturação por bases, com baixos teores de fósforo e potássio (Pinto et al., 1999).

A classe dos Vertissolos utilizadas para o cultivo de arroz irrigado é o Vertissolo Ebânico Órtico chernossólico, a qual ocupa menos de 1% das áreas de várzeas do Rio Grande do Sul. Esta classe abrange a Unidade de mapeamento Escobar, sendo encontrada em áreas de terras baixas nos

municípios de Uruguaiana, Alegrete, Quaraí e Santana do Livramento. Entre suas características destacam-se a elevada fertilidade natural, com altos teores de matéria orgânica e alta saturação por bases. Além do mais, apresenta como característica predominante a presença de argilominerais 2:1 com predominância de montmorilonita, o que torna esses solos difíceis de serem manejados (Pinto et al., 2004)

2.2. Solos reduzidos

Nos solos de várzea e nas áreas destinadas ao cultivo de arroz irrigado por alagamento ocorrem alterações físicas, biológicas, eletroquímicas e químicas.

2.2.1. Alterações físicas

O estabelecimento de uma lâmina de água sobre a superfície do solo faz com que os espaços porosos existentes entre os agregados, bem como os poros contidos neles, sejam saturados por água, a qual comprime o ar que se encontra no interior daqueles espaços, ocasionando a destruição dos agregados. O solo adquire um estado semifluído, não sendo possível distinguir a sua estrutura (Ghildyal, 1978; Brady & Weil, 2002).

2.2.2. Alterações biológicas

A população microbiana em solos reduzidos é constituída por microorganismos aeróbios e anaeróbios. Os aeróbios crescem somente na presença de oxigênio molecular e, portanto, têm o seu metabolismo cessado devido à manutenção da lâmina de água que torna a difusão de oxigênio lenta.

No perfil de um solo reduzido com a presença de plantas de arroz, os microorganismos aeróbios estão localizados na camada superficial oxidada e também na rizosfera, devido à difusão do oxigênio da atmosfera até o sistema radicular pela presença de tecidos especializados denominados de aerênquimas.

Quando o oxigênio é totalmente consumido, no interior da solução do solo, os microorganismos anaeróbios iniciam seu metabolismo, apresentando como características a utilização de compostos oxidados do solo como aceptores de elétrons no processo de respiração, e a matéria orgânica como substrato (Ponnamperuma, 1972). Os compostos inorgânicos oxidados utilizados por ordem de preferência são o nitrato, os óxidos mangânicos, óxidos férricos e os sulfatos.

2.2.3. Alterações eletroquímicas

As principais alterações eletroquímicas em um solo reduzido são a diminuição do potencial redox, a mudança no pH e o aumento da condutividade elétrica.

A oxirredução é uma reação química em que elétrons são transferidos de um doador para um aceptor, sendo a matéria orgânica a fonte de elétrons para a redução do solo. O potencial redox (Eh) é uma medida da intensidade de redução do solo, pois quanto mais baixo for o seu valor, maior será a concentração de substâncias reduzidas (Patrick & Reddy, 1978). A velocidade e a magnitude do decréscimo do Eh dependem do tipo e da quantidade de matéria orgânica, da natureza e quantidade dos aceptores de elétrons, da temperatura e do tempo de redução do solo.

Patrick & Reddy (1978) estabeleceram valores críticos de potencial redox em função da sequência termodinâmica de redução do solo (Tabela 1). Geralmente, os valores de potencial redox se estabilizam na faixa de redução do ferro, devido à maior abundância dos óxidos de ferro presentes nos solos (Vahl & Sousa, 2004).

Segundo Ponnamperuma (1985), a presença de matéria orgânica, os baixos conteúdos de nitrato e de óxidos manganosos e altas temperaturas favorecem o decréscimo de Eh a valores negativos num período de duas semanas de alagamento.

Tabela 1. Semi-reações de redução de alguns compostos e seus respectivos potenciais redox

Redução	Potencial redox (mV)
$O_2+4H^++4e^- \longleftrightarrow H_2O$	+380 a +320
$2NO_3^-+12H^++10e^- \longleftrightarrow N_2+6H_2O$	+280 a +220
$MnO_2+4H^++2e^- \longleftrightarrow Mn^{2+}+2H_2O$	+280 a +220
$Fe(OH)_3+3H^++e^- \longleftrightarrow Fe^{2+}+3H_2O$	+180 a +150
$SO_4^{2-}+10H^++8e^- \longleftrightarrow H_2S+4H_2O$	-120 a -180
$CO_2+8H^++8e^- \longleftrightarrow CH_4+2H_2O$	-200 a -280

Fonte: Patrick & Reddy, 1978.

As reações de oxirredução envolvem o consumo de prótons e desta forma estão associadas ao aumento de pH. Este é determinado pelo pH inicial do solo, pela natureza e conteúdo dos compostos oxidados presentes e pelo tipo e conteúdo de matéria orgânica. Quanto mais baixo for o pH do solo antes do alagamento, mais alto será seu valor, devido ao maior tamponamento e consumo de íons hidrogênios durante as reações de oxirredução (Ponnamperuma, 1965). Além disso, esse aumento está correlacionado com altos teores de óxidos mangânicos e férricos a serem reduzidos (Patrick & Reddy, 1978).

Em solos ácidos, pode ocorrer a diminuição dos valores de pH durante o início do alagamento do solo, devido à decomposição da matéria orgânica produzindo CO_2 , que reage com água para formar ácido carbônico, que se dissocia em íons H^+ e HCO_3^- (Ponnamperuma, 1985).

As mudanças nos valores de pH regulam a sorção, a dessorção e, conseqüentemente, a concentração de íons importantes na nutrição do arroz irrigado, sendo que o pH da solução ideal para o arroz é de aproximadamente 6,6, pois as reações para liberação de N, P são favorecidas, os suprimentos de Cu, Fe, Mn e Zn são adequados e a concentração de elementos tóxicos, como Al, Fe, Mn, CO_2 , ácidos orgânicos e H_2S , estão abaixo dos teores tóxicos (Ponnamperuma, 1978).

Outra alteração eletroquímica que ocorre durante a redução do solo é a condutividade elétrica do mesmo. Ponnamperuma (1965) determinou periodicamente a condutividade elétrica em diversos solos reduzidos, em casa-de-vegetação, onde observou que a condutividade elétrica aumenta após

o alagamento, atinge um máximo e após diminui. O aumento se deve, principalmente, à formação de amônio e à mobilização de ferro e manganês na solução, bem como os cátions deslocados da fase sólida do solo para a solução do solo (Yamane, 1978). A diminuição posterior até atingir valores estabilizados, é devida à precipitação do Fe^{2+} como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, FeSO_4 , FeS_2 e FeHPO_4 , à precipitação de Mn como MnCO_3 e MnHPO_4 e à redução de CO_2 para CH_4 (Ponnamperuma, 1985).

2.2.4. Alterações químicas

As mudanças químicas causadas pela redução do solo influenciam a sua fertilidade. O nitrato é o primeiro composto oxidado do solo a ser utilizado pelos microorganismos anaeróbios, após o desaparecimento do oxigênio, sendo rapidamente reduzido às formas voláteis N_2O e N_2 . Logo, ocorre um acúmulo de NH_4 na camada reduzida, pois a ausência de oxigênio interrompe a nitrificação, na forma amoniacal, realizada pelos microorganismos aeróbios. Ponnamperuma (1985) observou que a cinética de amonificação varia principalmente com o teor de matéria orgânica e temperatura do solo. Solos com maiores teores de matéria orgânica e com maiores temperaturas apresentaram maiores teores de NH_4^+ na sua solução.

A redução dos óxidos mangânicos (Mn^{+4}) a óxidos manganosos (Mn^{+2}) pelas bactérias redutoras de manganês, ocorre posteriormente à redução do nitrato e estabiliza o potencial redox em valores positivos entre 220 e 280 mV. Os acréscimos são mais pronunciados e atingidos mais rapidamente em solos ácidos, com altos teores de matéria orgânica e óxidos mangânicos (Ponnamperuma, 1965). A presença de nitrato em solos reduzidos retarda a redução do manganês, demonstrando que os microorganismos anaeróbios utilizam o nitrato preferencialmente como aceptor de elétrons (Madruca, 1998). Após a redução, o manganês solúvel pode permanecer na solução ou mover-se pelo perfil do solo, processo conhecido como eluviação, causando deficiência de manganês em solos arenosos oxidados (Ponnamperuma, 1985). Em solos com pH próximo à neutralidade, o manganês solúvel pode precipitar como MnCO_3 , MnO , e $\text{Mn}(\text{OH})_2$ (Ponnamperuma, 1972). Além disso, foram

observadas a formação de $(\text{Mn})_3(\text{PO}_4)_2$ em solos reduzidos, os quais controlaram a disponibilidade de fósforo (Boyle & Lindsay, 1986).

Sousa (2001) e Gonçalves (2003) observaram durante 88 dias de alagamento, menores valores de manganês na solução de um Planossolo quando comparados aos solos da classe Cambissolo e Plintossolo, os quais apresentaram maiores teores de óxidos mangânicos passíveis de redução.

Após a redução dos óxidos mangânicos a óxidos manganosos, ocorre a redução dos óxidos férricos (Fe^{3+}) a óxidos ferrosos (Fe^{2+}) realizada pelas bactérias redutoras de ferro, proporcionando aumento na solubilidade desse elemento. Este mecanismo é denominado também de dissolução redutiva onde ocorre a transferência enzimática de elétrons pelas bactérias anaeróbias para o Fe^{3+} na superfície dos óxidos de ferro. A redução do Fe^{3+} para Fe^{2+} gera uma desestabilização estrutural e, conseqüentemente, o deslocamento de Fe^{2+} para a solução do solo (Schwertmann, 1991).

A concentração de ferro na solução depende do pH, do teor e tipo de matéria orgânica e dos teores e da reatividade dos óxidos de ferro. As concentrações de ferro solúvel são mais altas em solos ácidos, com altos teores de matéria orgânica e óxidos férricos podendo atingir valores superiores a 300 mg L^{-1} (Ponnamperuma, 1985). Desta maneira, ocorre a prevenção da formação de substâncias tóxicas como o sulfeto, devido à formação de FeSO_4 ou FeS_2 (Patrick & Reddy, 1978).

Patrick et al. (1973) observaram maiores concentrações de ferro solúvel em pH 5,0 quando comparados a valores mais altos de pH. Isso se deve à precipitação de ferro em formas de hidróxidos com a elevação do pH. Ponnamperuma (1978), estudando a solubilidade de ferro em diferentes valores de pH, observou uma redução de ferro na solução de 100 vezes quando o pH elevou-se de 6,0 para 7,0.

Sousa (2001) e Gonçalves (2003) observaram durante 88 dias de alagamento, maiores valores de ferro na solução de um solo Planossolo quando comparados aos solos da Classe Plintossolo e Cambissolo, os quais apresentaram maiores teores de óxidos mangânicos e óxidos férricos, não permitindo a estabilização das concentrações de ferro na solução do solo.

Os solos da Classe Planossolo apresentam baixos teores de ferro, pois têm como materiais de origem arenito, siltito e o granito, que é constituído,

principalmente, pelos minerais quartzo, feldspato e mica, não tendo ferro em sua estrutura. Os solos localizados na Fronteira Oeste apresentam maiores teores de ferro, pois são derivados de sedimentos de basalto e tendo como minerais constituintes o piroxênio e olivina, que possuem ferro na sua estrutura (Sousa et al., 2004). Em determinadas situações, as concentrações de ferro na solução, principalmente nos solos localizados na Fronteira Oeste podem atingir níveis tóxicos nas plantas de arroz irrigado. Os sintomas de toxidez de ferro são denominados de bronzeamento (toxidez direta) e alaranjamento (toxidez indireta). São frequentemente associados a determinadas características de solo, como baixo pH, altos teores de óxidos de ferro e baixa CTC (Sousa et al., 2004). SOSBAI (2005) descreve uma equação que indica a percentagem de saturação de ferro na CTC, possibilitando o diagnóstico da probabilidade de ocorrência da toxidez de ferro.

Em relação à influência da morfologia dos óxidos de ferro na concentração de ferro na solução do solo, os óxidos de ferro de baixa cristalinidade são mais rapidamente reduzidos do que os óxidos de ferro cristalino em condições anaeróbias (Munch & Ottow, 1980). Segundo Kämpf (1988), os óxidos de ferro de baixa cristalinidade (ferrihidrita e lepidocrocita) apresentam maior área superficial específica e requerem menor quantidade de energia para o processo de redução das bactérias redutoras de ferro, quando comparados aos óxidos de ferro cristalino (goethita e hematita). Yamane (1978) observou aumento dos teores de ferro solúvel, quando foram adicionados hidróxidos de ferro de baixa cristalinidade. Portanto, quanto menor o grau de cristalização dos óxidos de ferro, maior será a redução e liberação do ferro para a solução do solo.

O método de dissolução química utilizado para determinar a presença de óxidos de ferro de baixa cristalinidade em ambientes reduzidos é oxalato de amônio extraído a pH 6 (Vahl, 1993), ou seja, é estimado em amostras secas o conteúdo de ferro que será transformado ao estado reduzido após o alagamento do solo. Alguns índices empregados na estimativa da cristalinidade dos óxidos de ferro são a razão entre o teor de ferro relativo aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade e o teor de ferro relativo à totalidade dos óxidos de ferro pedogênicos (razão Fe_{ox3}/Fe_{dit}), sendo seu aumento correspondente à diminuição da cristalinidade dos óxidos de ferro pedogênicos

(Schwertmann & Kämpf, 1983; Campbell & Schwertmann, 1984; Motta & Kämpf, 1992). Hernandez & Meurer (1998), estudando a dinâmica de óxidos de ferro em solos do Uruguai, observaram que a redução dos solos proporcionou aumento nos teores de óxidos de ferro de baixa cristalinidade, mantendo-se elevados após a secagem. Dentre os óxidos de ferro de baixa cristalinidade, o que mais se destaca em ambiente sazonalmente reduzido é a ferrihidrita (Schwertmann & Fischer, 1973), a qual apresenta a razão Fe_{ox3}/Fe_{dit} superior a 0,10 (Dick, 1986; Kämpf, 1988; Inda Junior & Kämpf, 2005). Outra característica importante desta forma de ferro é que a mesma apresenta área superficial específica (ASE) variando de 150 a 600 m^2g^{-1} sendo estreitamente relacionada com a adsorção de ânions (Schwertmann, 1988). Os óxidos de ferro cristalinos, representados pela goethita e hematita, apresentam valores de ASE variando de 45 a 170 m^2g^{-1} e 25 a 75 m^2g^{-1} , respectivamente (Schwertmann e Kämpf, 1985; Fontes e Weed, 1996; Inda Junior e Kämpf, 2005).

As alterações nas formas de ferro em solo reduzido são consideradas as alterações químicas mais importantes, já que interferem também na cinética de cátions e ânions. A cinética de liberação do cálcio e de outros cátions para a solução do solo é semelhante a do ferro, pois este desloca os cátions dos sítios de troca para a solução (Ponnamperuma, 1972).

Assim como os cátions, a cinética de liberação do fósforo está muita relacionada com a cinética de liberação do ferro e, normalmente, condições que favorecem a redução do ferro proporcionam maior liberação de fósforo (Ponnamperuma, 1972). Estes e outros mecanismos responsáveis pela disponibilidade de fósforo em solos reduzidos serão discutidos a seguir.

2.2.5. Disponibilidade de fósforo

O fósforo não está diretamente envolvido nas reações de oxirredução, mas devido à sua reatividade com elementos redox, seu comportamento é afetado pela redução do solo.

Quando os solos são reduzidos, a disponibilidade de fósforo em solos ácidos poderá ser resultante dos seguintes fatores: redução do Fe^{+3} a Fe^{+2} , redução do Mn^{+4} a Mn^{+2} , adsorção de fósforo, dissolução dos fosfatos

minerais secundários, acréscimo no fator difusibilidade, mineralização do fósforo orgânico e complexação de cátions.

a) Redução do Fe^{+3} a Fe^{+2} : este mecanismo é considerado por inúmeros pesquisadores como fator principal para o aumento da disponibilidade de fósforo em solos reduzidos. A redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos está diretamente envolvida com a liberação do fósforo adsorvido na solução. Além disso, esta reação também envolve o consumo de íons hidrogênios, aumentando o pH da solução. O efeito deste na dessorção de ânions é resultado de mudanças nas cargas líquidas nas superfícies das partículas do solo. Quando o pH do solo for maior que o ponto de carga zero (PCZ), existe aumento das cargas negativas e maior competição de íons OH^- e ácidos orgânicos pelos sítios de sorção ocorrendo uma repulsão dos fosfatos, aumentando a concentração dos íons H_2PO_4^- e HPO_4^{-2} na solução (Sposito, 1989).

b) Redução do Mn^{+4} a Mn^{+2} : a importância da redução dos óxidos mangânicos a óxidos manganosos no aumento da disponibilidade de fósforo é encontrada em poucos trabalhos. Shahandeh et al. (2003) avaliaram a influência dos óxidos de manganês na disponibilidade de fósforo em vários períodos de alagamento. A contribuição da redução dos óxidos de manganês na disponibilidade de fósforo foi importante nos estágios iniciais de redução dos solos somente naqueles que apresentavam predominância de óxidos de manganês de baixa cristalinidade. Willet (1989) estudou o efeito da redução dos óxidos mangânicos a manganosos na liberação de fósforo em 18 solos dos Estados Unidos. Foi observado que a redução dos óxidos mangânicos a óxidos manganosos estava altamente correlacionada com a liberação de fósforo somente em um dos solos, o qual apresentava elevados teores de óxidos de manganês de baixa cristalinidade. Portanto, parece que a condição essencial para que ocorra alguma contribuição dos óxidos de manganês na disponibilidade de fósforo é a predominância de óxidos mangânicos nos solos. Contudo, alguns autores citam a ocorrência de formação de precipitados de MnHPO_4 , diminuindo a disponibilidade de fósforo para as plantas (Hossner & Richards, 1968; Boyle & Lindsay, 1986).

c) Sorção de fósforo: O mecanismo de sorção de fósforo em solos reduzidos está relacionado com os teores e morfologia dos óxidos de ferro,

tempo de ocorrência da redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos e o pH da solução do solo.

A sorção de fósforo provavelmente ocorre em solos alagados nas seguintes situações: a) anteriormente ao processo de redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos; b) durante o processo de redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos, devido à precipitação de fosfatos ferrosos, pois estes compostos têm a solubilidade diminuída com aumento do pH (Patrick et al., 1973). O aumento do pH provoca, também, a precipitação de óxidos de ferro de baixa cristalinidade, de alta área superficial específica, proporcionando elevada capacidade de sorção de fósforo (Khalid et al., 1977; Sah et al., 1989).

Holford & Patrick Jr (1979), estudando os efeitos da redução do solo e mudanças de pH na sorção de fósforo em solos reduzidos, observaram um aumento na precipitação de hidróxidos de ferro $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e subsequente sorção de ortofosfato (HPO_4^{2-}) com a elevação do pH de 5 a 6,5. Zhang et al., (1999) avaliaram o efeito de placas (ferro precipitado) na absorção de fósforo pela cultura de arroz em solução nutritiva. Foram utilizadas diferentes concentrações de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ na solução nutritiva equivalentes de 0 até 50 mg L^{-1} Fe. Os autores observaram que valores acima de 30 mg L^{-1} proporcionaram aumento na adsorção de fósforo.

Huguenin-Elie et al. (2003) observaram que as plantas de arroz crescendo em solo reduzido foram capazes de solubilizar o fósforo devido a uma indução da acidificação na rizosfera, provocada pela alta absorção de cátions, fazendo com que o pH da solução do solo não proporcionasse a precipitação de óxidos de ferro de baixa cristalinidade.

Desta forma, os fatores principais na disponibilidade de fósforo são atribuídos aos teores e formas dos óxidos de ferro, às mudanças no potencial redox e pH durante a redução do solo explicando o porquê da obtenção de resultados contraditórios em relação à dessorção de fósforo em solos reduzidos, seja pelo aumento (Ponnamperuma, 1972; Krairapanond & Patrick Jr. 1993) ou pela diminuição (Willett & Higgins, 1978; Phillips & Greenway, 1998). A diminuição do potencial redox causa a redução do Fe^{3+} , enquanto o pH controla a dissolução e subsequente reprecipitação dos compostos reduzidos, afetando a disponibilidade de fósforo às plantas.

Uma das maneiras de prever a dissolução e a precipitação de formas iônicas é a especiação iônica, a qual fornece a atividade de cada espécie presente no equilíbrio. Para esta finalidade, vários programas de equilíbrio termodinâmico estão disponíveis a fim de modelar a solução e a fase sólida do solo, fornecendo informações da possibilidade termodinâmica da ocorrência de certas condições. Dentre os mais utilizados e conhecidos destacam-se o GEOCHEM (Mattigod & Sposito, 1979) e o MINTEQA2 (Allison et al. 1991). Nestes programas, as constantes de equilíbrio e as equações de balanço de massa formam um sistema de equações.

A determinação da adsorção de fósforo em solos oxidados pode ser um indicativo para explicar a adsorção de fósforo que ocorre em solo alagado anteriormente à redução dos óxidos férricos a ferrosos. Para determinar a capacidade máxima de adsorção de um solo oxidado, utiliza-se a adição de doses crescentes de fósforo no solo e, após um período de agitação, determina-se as concentrações em equilíbrio, onde a diferença entre a concentração adicionada e a do equilíbrio determina o fósforo adsorvido ao solo. Os diversos valores de fósforo em solução e adsorvido no complexo de troca são submetidos a isotermas de adsorção, de modo a determinar a capacidade de adsorção máxima do solo (Sparks, 1995; Novais & Smyth, 1999). Entre as várias isotermas conhecidas, a de Langmuir tem sido comumente utilizada para estimar a adsorção de fosfatos. Sparks (1995) criticou a determinação da adsorção de fósforo por essa isoterma em função da dificuldade de diferenciação entre adsorção e precipitação, que são processos distintos que ocorrem simultaneamente.

d) Dissolução dos fosfatos minerais secundários: a diminuição das concentrações de fósforo na solução pode favorecer a dissolução de fosfatos de ferro (strengita, vivianita), fosfatos de alumínio (variscita) e fosfato de cálcio, com o objetivo de restabelecer a concentração de equilíbrio em relação ao fósforo (Pierzynski et al., 2005).

e) Acréscimo no fator difusibilidade: o acréscimo na difusão do fósforo em solo reduzido, quando comparado a um solo oxidado, deve-se principalmente ao aumento do conteúdo de água no solo. Turner & Patrick (1976) observaram que o aumento da disponibilidade de fósforo no solo

ocorreu parcialmente como resultado do decréscimo da tortuosidade, causando aumento na difusão de fósforo em direção às raízes.

Kirk et al. (2003), estudando os efeitos do alagamento e condições redox na difusão do fósforo, observaram uma diminuição do fator tortuosidade nas primeiras seis semanas de alagamento, sendo que após este período ocorreu aumento devido à formação dos óxidos de ferro de baixa cristalinidade. Entretanto, o mesmo autor salientou que a alteração que aumenta a taxa de difusão de fósforo em solos reduzidos é a fração do volume do solo ocupado pela água, sendo que a mesma não difere entre os solos, já que o espaço aéreo é saturado pela água em todos os solos.

f) Mineralização do fósforo orgânico na rizosfera: as bactérias aeróbias localizadas na rizosfera liberam enzimas fosfatases, as quais realizam a mineralização do fósforo orgânico (Yoshida, 1978); entretanto sua quantificação na prática é de difícil execução.

g) Complexação de cátions: a liberação de fósforo em solos reduzidos pode ser favorecida pela presença de carbono orgânico dissolvido, que é constituído por ácidos orgânicos de baixo e alto peso molecular, que realizam os seguintes mecanismos propostos por Kpombekou & Tabatabai (1994): a) complexação de metais e desorção de fósforo para a solução do solo; b) dissolução da estrutura cristalina, c) competição com o fósforo pelos sítios de sorção.

Sousa (2001) observou acréscimos da concentração dos ácidos orgânicos acético, butírico, propiônico e valérico até 28 dias de alagamento em um solo da classe Planossolo, cultivado com arroz, sem adição de resíduos vegetais.

2.3. Recomendação de fósforo para a cultura de arroz irrigado

A recomendação de fósforo para a cultura de arroz irrigado no Rio Grande do Sul foi obtida de experimentos de calibração realizado sob condições de campo, nas décadas de 70 e 80 em solos da classe Planossolos. Esta recomendação, ao adotar o mesmo valor de nível crítico (6 mg L^{-1}), sugere que todos os solos apresentam o mesmo comportamento em termos de disponibilidade de fósforo (Tabela 2).

Tabela 2. Recomendação de fósforo para a cultura de arroz irrigado em sistema de semeadura de solo seco

Interpretação do teor de P no solo	Expectativa de rendimento (Mg/ha)		
	<6	6 a 9	>9
	Kg de P ₂ O ₅ /ha		
Baixo	60	75	90
Médio	40	55	70
Alto	20	35	50
Muito Alto	≤20	≤35	≤50

Fonte: CQFS/2004.

2.4. Metodologia de avaliação do fósforo disponível

Os métodos de análise de fósforo nos solos procuram, geralmente, avaliar o fator quantidade (quantidade do fósforo adsorvido com fraca energia aos colóides do solo) e que, potencialmente, podem repor esse nutriente à solução do solo (fator intensidade) quando realizada a absorção pela planta (Novais & Smith, 1999). Entretanto, até mesmo parte do fósforo não-lábil é extraído, dependendo da propriedade do extrator e das condições de extração.

A eficácia dos métodos de análise em avaliar a disponibilidade de fósforo no solo pode ser estimada pela relação entre os teores de fósforo extraídos do solo pelos métodos e as quantidades de fósforo acumuladas pelas plantas, já que pode ser considerada como índice de disponibilidade do elemento no solo (Tisdale, 1993). Esta relação é obtida em experimentos realizados em casa-de-vegetação, com vários solos, procurando otimizar todos os demais nutrientes nos solos e demais condições de crescimento da planta. Escolhido o método, procura-se, a campo, calibrar os resultados de fósforo disponível com a produtividade da cultura e doses de fertilizantes necessárias ao crescimento das culturas. Além da associação com o fósforo acumulado pelas plantas, o método utilizado em laboratório de rotina deve ser também rápido e de baixo custo.

A avaliação do fósforo disponível no solo para as plantas tem sido realizada com a utilização de soluções extratoras com características diversas que removem ou dissolvem as diferentes frações de fósforo inorgânico do solo (Raij, 2003). Em solos com predominância de fosfatos de cálcio, os extratores ácidos são mais eficazes na dissolução; já em solos com predominância de fosfatos de alumínio e ferro, os extratores com a presença de ânions como

fluoreto, hidroxilas, lactato, citrato e bicarbonato atuam como trocadores de ligantes, favorecendo a liberação de fósforo (Raij, 2003). A existência de diversas metodologias demonstra a complexidade do comportamento deste elemento no solo. Os principais métodos de extração de fósforo no solo utilizados para cultura de arroz irrigado ao nível mundial e seus respectivos mecanismos de extração são os seguintes:

a) Ácidos fortes diluídos: neste grupo destaca-se o extrator Mehlich-1 (Mehlich, 1953), que é constituído pela solução de H_2SO_4 $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ + HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$. O mecanismo de extração está baseado na manutenção de uma atividade do íon H^+ na solução suficiente para dissolução parcial de fosfatos de cálcio, ferro e alumínio, em função das características de solubilidade dos fosfatos (Lindsay, 1979). As principais vantagens da utilização desse extrator, estão na facilidade de execução, baixo custo e a limpidez do extrato após a decantação, eliminando o processo de filtração (Silva & Raij, 1999). Dentre as desvantagens, destaca-se a baixa capacidade de extração de fósforo em solos argilosos, principalmente com pH do solo elevado. Nestes solos, o pH inicial de 1,2 do Mehlich-1 é rapidamente elevado para valores de pH próximos aos do solo. Além disso, o SO_4^{2-} do extrator, que atua por troca de ligantes com o fósforo é rapidamente adsorvido pelo solo, em sítios ainda não ocupados pelo fósforo, perdendo o seu poder de extração (Muniz et al., 1987). Outra desvantagem deste método é a ação dissolutiva do ácido sobre formas de fósforo de baixa solubilidade, como os fosfatos naturais, superestimando com isso o teor de fósforo disponível (Raij, 1991). Desta maneira, a recomendação forneceria resultados com alto teor de fósforo, mesmo em condições de deficiência de fósforo. Segundo Kamprath & Watson (1980), o Mehlich-1 extrai mais fósforo ligado ao cálcio e apenas pequena proporção desse elemento ligado ao ferro e ao alumínio. Isso contrasta com a realidade brasileira, de solos ácidos e ricos em óxidos de ferro e alumínio, em que predominam fosfatos de ferro e alumínio, que são mais solúveis, à medida que aumenta o pH. Logo, os extratores ácidos não deveriam ser a melhor opção para extrair fósforo de tais solos (Raij, 2003). Isso pode ser corroborado pelo histórico da extração de fósforo pelo método com H_2SO_4 $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ em solos com predominância de óxidos de ferro e alumínio, onde a extração de fósforo por

este método foi baixa mesmo em solos que receberam altas doses de fósforo (Raij et al. 1986).

b) Ácidos fortes diluídos acompanhados de íon complexante: neste grupo encontram-se os extratores Mehlich-3 (Mehlich, 1984) e Bray-1 (Bray & Kurtz, 1945). O extrator Mehlich-3 (NH_4F $0,015 \text{ mol L}^{-1}$ + NH_4NO_3 $0,25 \text{ mol L}^{-1}$ + CH_3COOH $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ + HNO_3 $0,013 \text{ mol L}^{-1}$ + EDTA $0,001 \text{ mol L}^{-1}$, em pH aproximado de 2,5) difere do Mehlich-1 devido à presença do íon fluoreto, menor atividade do íon H^+ e adição de EDTA (ácido etilenodiamino tetraacético) para complexar micronutrientes. O princípio se baseia na dissolução ácida e na presença de complexantes. A ação do fluoreto de amônio é exercida pela precipitação do cálcio solúvel pelo flúor, extraíndo assim, o fosfato ligado ao cálcio (Kamprath & Watson, 1980). A substituição parcial de ácidos inorgânicos de outros extratores, como no Mehlich-1, por ácido acético com pH tamponado a 2,5, mostrou-se efetiva em diminuir a solubilização de fósforo nos fosfatos naturais (Novais & Smyth, 1999). Como principais vantagens deste método pode-se citar a facilidade na execução, o baixo custo, limpeza do extrato e, principalmente, o maior espectro de ação, ou seja, capacidade de extrair vários elementos simultaneamente, como P, K, Ca, Mg, Cu, Zn e Mn (Sims, 1989). Recentemente, devido à extração múltipla de nutrientes pelo Mehlich-3, têm sido usado o método de ICP (inductively coupled plasma) para determinar o fósforo e os demais elementos na solução extratora em uma única análise, aumentando a eficiência de utilização dos laboratórios (Beegle, 2005). O teor de fósforo na solução analisado pelo método ICP é maior do que o determinado colorimetricamente na solução de leitura. Isso se deve à extração de formas inorgânicas e orgânicas não extraídas por outros extratores. Por causa dessas diferenças, interpretações dos resultados analíticos devem ser modificadas baseadas em calibrações apropriadas (Eliason et al., 2001).

O extrator Bray-1 (HCl $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ e NH_4F $0,03 \text{ mol L}^{-1}$) é utilizado em solos ácidos, onde ocorre a formação de complexos Al-F, favorecendo a dessorção do fósforo ligado ao metal. Outro aspecto importante do íon fluoreto é que o mesmo impede a readsorção do fósforo solubilizado pelos colóides do solo, além de precipitar fluoreto de cálcio em solos com predominância de fosfatos de cálcio.

c) Ácidos fracos diluídos: deste grupo o extrator de Egner (lactato de cálcio $0,02 \text{ mol L}^{-1} + \text{HCl } 0,02 \text{ mol L}^{-1}$) desenvolvido por Steffens (1994) é um dos mais utilizados, principalmente na Europa Ocidental. Os mecanismos de extração são os seguintes: 1) o ânion lactato forma complexos com os cátions de superfície das partículas liberando fósforo; 2) os ânions orgânicos substituem o fósforo adsorvido no solo, reduzindo sua readsorção por bloquear os sítios de adsorção.

O extrator Texas ($\text{NH}_4\text{Ac } 1,43 \text{ mol L}^{-1} + \text{EDTA}$) foi desenvolvido por Sharpley et al. (1987). A molécula de EDTA forma um forte complexo com os íons ferro desorvendo o fósforo ligado ao metal. Além disso, os ânions acetato formam complexos com os cátions da superfície das partículas, favorecendo a liberação de fósforo. A presença de ânions orgânicos substituem o fósforo adsorvido no solo, reduzindo sua readsorção por bloquear os sítios de adsorção (Kamprath & Watson, 1980).

d) Soluções alcalinas tamponadas: deste grupo, destacam-se o extrator Olsen, extrator NaOH e o extrator P oxalato. O extrator Olsen ($\text{NaHCO}_3 \text{ } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em pH 8,5) foi desenvolvido por Olsen et al. (1954), sendo o mais utilizado como extrator de fósforo no mundo. Quando utilizado em solo calcário, favorece a solubilização dos fosfatos de cálcio, em virtude da alta concentração de CO_3^{2-} proveniente do NaHCO_3 e, conseqüentemente, a precipitação de CaCO_3 .

O extrator NaOH, apresenta altas concentrações de OH^- que proporcionam o deslocamento do fósforo adsorvido aos óxidos de ferro e de alumínio. Além disto, o aumento do pH na solução, provoca o aumento das cargas negativas da superfície, favorecendo a desorção de fósforo.

O extrator P oxalato ($(\text{NH}_4)_2 \text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \text{ } 0,2 \text{ mol L}^{-1}$) foi desenvolvido por Shahandeh et al. (1994) com a finalidade de prever a disponibilidade de fósforo para a cultura de arroz em solos reduzidos, com predominância de óxidos de ferro de baixa cristalinidade. A solução extratora dissolve estas formas de ferro, liberando fósforo para a solução do solo.

e) Metodologias recentes: Dentre as metodologias mais modernas destaca-se a resina de troca aniônica, na forma de membranas. Estas resinas de troca iônica são produtos sintéticos que apresentam uma rede tridimensional de cadeias de hidrocarbonetos, contendo grupos funcionais com

cargas elétricas positivas ($R-NH_3^+$) e negativas (OH^-). Em solução aquosa em contato com o solo durante a agitação da resina e água durante 16 horas, as cargas positivas adsorvem os cátions e as cargas negativas adsorvem os ânions, reduzindo a força iônica e favorecendo o aumento da atividade de fósforo na solução do solo e transferência do solo para a resina (Vaidyanatham & Talibudeen, 1970). Sua estrutura física é porosa e flexível, podendo dilatar-se e reter solvente em seu interior.

Este método baseia-se na dessorção ou dissolução do fósforo da fase sólida para o restabelecimento de seu equilíbrio com o fósforo dissolvido na suspensão do solo, que é continuamente adsorvido pela resina e trocado com o ânion (HCO_3^-) com o qual a resina é previamente saturada. Logo, a resina é adequada para estimar a capacidade de suprimento, pois o processo de extração assemelha-se à ação das raízes das plantas.

Segundo Silva & Raij (1999), as vantagens deste método são: a) a extração é contínua e realizada através da água de forma similar ao que ocorre na absorção de fósforo pelas raízes; b) não é utilizado nenhum reagente químico, que possa dissolver fosfatos não lábeis; c) não ocorre exaustão em solos com alto teor de argila, explicando o porquê de extrair mais fósforo do que os métodos Mehlich 1 e 3 nestas condições d) o pH da suspensão do solo é um pouco abaixo de 7, coincidente com a faixa de maior disponibilidade de fósforo; e) permite a extração simultânea de vários nutrientes (P, K, Ca e Mg); f) as tabelas de interpretação são baseadas apenas nos teores de fósforo, ou seja, é o melhor método que integra a avaliação dos fatores quantidades, intensidade, difusão e capacidade de fósforo no solo.

A desvantagem deste método é a ausência da quantificação do fósforo ligado ao cálcio, considerado não-lábil, pois não se encontra em equilíbrio com o fósforo da solução. Entretanto, em casos especiais, como a acidificação da rizosfera e associação com micorrizas, podem fazer com que formas de fósforo ligado ao cálcio no solo, em forma não-lábil, sejam absorvidas pelas plantas (Hedley et al., 1982).

2.5. Fracionamento de fósforo

As técnicas de fracionamento de fósforo visam a identificação das formas com que este elemento é retido no solo e sua contribuição na capacidade de suprimento de fósforo para as plantas. Atualmente, são utilizadas várias técnicas de fracionamento de fósforo, destacando-se os métodos de Chang & Jackson (1957) e de Hedley et al. (1982) modificado por Condrón et al. (1985). Estas técnicas variam no número e na forma das frações extraídas (inorgânicas e orgânicas), bem como na ordem e tipo de extrator.

O método de Chang & Jackson (1957) está baseado na capacidade de determinadas substâncias químicas dissolverem compostos específicos de fósforo inorgânico do solo. Logo, estas frações e as substâncias químicas utilizadas para cada uma delas são as seguintes: fósforo facilmente solúvel ou P-H₂O (NH₄Cl 1 mol L⁻¹), fósforo ligado ao Al ou P-Al (NH₄F 0,5 mol L⁻¹), fósforo ligado ao Fe ou P-Fe (NaOH 0,1 mol L⁻¹), fósforo ligado ao cálcio ou P-Ca (H₂SO₄ 0,25 mol L⁻¹), e fósforo ocluso. Esta técnica pode apresentar problemas na interpretação dos resultados, pois algumas soluções extratoras extraem mais do que uma forma inorgânica. Além disso, o fósforo orgânico é obtido em outra amostra, através do método da ignição (Dalal, 1977), disponibilizando apenas a quantidade do elemento e não a sua labilidade.

O método de Hedley et al. (1982) possibilita a obtenção das diferentes frações orgânicas e inorgânicas do solo de acordo com a sua disponibilidade, independentemente do grau de intemperismo e dos sistemas de cultivos empregados (Hedley et al., 1982; Tiessen et al., 1984; Guo et al., 2000). As formas extraídas pela Resina e bicarbonato de sódio são ditas formas lábeis, ou seja, de maior disponibilidade, enquanto aquelas extraídas com NaOH 0,1 mol L⁻¹, são consideradas formas moderadamente lábeis. As frações de fósforo extraídas por NaOH 0,5 mol L⁻¹ (Condrón et al., 1985), HCl 1 mol L⁻¹ e o residual seriam consideradas não lábeis. Cross & Schlesinger (1995), agruparam as frações obtidas através do fracionamento de Hedley em duas formas: fósforo geoquímico e fósforo biológico. O fósforo geoquímico é a soma das frações inorgânicas (Resina, NaHCO₃, NaOH 0,1, NaOH 0,5 e HCl) mais o fósforo residual, enquanto que o fósforo biológico é a soma das frações orgânicas (NaHCO₃, NaOH 0,1 e NaOH 0,5).

A labilidade da fração NaHCO_3 é relatada por muitos pesquisadores, indicando que os teores extraídos pela RTA não representam todo fósforo disponível do solo (Hedley et al.; 1982; Tiessen et al.; 1984; Cross & Schlesinger, 1995; Guo & Yost; 1998; Gatiboni et al., 2005).

A fração $\text{Pi NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ representa o fósforo inorgânico moderadamente lábil, quimiosorvido por ligações monodentadas e bidentadas (Figura 2) aos óxidos e à caulinita (Hedley et al., 1982). Além disso, representa as formas precipitadas de fósforo com o ferro e alumínio (Ruiz et al., 1997).

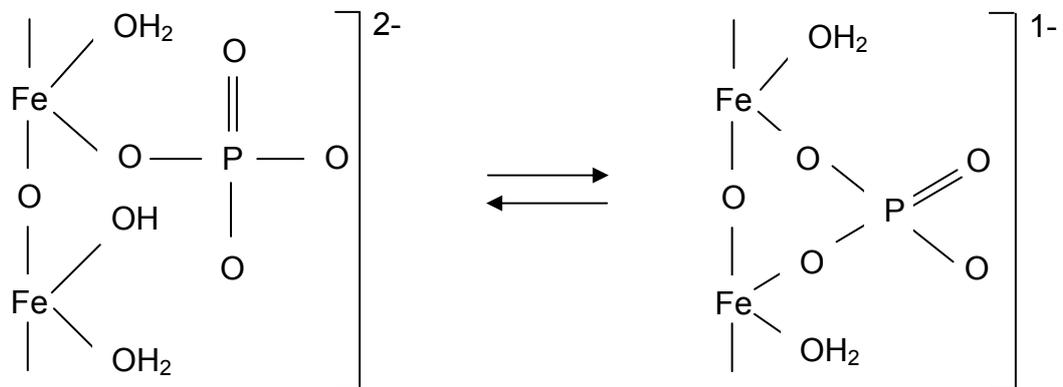


Figura 2. Esquema representativo da adsorção de fósforo através de ligações monodentadas e bidentadas (Adaptado de Novaes & Smith, 1999).

A fração $\text{Po NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ representa o fósforo orgânico moderadamente lábil ligado aos ácidos húmicos (Lopez, 2004, Cross & Schehlesinger, 1995). A extração do fósforo orgânico pelo NaOH ocorre por ação de ânions OH^- , que provocam a hidrólise parcial dos compostos orgânicos (Dalal, 1977).

O fósforo orgânico é representado pelas formas monoéster, diéster, fosfonatos e polifosfatos (Tate & Newman, 1982). Os fosfatos monoéster (hexafosfato de inositol, açúcares fosfatados, mononucleotídeos e fosfato colina) representam a maior parte do fósforo orgânico nos solos do Rio Grande do Sul (Santos & Anghinoni, 2003). Estas formas são adsorvidas com alta energia por causa de sua elevada carga residual, tornando quimicamente e fisicamente protegida do ataque microbiano (Stewart & Tiesse, 1987; Condrón et al., 1990). Esses fosfatos são encontrados nos ácidos fúlvicos e principalmente nos ácidos húmicos. Nos fosfatos diésteres (fosfolípidios, ácido teicóico e ácidos nucleicos), o fósforo tem sua carga ocupada pelos próprios

constituintes da molécula, por ter menor carga residual, diminuindo sua adsorção aos colóides do solo, logo ficam mais suscetíveis ao ataque microbiano, sendo mineralizados e fornecendo fósforo inorgânico ao sistema solo-planta. Segundo Guggenberger et al. (1996), esses fosfatos são encontrados nos ácidos húmicos e principalmente nos ácidos fúlvicos.

Gatiboni et al. (2005) observou que os fosfatos diéster são mineralizados em maior proporção do que os fosfatos monoéster, quando o fósforo inorgânico não é capaz de suprir a absorção pelas plantas. Em sistemas onde ocorre a acumulação de fósforo inorgânico pela adubação fosfatada, a absorção da planta utiliza esta forma de fósforo, ocorrendo acúmulo do fósforo orgânico. McGill & Cole (1981) observaram que a mineralização de formas orgânicas de fósforo ocorreu quando as formas de fósforo inorgânico foram limitantes às plantas.

A fração Pi e Po NaOH 0,5 mol L⁻¹ representa o fósforo inorgânico e orgânico fisicamente protegidos no interior de microagregados (Cross & Schlessinger, 1995). Lopez et al. (2004) observaram que a aplicação de superfosfato triplo aumentou esta fração, indicando a difusão de fósforo no interior de fosfatos de ferro e alumínio.

A fração HCl 1 mol L⁻¹ representa as formas inorgânicas de fósforo associadas ao cálcio (Cross & Schlessinger, 1995). A associação com este cátion pode ocorrer nos minerais primários, fosfatos de cálcio neoformados e em fosfatos naturais. Saleque et al. (2004) & Gatiboni et al. (2005) observaram aumento nos teores desta fração devido à adição de superfosfato triplo e também pela aplicação de calcário, respectivamente. Em ambas as situações observou-se a neoformação de fosfatos de cálcio. Solos com baixos teores da fração HCl são resultantes do avançado grau de intemperismo, que resulta na lixiviação de cátions básicos.

A fração residual representa o fósforo presente nas substâncias húmicas e bem como formas inorgânicas de fósforo insolúveis, e a fração total representa todas as formas de fósforo, incluindo fósforo estrutural e fósforo ocluído em minerais do solo.

Ambas as técnicas de fracionamento (Chang & Jackson, 1957; Hedley et al., 1982) podem auxiliar na escolha de um extrator de fósforo apropriado para determinada localidade. Em algumas situações, a absorção de

fósforo de frações consideradas de menor labilidade pelas plantas e não acessadas pelos extratores pode ocasionar uma baixa eficiência do método, ou seja, obtenção de baixos coeficientes de determinação.

Sharpley et al. (1987) observaram alta relação (coeficiente de determinação) entre o fósforo extraído pela Resina e o fósforo extraído por NaHCO_3 oriundo do fracionamento de Hedley et al. (1982).

Saleque et al. (2004), estudando o efeito de fertilizantes orgânicos e inorgânicos nas formas de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado, observaram que a fração de fósforo NaHCO_3 resultou em maiores coeficientes de determinação com o fósforo acumulado pelas plantas. Pheav (2005), estudando a ciclagem de nutrientes em solos cultivados com arroz irrigado e submetidos a vários cultivos, observou que o fósforo extraído da Resina e o fósforo inorgânico extraído pelo NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ foram as formas preferencialmente absorvidas pelas plantas de arroz.

Ranno (2004) realizou o fracionamento de fósforo pelo Método de Chang & Jackson (1957) em onze solos de várzea submetidos à cultura de arroz irrigado, onde observou que a fração predominante foi a de fósforo ligado aos óxidos de ferro. Como este elemento é reduzido durante o alagamento, uma fração significativa dos óxidos e dos fosfatos de ferro é solubilizada, provavelmente, aumentando a disponibilidade de fósforo para a cultura do arroz irrigado.

3. RELAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS ESTUDADAS

O diagrama apresentado na Figura 3 representa a relação entre as diferentes variáveis estudadas. Essas podem ser divididas em três grupos, o que facilita o entendimento de suas relações:

- variáveis independentes:

(x1) Extratores

(x2) Frações de fósforo no solo

- variáveis correlatas:

(z1) Características mineralógicas (óxidos de Fe e de Mn)

(z2) Características químicas e eletroquímicas na solução

(z3) Fósforo na solução

- variáveis dependentes:

(y1) Fósforo no tecido da parte aérea

(y2) Produção de matéria seca

(y3) Fósforo acumulado

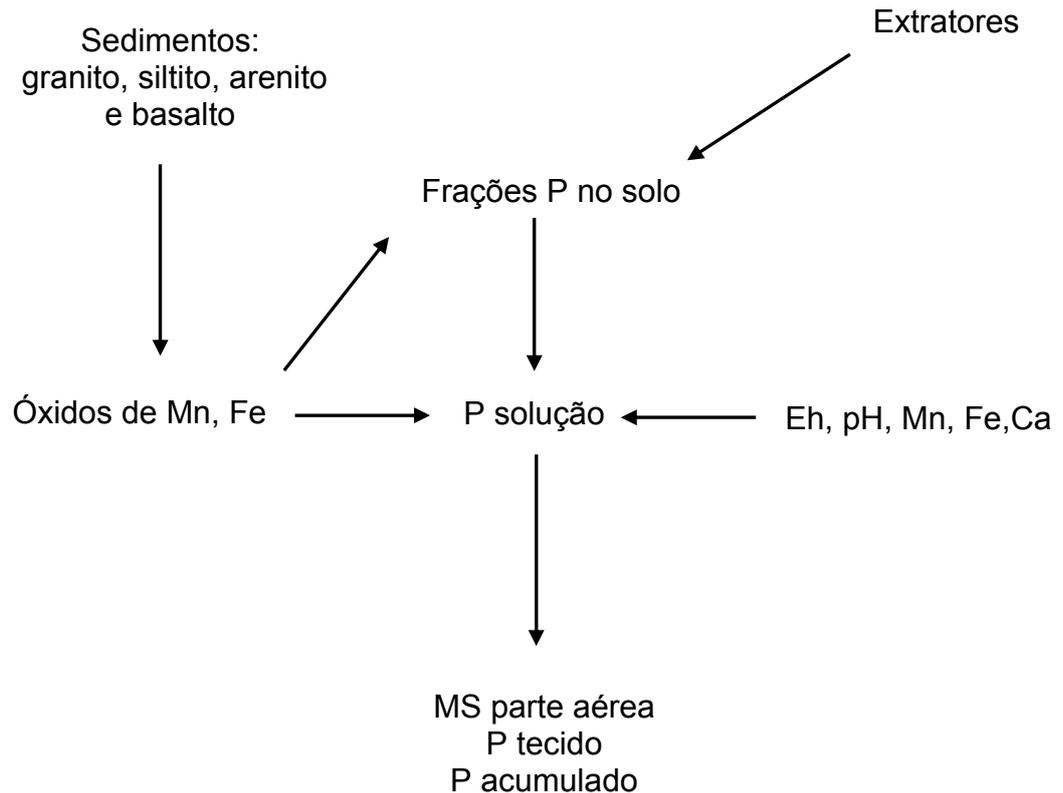


Figura 3. Diagrama de relacionamento das variáveis em estudo.

Os solos do Rio Grande do Sul utilizados para a cultura de arroz irrigado são oriundos de diferentes de materiais de origem, proporcionando diferentes quantidades de óxidos de ferro e de manganês. Estas características causam variações na distribuição das frações de fósforo no solo, afetando a eficiência dos extratores de fósforo. A obtenção destas frações através do fracionamento de Hedley et al. (1982) e a sua relação com os teores de fósforo acumulado pelas plantas, irá indicar quais são as frações que contribuem na disponibilidade de fósforo para a cultura de arroz irrigado, bem como auxiliar na utilização de um extrator que esteja associado às mesmas, possibilitando o aumento da eficiência dos extratores na cultura de arroz irrigado. Os variados teores de óxidos de ferro e de manganês, também, proporcionam estágios diferenciados de redução do solo. A maior ou menor intensidade de redução dos solos pode ser constatada diretamente através do Eh e indiretamente através do pH na solução do solo. Os solos da classe Planossolo, oriundos de sedimento de arenito, siltito e granito, apresentam capacidade de adsorção de fósforo no início do alagamento e solubilização de manganês, ferro, cálcio e fósforo na solução diferenciada, quando comparados aos solos oriundos de

sedimento de basalto. As diferentes concentrações de fósforo na solução do solo, obtidas ao longo do período de alagamento, entre os solos oriundos de diferentes materiais de origem, irá determinar a concentração de fósforo do tecido na parte aérea, a produção de matéria seca e o fósforo acumulado.

4. CAPÍTULO II - Estudo 1: Óxidos de ferro e de manganês e a relação com a sorção de fósforo em solos reduzidos

4.1. Introdução

Os solos do Rio Grande do Sul utilizados para a cultura de arroz irrigado por alagamento são oriundos de diferentes materiais de origem (basalto, arenito, siltito e granito), os quais contribuem para as variações nos teores totais de óxidos de ferro e de manganês. Além disso, as variações temporais das condições de oxidação e redução dos solos afetam a sua cristalinidade, influenciando nas diferentes taxas de solubilização de manganês e ferro e, indiretamente, nas concentrações de fósforo na solução dos solos reduzidos. Por outro lado, as formas de ferro atuam na sorção de fósforo, seja em ambientes oxidados ou em ambientes reduzidos, nas seguintes situações: a) anteriormente ao processo de redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos, principalmente em solos com maiores teores de óxidos de ferro cristalinos e de baixa cristalinidade, os quais apresentam ponto de carga zero (PCZ) entre 7 e 9, resultando em cargas superficiais positivas, favorecendo a sorção de fósforo (Schwertmann & Taylor, 1989); b) durante o processo de redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos, devido ao aumento das concentrações de fósforo e ferro na solução proporcionando a precipitação de fosfatos de ferro. Da mesma maneira, o aumento do pH provoca a precipitação de óxidos de ferro de baixa cristalinidade proporcionando elevada capacidade de adsorção de fósforo (Khalid et al., 1977; Sah et al., 1989).

Em relação aos óxidos de manganês, alguns trabalhos têm demonstrados resultados contraditórios, já que em solos com predominância de óxidos de manganês de baixa cristalinidade, os óxidos mangânicos podem primeiramente adsorver o fósforo (Shahandeh et al., 2003). Essa adsorção

pelos óxidos de manganês é favorecida quando o PCZ deste elemento for superior ao pH do solo. Os óxidos de manganês apresentam PCZ entre 1,5 e 7,5, sendo que a birnessita de baixa cristalinidade, que é a forma mais comum de ocorrência desses óxidos, apresenta PCZ de 1,5. Além disso, o aumento da cristalinidade dos óxidos proporciona o aumento do PCZ (Mckenzie, 1989). Posteriormente, com a redução dos óxidos mangânicos a óxidos manganosos, pode ocorrer a dessorção do fósforo e também a precipitação de fósforo na forma $MnHPO_4 \cdot H_2O$ (Willet, 1989; Boyle & Linsay, 1986).

Logo, em solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul, oriundos de diferentes materiais de origem, é necessário caracterizar os teores e as formas de óxidos de ferro e de manganês predominantes.

A capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), descrita pela Isotherma de Langmuir em solos oxidados, e os teores de óxidos de ferro e de manganês cristalinos e de baixa cristalinidade podem ser utilizados para explicar a adsorção de fósforo que ocorre em solo reduzido, anteriormente, à redução dos óxidos férricos e mangânicos. Além disso, é necessário também descrever a sorção de fósforo durante o processo de redução em solos oriundos de diferentes materiais de origem. Sousa (2001) observou que um Plintossolo, oriundo de sedimento de basalto, apresentou cinética diferenciada de solubilização de manganês e ferro em relação a um Planossolo, enquanto que Gonçalves (2003) observou que um Cambissolo, oriundo de sedimento de basalto apresentou cinética diferenciada de fósforo em relação a um Planossolo. Isso foi atribuído à adsorção de fósforo e ao período de redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos, que ocorrem de forma diferenciada em solos oriundos de diferentes materiais de origem. Logo, deve ser quantificada a adsorção de fósforo em diferentes períodos de alagamento em solos oriundos de diferentes materiais, objetivando confirmar as prováveis diferenças observadas naqueles estudos.

4.2. Hipóteses

Hipótese 1: Os solos oriundos de sedimento de basalto têm maiores teores absolutos de óxidos de ferro cristalino e de baixa cristalinidade, proporcionando maior capacidade máxima de adsorção de fósforo do que os solos derivados de sedimento de arenito e granito.

Hipótese 2: A capacidade máxima de adsorção de fósforo têm maior associação com a relação Fe_{Ox6}/Fe_{dit} do que com a relação Mn_{Ox6}/Mn_{dit} . Os óxidos de ferro de baixa cristalinidade possuem ponto de carga zero maior do que o pH dos solos utilizados, proporcionando carga elétrica superficial positiva, favorecendo a adsorção de fósforo, enquanto que os óxidos de manganês de baixa cristalinidade apresentam ponto de carga zero inferior ao pH do solo, proporcionando carga elétrica superficial negativa, favorecendo a adsorção de cátions e não de ânions.

Hipótese 3: Os solos oriundos de sedimento de basalto têm maiores teores de óxidos de manganês e ferro, proporcionando cinética de sorção de fósforo diferenciada em relação ao solo oriundo de sedimento de granito durante o alagamento do solo.

4.3. Objetivos

Objetivos 1: Quantificar os teores absolutos das formas de ferro e de manganês e as relações entre os óxidos de baixa cristalinidade e os óxidos cristalinos, bem como estimar a capacidade máxima de adsorção de fósforo pelo isoterma de Langmuir.

Objetivos 2: Associar a capacidade máxima de adsorção de fósforo e os teores absolutos das formas de ferro e de manganês, bem como as relações entre os óxidos de baixa cristalinidade e os óxidos cristalinos.

Objetivo 3: Quantificar a sorção de fósforo durante quatro períodos de alagamento do solo.

4.4. Material e métodos

Para atingir os objetivos propostos, foram desenvolvidos dois estudos no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

4.4.1. Características e preparo dos solos

Os solos e seus respectivos locais de coleta utilizados na determinação dos óxidos de ferro e de manganês e a capacidade máxima de adsorção de fósforo foram os seguintes: a) Planossolo hidromórfico eutrófico solódico (SGe 3), coletado no município de Pelotas; b) Gleissolo háplico Ta distrófico (GXd), coletado no município de Cachoeirinha; c) Planossolo hidromórfico eutrófico arênico (SGe 1), coletado no município de Restinga Seca; d) Luvisso solo crômico pálico abrupto (TCp), coletado no município de Itaqui; e) Vertissolo ebânico órtico típico coletado (VEo 2), coletado no município de Alegrete; f) Chernossolo ebânico carbonático vértico (MEk), coletado no município de Alegrete. Após a coleta, as amostras dos solos foram enviadas ao Laboratório de Análises de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS para a caracterização química e física (Tabela 3).

4.4.2. Extração química e quantificação dos óxidos de ferro e de manganês

As dissoluções seletivas dos óxidos de ferro e de manganês foram realizadas em triplicata no Laboratório de Química do Departamento de Solos. O ferro e manganês, relativo aos óxidos de ferro e manganês (Fe_{dit}), foram extraídos com a utilização de três sais: ditionito de sódio, citrato de sódio e bicarbonato de sódio a 80°C, em duas extrações sucessivas (Mehra & Jackson, 1960; Inda Junior & Kampf, 2003). Em cada extração de 15 minutos, adicionou-se 1 g de ditionito de sódio, parcelado em três alíquotas de aproximadamente 0,33 g, a 0,2 g de TFSA contida em 40 mL de solução citrato de sódio 0,3 mol L⁻¹ : bicarbonato de sódio 1 mol L⁻¹, na razão 8:1, em tubo de centrifuga com capacidade para 50 mL. Após a adição de cada alíquota de ditionito de sódio, a suspensão foi agitada por um minuto. A temperatura de

extração foi mantida a 80°C em banho-maria. Ao fim de cada etapa de extração, a suspensão foi centrifugada a 3000 rpm por 10 minutos e o extrato foi completado a 50 mL com a solução citrato-bicarbonato.

Os óxidos de ferro e manganês de baixa cristalinidade (Fe_{Ox} , Mn_{Ox}) foram extraídos com oxalato de amônio $[(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ 0,2 mol L^{-1} a pH 3,0 e pH 6,0 no escuro (Schwertmann, 1964). Em uma única extração, 0,2 g de TFSA e 40 mL de solução de oxalato de amônio foram adicionadas em tubo plástico de 50 mL de volume, recobertos com papel alumínio para evitar a incidência direta de luz na solução e fechados com tampas. As suspensões foram agitadas por 2 horas em agitador horizontal e, ao final, centrifugadas a 2000 rpm por 5 minutos. O sobrenadante coletado foi completado com oxalato de amônio a 50 mL em balão volumétrico.

Os teores de ferro e manganês solubilizados pelos dois extratores foram determinados por espectroscopia de absorção atômica (EAA).

4.4.3. Determinação do fósforo sorvido em condições oxidadas

Em frascos de snap-cap de 100 mL, equilibraram-se duplicatas de 5 g de solo com 50 mL de uma solução de KCl 0,02 mol L^{-1} , com concentrações variáveis de fósforo adicionado como $\text{K}(\text{H}_2\text{PO}_4)$. As concentrações de fósforo adicionadas nas soluções foram: 2,5; 5; 10; 15; 25; 50; 100; 150; 200; 300; 400 mg L^{-1} . Nos solos da classe Planossolo foram adicionadas as oito primeiras soluções, enquanto que nos demais solos, foram adicionadas as soluções 10; 15; 25; 50; 100; 200; 300 e 400 mg L^{-1} . Após, as amostras dos solos foram equilibradas com as soluções, durante 2 horas em agitador horizontal (100-120 oscilações por minuto) e depois, foram afrouxadas as tampas, deixando-as em repouso até o dia seguinte (15 horas). Depois deste período, foram transferidos 3 mL do sobrenadante para copo plástico, onde foram adicionados 3 mL de solução de KCl 0,02 mol L^{-1} e agitados levemente. Posteriormente, foi adicionado 1 mL da solução redutora de molibdato de amônio e ácido ascórbico (método Murphy & Riley, 1962), deixando a solução extratora repousar por 10 minutos. Em seguida, foi determinada a absorbância no espectrofotômetro de absorção a 882 nm.

Tabela 3. Características químicas e físicas dos solos utilizados

Classificação taxônomica Embrapa – CNPS (2006)	Material de origem	Argila	M.O.	pH H ₂ O	Índice SMP	K	P	CTC pH 7	CTC efetiva	Saturação Al
Planossolo hidromórfico eutrófico solódico	granito	200	22	4,7	6,2	61	3,0	7,6	4,5	8,9
Gleissolo háplico Ta distrófico	granito	220	24	4,4	5,8	85	5,5	7,9	4,5	17,7
Planossolo hidromórfico eutrófico arênico	arenito	120	14	5,3	6,5	75	15	6,5	3,9	0,0
Luvissolo crômico pálico abruptico	basalto	230	17	4,3	5,5	80	2,5	10,0	5,2	13,5
Vertissolo ebânico órtico típico	basalto	320	43	5,5	5,9	102	2,9	21,1	16,7	0,0
Chernossolo ebânico carbonático vértico	basalto	280	26	4,9	6,0	114	2,7	19,2	16,5	3,1

Argila: Método do densímetro; Matéria orgânica: Digestão úmida; pH H₂O: pH em água 1:1; K e P: Método Mehlich-1; Ca, Mg, Al, Mn e Na: KCl 1 mol L⁻¹.

O fósforo adsorvido na fase sólida foi calculado por diferença entre o fósforo adicionado e o quantificado na solução de equilíbrio. Os valores obtidos para cada solo foram ajustados à equação de Langmuir descrita a seguir:

$$x/m = kbc / (1+kc) \quad (\text{equação 1})$$

em que:

x/m = quantidade de fósforo adsorvido por unidade de massa de solo;

k = constante relacionada com energia de ligação;

b = capacidade máxima de adsorção de fósforo;

c = concentração de fósforo na solução em equilíbrio.

Para a estimativa da constante b , a equação 1 foi transformada em sua forma linear ($y=b_0 + b_1x$): $x/m = 1/ (kb) + (1/b)c$. (equação 2)

O valor da CMAP(b) foi estimado a partir da declividade da reta ajustada b_1 . Desta forma, $CMAP = 1/ b_1$.

4.4.4. Determinação do fósforo sorvido em condições reduzidas

Os tratamentos foram constituídos pelos seguintes fatores: a) Solos: Planossolo (SGe 3), Luvissole (TCp), Vertissolo (VEo 2) e Chernossolo (MEk); b) Doses de fósforo: 0 e 200 mg L⁻¹ na forma de K(H₂PO₄); c) Períodos de alagamento: 5, 15, 30 e 45 dias. Foi utilizado delineamento completamente ao acaso com 3 repetições.

Amostras de 50 g de solo foram adicionadas em snap-cap de 200 mL (unidades experimentais), e posteriormente receberam adição de 50 ml de água destilada referentes ao tratamento testemunha, enquanto que as demais unidades receberam 25 ml de água destilada e 25 ml da solução de KH₂PO₄ com concentração de 400 mg P L⁻¹, resultando em 200 mg P L⁻¹. As unidades experimentais foram colocadas em estufa com temperatura ao redor de 30°, sendo cobertas com plástico preto e tampadas, para evitar o crescimento de algas e também a troca de gases. Após cada período de alagamento, retirou-se uma alíquota para obtenção dos teores de fósforo e de ferro na solução. O fósforo sorvido foi obtido de acordo com a equação 3, sendo que o fósforo presente na solução dos tratamentos que receberam a adição da fonte

fosfatada do qual foi subtraído do fósforo quantificado na solução dos tratamentos que não receberam àquela adição, e que corresponde ao fósforo liberado com a redução do solo.

$$P \text{ sorvido} = [P \text{ adicionado} - (P \text{ solução do tratamento com adição de P} - P \text{ solução do tratamento sem adição de P})] \quad (\text{equação 3})$$

4.5. Resultados e discussão

A forma hiperbólica das isotermas de adsorção de fósforo nos solos utilizados (Figuras 4 a 9) demonstraram que a afinidade inicial é alta e à medida que aumenta a cobertura de superfície, ocorre a diminuição da afinidade e declividade.

A partir do ajuste linear das isotermas segundo a descrição de Langmuir, foram indicados os valores da capacidade máxima de adsorção de fósforo, os quais variaram de 73 a 588 mg kg^{-1} (Tabela 4).

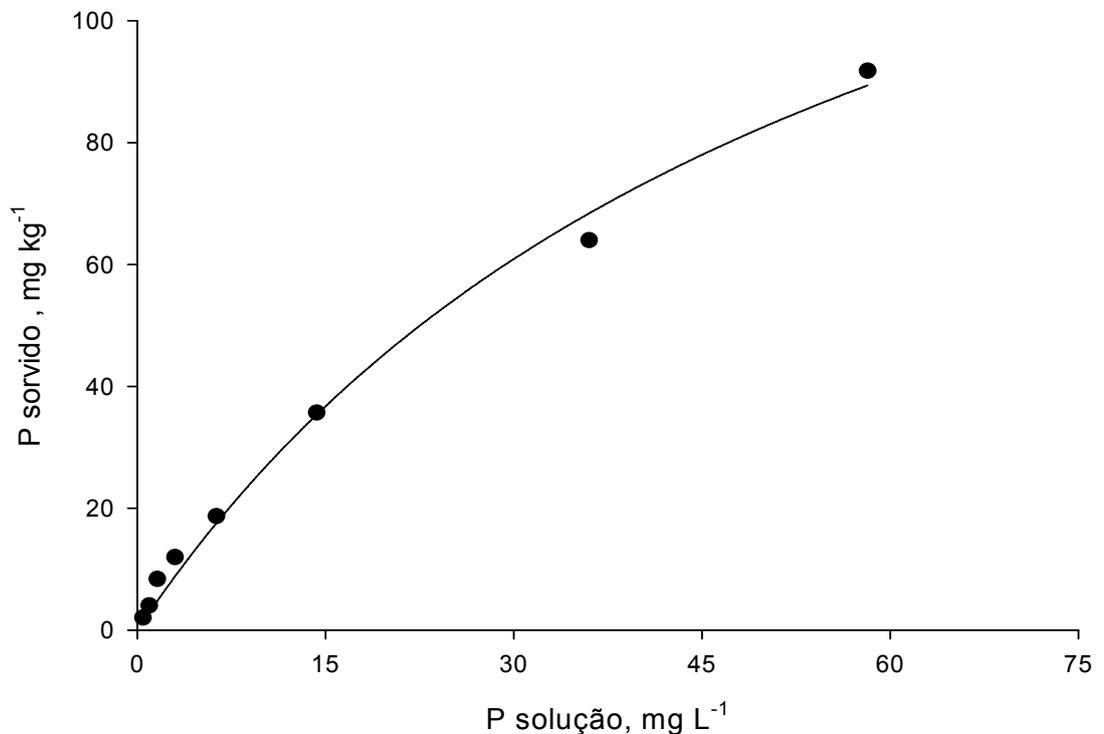


Figura 4. Relação entre o P-solução e o P-sorvido na amostra do solo Planossolo hidromórfico eutrófico solódico.

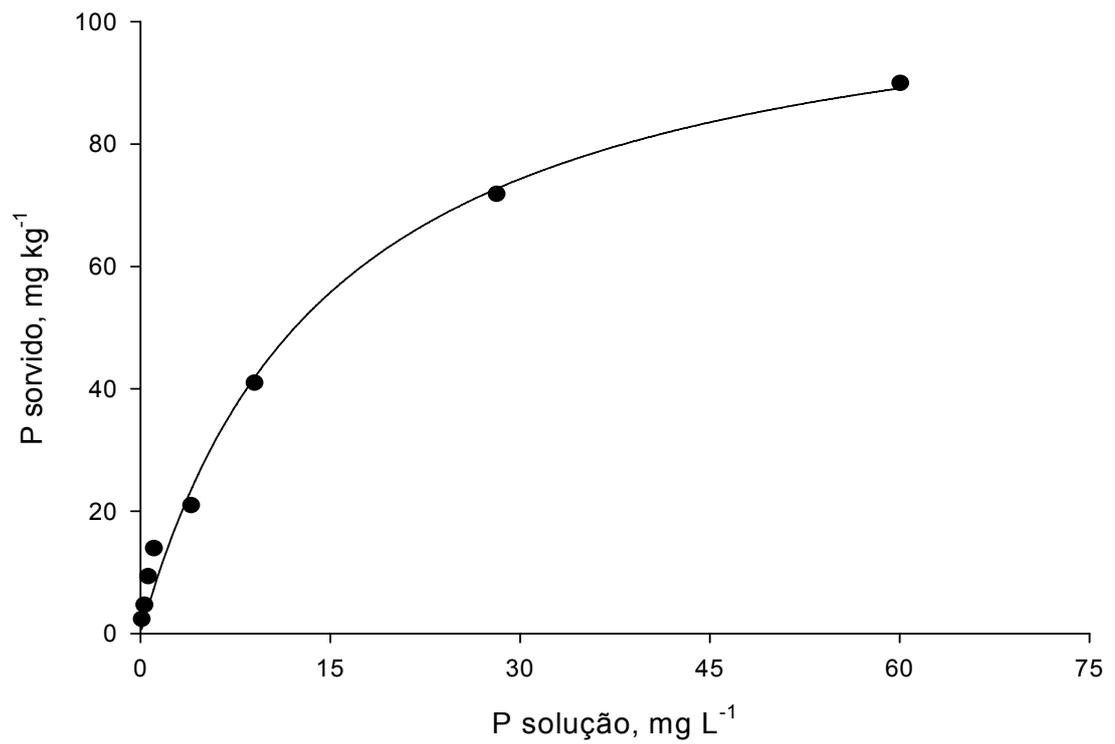


Figura 5. Relação entre o P-solução e o P-sorvido na amostra do solo Gleissolo háplico Ta distrófico.

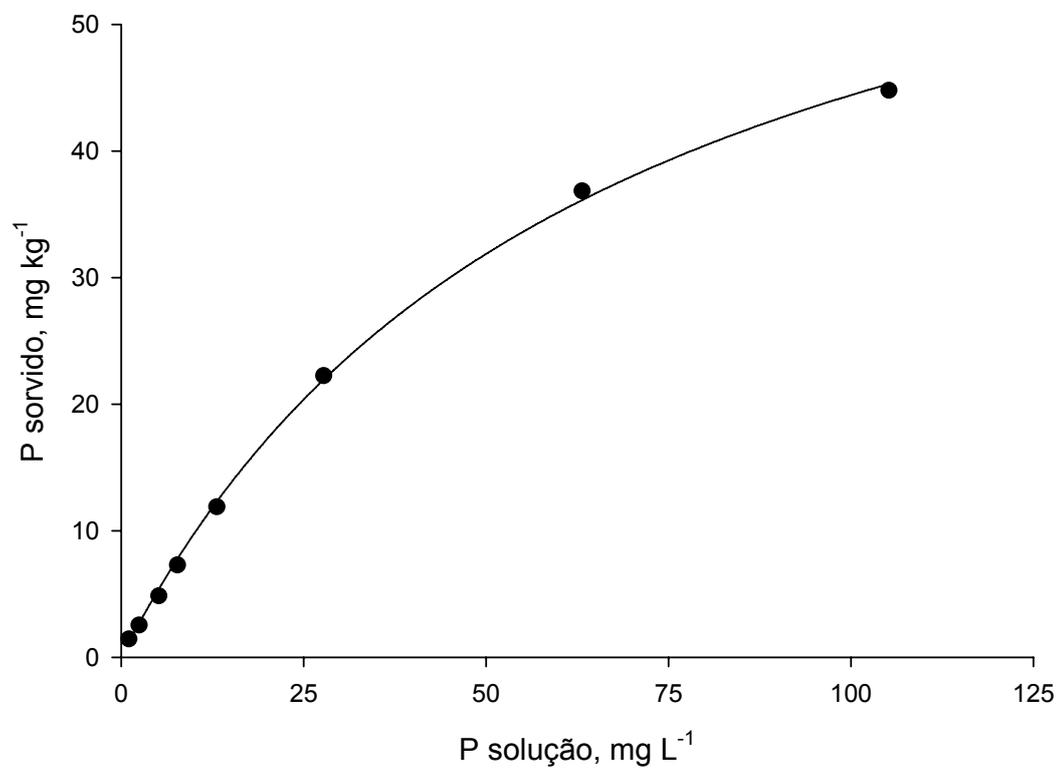


Figura 6. Relação entre o P-solução e o P-sorvido na amostra do solo Planossolo hidromórfico eutrófico arênico.

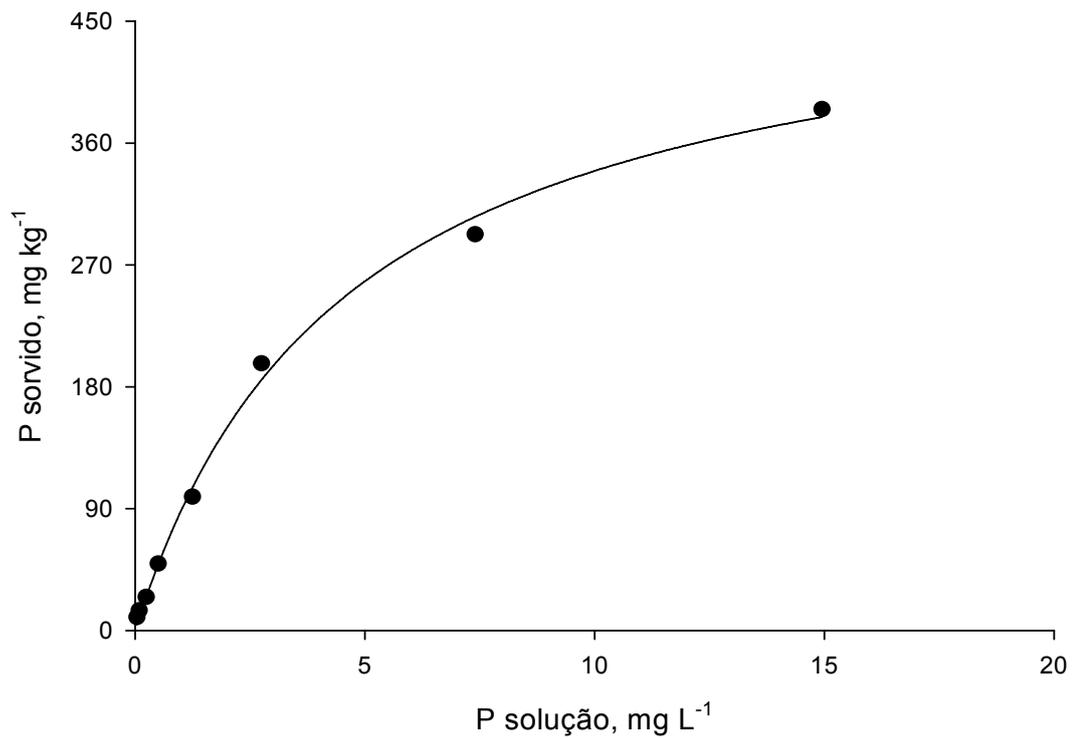


Figura 7. Relação entre o P-solução e o P-sorvido na amostra do solo Luvissole crômico pálico abrupto.

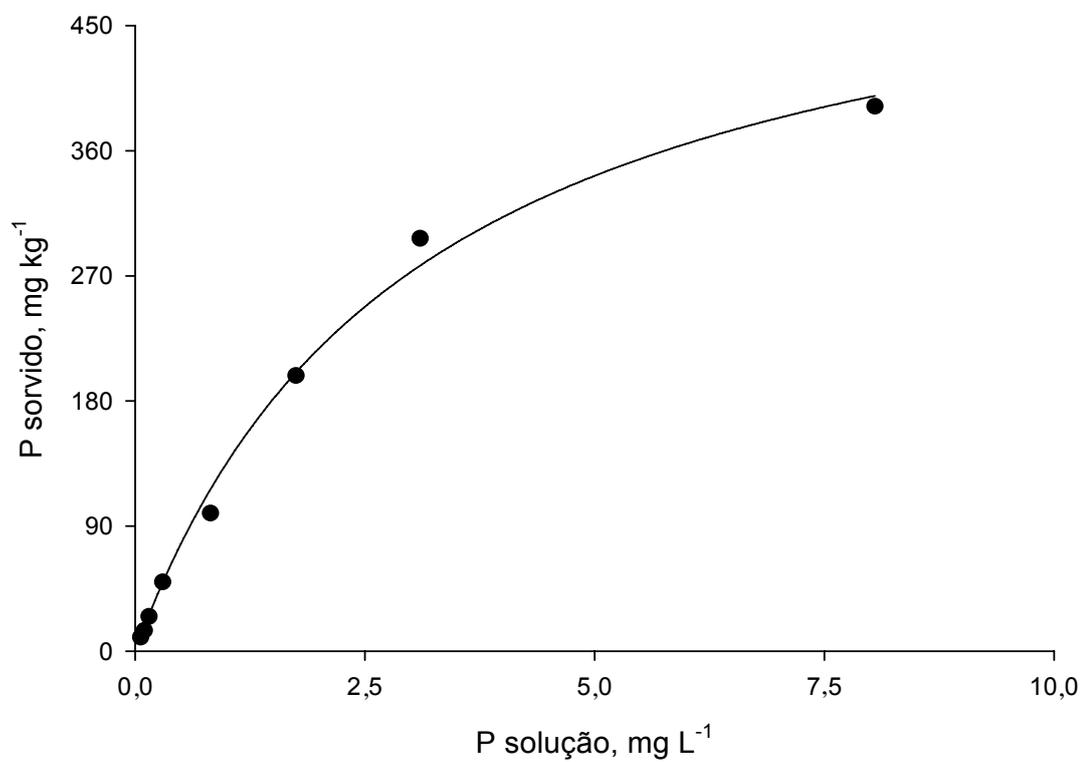


Figura 8. Relação entre o P-solução e o P-sorvido na amostra do solo Vertissolo ebânico órtico típico.

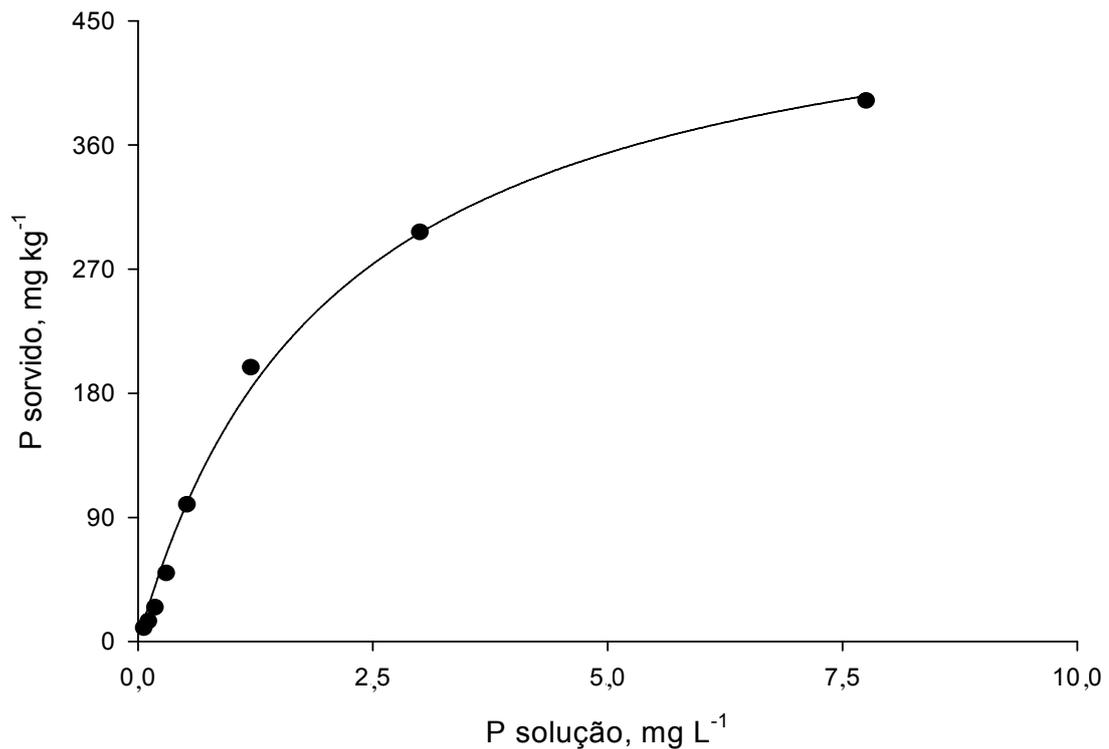


Figura 9. Relação entre o P-solução e o P-sorvido na amostra do solo Chernossolo ebânico carbonático vértico.

Os solos oriundos de sedimento de basalto (Luvissole, Vertissolo e Chernossolo) apresentaram maiores teores absolutos das formas de ferro e de manganês e também relações entre os óxidos de baixa cristalinidade e os cristalinos, quando comparados aos solos oriundos de sedimento de arenito e de granito, representados pelos Planossolos e Gleissolo (Tabela 5). Dentre os solos utilizados, o Chernossolo apresentou os maiores teores absolutos de ferro e maior índice Fe_{ox6}/Fe_{dit} em relação aos solos oriundos de sedimento de arenito e granito. A maior quantidade de matéria orgânica presente no solo Chernossolo, indica que o mesmo possui maior quantidade de ligantes orgânicos, como ácidos carboxílicos, os quais complexam o ferro na superfície da ferrihidrita, impedindo a cristalização para formas cristalinas (Schwertmann, 1966).

A maior capacidade máxima de adsorção de fósforo observada nos solos oriundos de sedimento de basalto (Tabela 4) são atribuídas, principalmente, aos maiores teores absolutos das formas de ferro e teores relativos de Fe_{ox6}/Fe_{dit} e Fe_{ox3}/Fe_{dit} , em relação aos demais. O índice Fe_{ox6}/Fe_{dit} apresentou a maior associação com a capacidade máxima de adsorção de

fósforo em todos os solos utilizados (Tabela 6). Syers et al. (1971), trabalhando com solos do Rio Grande do Sul, com elevados conteúdos de óxidos de ferro, encontraram associação da capacidade máxima de adsorção de fósforo com as formas de ferro e com índice Fe_{Ox}/Fe_{dit} . Resultados semelhantes foram observados por Hernandez & Meurer (1998), trabalhando em solos do Uruguai, oriundos de diferentes materiais de origem. A área superficial específica elevada, presente nos óxidos de baixa cristalinidade, resulta em maior adsorção de fósforo quando comparados aos óxidos cristalinos.

Parfitt (1989), estudando a formação da ferrihidrita em ambiente sazonalmente reduzido, observou um mecanismo de troca de ligante forte e rápido, seguido de reações mais lentas e fracas.

Tabela 4. Coeficiente linear (b0), coeficiente angular (b1) e coeficiente de determinação (R^2) da relação linear entre (P sol / P ads) x Psol e a capacidade máxima de adsorção de fósforo (b) em seis solos orizícolas do Rio Grande do Sul

Solo	b0	b1	R^2	b (mg kg ⁻¹)
Planossolo (SGe 3)	0,2389	0,0076*	0,93**	132
Gleissolo	0,0842	0,0101*	0,97**	99
Planossolo (SGe 1)	0,8908	0,0137*	0,97**	73
Luvissolo	0,0078	0,0022*	0,97**	455
Vertissolo	0,0059	0,0018*	0,99**	556
Chernossolo	0,0056	0,0017*	0,94**	588

* Significativo a 5% de probabilidade; ** Significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 5. Teores absolutos de formas de ferro e de manganês e as relações entre os óxidos de baixa cristalinidade e cristalinos

Classificação taxônomica Embrapa – CNPS (2006)	Fe _{ox6}	Fe _{ox3}	Fe _{dit}	Fe _{ox6} / Fe _{dit}	Fe _{ox3} / Fe _{dit}	Mn _{ox6}	Mn _{ox3}	Mn _{dit}	Mn _{ox6} / Mn _{dit}	Mn _{ox3} / Mn _{dit}
	----- g kg ⁻¹ -----			----- g kg ⁻¹ -----						
Planossolo hidromórfico eutrófico solódico	0,37	1,9	5,5	0,07	0,35	0,12	0,20	1,65	0,07	0,12
Gleissolo háplico Ta distrófico	0,28	1,6	4,8	0,06	0,33	0,09	0,30	1,80	0,05	0,17
Planossolo hidromórfico eutrófico arênico	0,19	1,1	3,1	0,06	0,35	0,18	0,30	2,00	0,09	0,15
Luvissolo crômico pálico abruptico	0,92	4,9	8,0	0,12	0,61	0,36	0,80	2,20	0,16	0,36
Vertissolo ebânico órtico típico	1,35	6,7	10,7	0,13	0,63	0,49	1,20	2,20	0,22	0,55
Chernossolo ebânico carbonático vértico	1,45	7,7	10,8	0,13	0,63	0,70	1,90	2,60	0,27	0,73

O oxalato de amônio a pH 6 extraiu menores quantidades de ferro que o reagente ajustado a pH 3. Isso indica que no valor de pH 6, as condições de solubilização e/ou complexação de ferro são menores (Hernandez & Meurer, 1998). Vahl (1993) utilizou a metodologia adaptada de Tedesco et al. (1995), ao valor de pH 6, para estimar em amostras secas o conteúdo de ferro que foi reduzido, após alagamento do solo, à cultura de arroz irrigado.

Os solos oriundos de sedimento de basalto apresentaram também maiores teores de manganês cristalino e de baixa cristalinidade quando comparados aos solos oriundos de sedimento de arenito e granito (Tabela 5). Dentre esses solos, o Chernossolo apresentou maiores teores absolutos das formas de manganês e maior índice Mn_{Ox6}/Mn_{dit} . É provável que a maior capacidade máxima de adsorção de fósforo nos solos oriundos de sedimento de basalto possam ser também atribuídos aos maiores teores absolutos de formas de manganês e aos teores relativos de Mn_{Ox6}/Mn_{dit} em relação aos solos oriundos de sedimento de granito.

Outra característica do solo que pode estar relacionada à adsorção de fósforo é a fração argila. No presente estudo, esta característica apresentou correlação significativa com a capacidade máxima de adsorção de fósforo (Tabela 6). Isso indica que na medida em que ocorre aumento na quantidade de argila, os solos apresentam maior adsorção de fósforo. Isso se deve a presença de óxidos de ferro na fração argila. Os íons OH^- e OH_2 presentes na superfície dos óxidos de ferro são deslocados pelo ânions fosfato para a solução do solo (Sample et al., 1980). Resultados semelhantes foram obtidos por Bahia Filho et al. (1983), os quais correlacionaram a adsorção de fósforo com os componentes mineralógicos da fração argila de Latossolos. Isso demonstra que as formas e teores absolutos e relativos de óxidos são os responsáveis pela energia de ligação do fósforo adsorvido.

A matéria orgânica não apresentou correlação significativa com a capacidade máxima de adsorção de fósforo. Isto se deve à interação da matéria orgânica com os colóides inorgânicos, diminuindo a área superficial à adsorção de fósforo, ou seja, ocorre uma competição com o fósforo pelos sítios de sorção, facilitando sua dessorção (Hue, 1991).

Tabela 6. Coeficientes de correlação linear simples (R) entre a CMAP e as variáveis: teores absolutos das formas de ferro e de manganês; relações entre os óxidos de baixa cristalinidade e os cristalinos nas amostras dos solos: Planossolo (SGe 3); Gleissolo, Planossolo (SGe 1), Luvissole; Vertissolo e Chernossolo

Variáveis	R
CMAP X Fe _{Ox6}	0,98**
CMAP X Fe _{Ox3}	0,98**
CMAP X Fe _{dit}	0,95**
CMAP X Fe _{Ox6} /Fe _{dit}	0,99**
CMAP X Fe _{Ox3} /Fe _{dit}	0,97**
CMAP X Mn _{Ox6}	0,87**
CMAP X Mn _{Ox3}	0,84**
CMAP X Mn _{dit}	0,85**
CMAP X Mn _{Ox6} /Mn _{dit}	0,90**
CMAP X Mn _{Ox3} /Mn _{dit}	0,88**
CMAP X Argila	0,70*
CMAP X Matéria Orgânica	0,56 ^{ns}

* Significativo a 5% de probabilidade; ** Significativo a 1% de probabilidade.

Os dados obtidos no experimento de sorção de fósforo em solos reduzidos demonstraram que os solos utilizados apresentaram comportamentos distintos e que estão associados aos materiais de origem.

O solo Planossolo SGe 3 oriundo de sedimento de granito apresentou menor sorção de fósforo no período de 5 a 15 dias de alagamento (Figura 10). Isso se deve à maior intensidade de redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos, com liberação do fósforo adsorvido. No período de 15 a 30 dias, provavelmente, ocorreu aumento na sorção de fósforo devido ao aumento da concentração de ferro na solução (Figura 11), favorecendo a formação de fosfatos de ferro. A partir dos 30 dias de alagamento, o aumento da sorção de fósforo foi proporcionado, provavelmente, pela diminuição da solubilidade dos óxidos ferrosos devido ao valor de pH atingido neste período (Figura 12), resultando na formação de Fe(OH)₃, os quais adsorvem o fósforo na solução. Resultados semelhantes foram obtidos por Ponnampereuma (1978) que observou redução drástica na solubilidade de ferro com o aumento do pH na solução.

Os solos oriundos de sedimento de basalto (Luvissole, Vertissolo e Chernossolo) apresentaram maior sorção de fósforo no período de 5 a 15 dias de alagamento (Figura 10). Neste período, a redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos se encontraram em estágio inicial (Figura 11), prevalecendo a adsorção de fósforo aos óxidos cristalinos e de baixa cristalinidade, os quais não foram reduzidos. A partir dos 15 dias de alagamento, observou-se equilíbrio entre a quantidade de fósforo sorvido e desorvido. No intervalo de 15 a 30 dias, foram observados um suave decréscimo na quantidade de fósforo sorvido. Isso se deve, provavelmente, à maior redução dos óxidos férricos a ferrosos com liberação do fósforo adsorvido. A partir dos 30 dias de alagamento, ocorreu um suave aumento na sorção de fósforo, devido provavelmente à precipitação de fosfatos de ferro (Reddy et al., 2005).

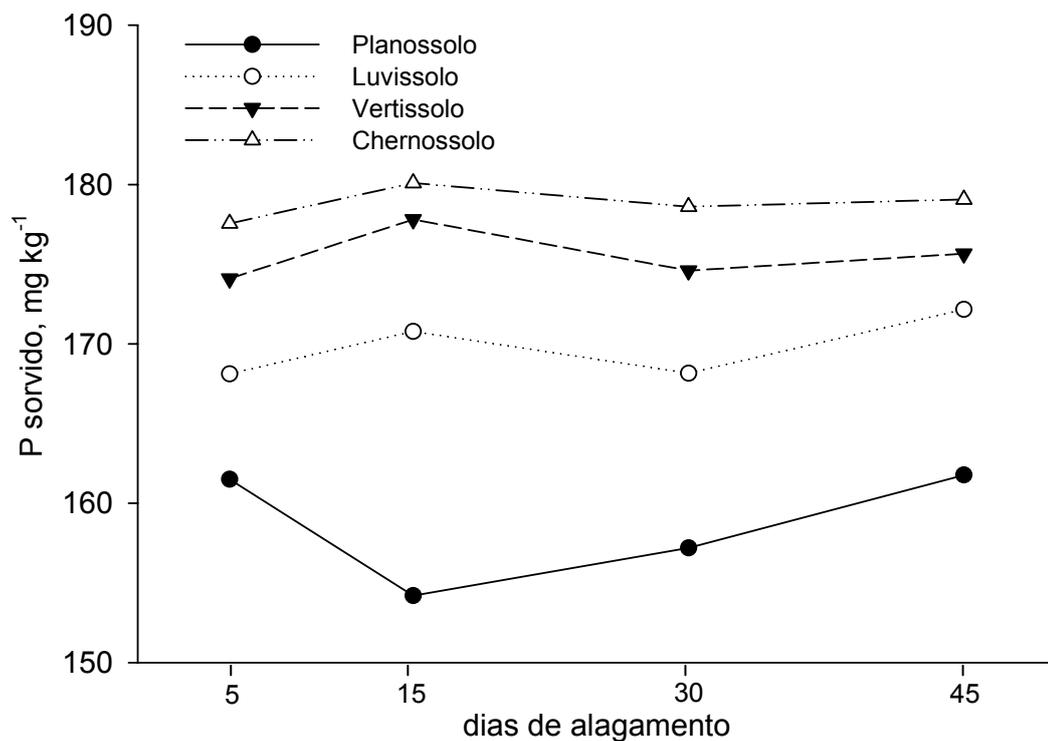


Figura 10. Teor de fósforo sorvido após a adição de 200 mg P kg⁻¹, em amostras dos solos: Planossolo, Luvissole, Vertissolo e Chernossolo, submetidas a diferentes períodos de alagamento.

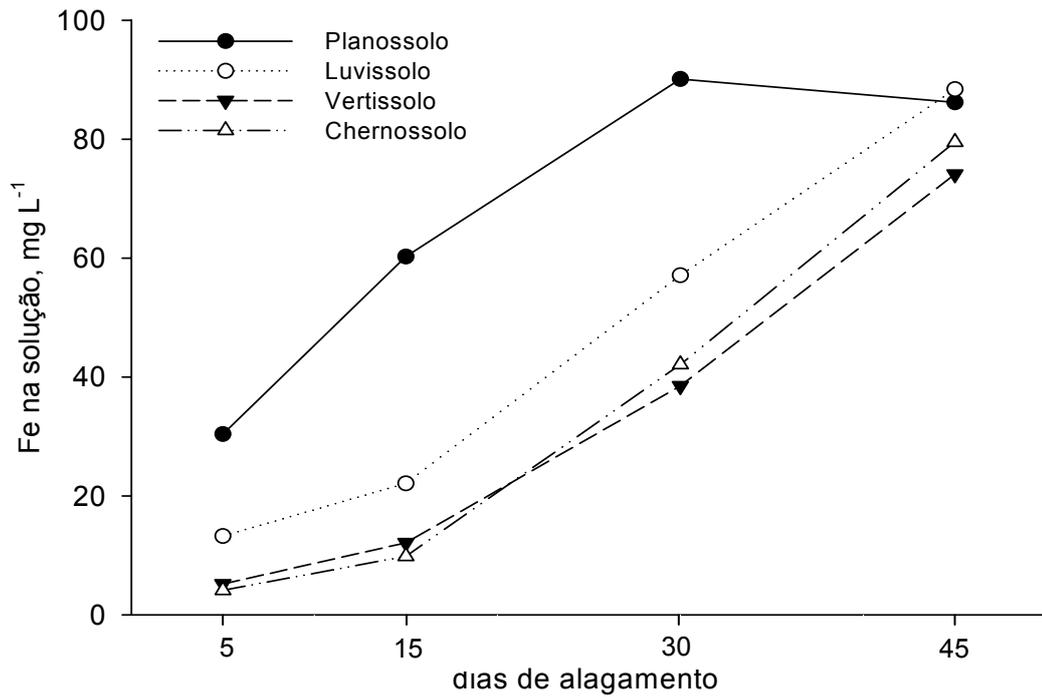


Figura 11. Concentração de ferro na solução após a adição de 200 mg P kg⁻¹, em amostras dos solos: Planossolo, Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo, submetidas a diferentes períodos de alagamento.

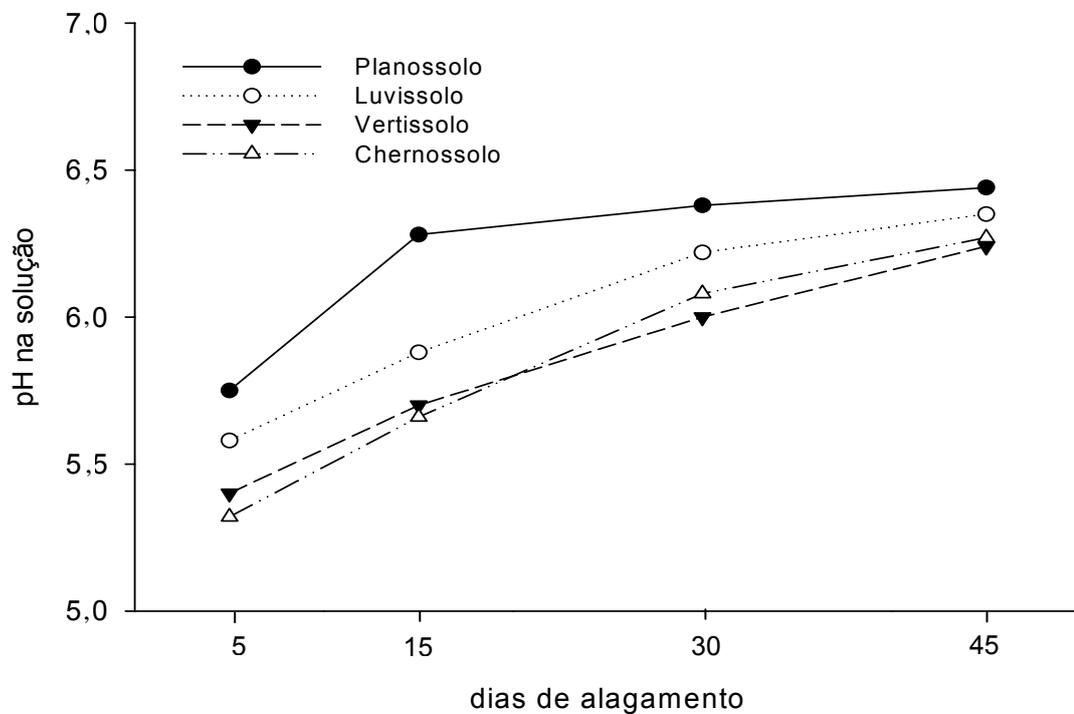


Figura 12. Valores de pH na solução após a adição de 200 mg P kg⁻¹, em amostras dos solos: Planossolo, Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo, submetidas a diferentes períodos de alagamento.

4.6. Conclusões

Conclusão 1: Os solos oriundos de sedimento de basalto apresentaram maiores teores absolutos de óxidos de ferro e de manganês cristalinos e de baixa cristalinidade, proporcionando maior capacidade máxima de adsorção de fósforo do que os solos derivados de sedimento de arenito e granito.

Conclusão 2: A capacidade máxima de adsorção de fósforo foi mais associada com a relação Fe_{Ox6}/Fe_{dit} do que com a relação Mn_{Ox6}/Mn_{dit} .

Conclusão 3: O solo oriundo de sedimento de granito apresentou sorção de fósforo a partir dos 15 dias de alagamento, enquanto que os solos oriundos de sedimento de basalto apresentaram sorção no intervalo de 5 a 15 dias, sendo que a partir deste período de alagamento, observou-se equilíbrio entre a quantidade de fósforo sorvido e dessorvido.

5. CAPÍTULO III - Estudo 2: Disponibilidade de fósforo por diferentes extratores

5.1. Introdução

Os laboratórios de análise de solo no Brasil utilizam o extrator Mehlich-1, também conhecido como duplo ácido (H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1} + HCl 0,05 mol L^{-1}) (Mehlich, 1953) e a resina de troca aniônica (Resina), para determinar a disponibilidade de fósforo para a cultura de arroz irrigado. O extrator Mehlich-1 é considerado um extrator ácido, pois tem como princípio a solubilização, pelos íons H^+ , de fosfatos de cálcio e pequenas porções de fosfatos de alumínio e ferro (Bahia Filho et al., 1983), enquanto que o método da Resina é baseado no princípio da troca iônica, a qual permite a adsorção de fósforo presente na solução do solo, criando um gradiente químico entre a fase sólida e o meio líquido (Miola et al., 1995).

Existem resultados contraditórios sobre qual seria o melhor extrator para prever a disponibilidade de fósforo para a cultura de arroz irrigado. Chang (1978) cita que muitos métodos de extração de fósforo para culturas realizadas em solos reduzidos não apresentam a mesma eficiência do que para culturas de sequeiro. Isso se deve aos teores de fósforo que aumentam devido à redução do solo originada pelo alagamento, sendo que este aumento é variável de acordo com as características mineralógicas, químicas e eletroquímicas de cada tipo de solo. Sob este enfoque, os métodos que analisam as amostras com o solo seco, provavelmente não refletem o possível aumento de fósforo disponível com a redução do solo.

No Brasil, também existem resultados contraditórios sobre qual seria o melhor extrator para prever a disponibilidade de fósforo ao cultivo de arroz irrigado em solos que recebem adições de fosfatos solúveis. Grande et al. (1986) obtiveram correlação significativa (r^2) com o método da Resina e não

significativa com o método de Mehlich-1 em solos de várzea localizados em Minas Gerais, enquanto que Silva (1996) e Ranno (2004) não observaram diferenças entre estes extratores em alguns solos do Rio Grande do Sul.

Teo et al. (1995), estudando vários extratores para prever a disponibilidade de fósforo para as plantas em solos localizados no Estado de Arkansas nos Estados Unidos, observaram que o método da Resina apresentou maiores coeficientes de determinação nos estádios de crescimento vegetativo e reprodutivo. É importante salientar, que naquele país também existem controvérsias sobre qual seria o melhor método; daí se explica o porquê da utilização de diferentes extratores de fósforo (Bray-1, Bray-2, Mehlich 3, Mehlich-1, Olsen) nos estados de Arkansas, Louisiana, Mississippi e Flórida. Nos países asiáticos, há uma predominância na utilização do método de Olsen, já que inúmeros experimentos realizados em casa-de-vegetação e a campo demonstraram a sua superioridade (Goswani & Banerjee, 1978).

Diante das informações já mencionadas, parece que os métodos atuais analisados em solo seco, independentemente da fonte de fósforo utilizada, não refletem a capacidade dos solos de fornecerem fósforo sobre condições reduzidas. Um dos fatores poderia ser a inabilidade dos métodos de extração em extrair o fósforo retido nos óxidos de ferro de baixa cristalinidade. Sabe-se que esses óxidos são as formas de ferro preferencialmente utilizadas pelas bactérias anaeróbias, logo têm um efeito significativo na disponibilidade de fósforo com a redução do solo (Munch & Ottow, 1980). Shahandeh et al. (1994) observaram resultados satisfatórios de relação entre o fósforo extraído pelo método P oxalato e o fósforo acumulado pelas plantas de arroz, em experimento realizado com dez solos americanos com diferentes características mineralógicas. A maior eficiência desse método parece estar associada às características mineralógicas e eletroquímicas, proporcionando a liberação de fósforo oriundo da dissolução dos óxidos de ferro de baixa cristalinidade durante a redução do solo.

Os solos do Rio Grande do Sul utilizados na cultura de arroz irrigado apresentam predominantemente fósforo ligado aos óxidos de ferro cristalinos e de baixa cristalinidade (Ranno, 2004). Desta forma, é de se esperar que o método P oxalato, em solos com predominância de óxidos de ferro de baixa cristalinidade ou os métodos alcalinos, sejam mais adequados para estimar a

disponibilidade de fósforo, pois apresentam mecanismos de extração diferente do Mehlich-1, que dissolve predominantemente fósforo ligado a cálcio.

5.2. Hipóteses

Hipótese 1: Os teores de fósforo obtidos pelos extratores Resina e Olsen têm maior associação com o fósforo acumulado pelas plantas de arroz, já que ambos os métodos liberam ânions inorgânicos (HCO_3^- e OH^-), que proporcionam a dessorção do fósforo adsorvido na superfície dos argilominerais e dos óxidos de ferro.

Hipótese 2: Os métodos Mehlich-1 e Mehlich-3 têm menor associação com o fósforo acumulado pelas plantas de arroz em relação aos métodos Resina e Olsen, pois suas dissoluções, preferencialmente, ocorrem ao fósforo ligado ao cálcio do que ao ferro e/ ou ao alumínio.

Hipótese 3: O método P oxalato têm associação com o fósforo acumulado pelas plantas de arroz em solos com predominância de óxidos de ferro de baixa cristalinidade, já que essa forma de ferro é utilizada preferencialmente pelas bactérias anaeróbias como acceptor de elétrons no processo de respiração, resultando na liberação do fósforo adsorvido.

5.3. Objetivos

Objetivo 1: Relacionar os teores de fósforo no solo obtidos pelos extratores (Mehlich-1, Mehlich-3, Resina, Olsen, P oxalato) com o fósforo acumulado pelas plantas de arroz.

Objetivo 2: Associar os teores de fósforo no solo obtidos pelos extratores entre si.

5.4. Material e métodos

Para atingir os objetivos propostos, foi conduzido um experimento em vasos, na casa-de-vegetação do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, no período de outubro a novembro de 2005.

5.4.1. Características dos solos utilizados

Os solos utilizados no experimento foram os seguintes: a) Planossolo hidromórfico eutrófico solódico (SGe 3); b) Gleissolo háplico Ta distrófico (GXd); c) Luvisolo crômico pálico abruptico (TCp); d) Vertissolo ebânico órtico típico (VEo 2); e) Chernossolo ebânico carbonático vértico (MEk). Os resultados das análises físicas e químicas são apresentados na Tabela 3. Além disso, os teores das formas de óxidos de ferro e de manganês realizados encontram-se na Tabela 5.

5.4.2. Delineamento experimental e tratamentos

O experimento se constituiu por um fatorial 5x3, delineado em blocos ao acaso, com 3 repetições, onde foram estudados os seguintes fatores:

a) Fator Solos: Planossolo, Gleissolo, Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo.

Os solos foram escolhidos em função de serem oriundos de diferentes materiais de origem. Os solos Planossolo e Gleissolo são oriundos de sedimentos de granito, enquanto que os demais solos são oriundos de sedimento de basalto (Luvisolo, Vertissolo, Chernossolo).

b) Fator Doses de fósforo (mg P kg^{-1}): 0; 19,65 e 39,30.

As doses de fósforo, na forma de superfosfato triplo (SFT), foram utilizadas em função da dose recomendada com base no teor de fósforo Baixo e expectativa de produtividade superior a 9 Mg/ha. Logo, foram utilizadas as seguintes doses: uma testemunha ($0 \text{ mg de P kg}^{-1}$), uma correspondendo a dose sugerida pela recomendação para a maioria dos solos ($19,65 \text{ mg de P}$

kg^{-1}), que equivale a 90 kg de P_2O_5 ha e a outra com o dobro da dose sugerida (39,30 mg de P kg^{-1}).

5.4.3. Condução do experimento

Amostras da camada superficial dos solos (0-20 cm) foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de 1 cm de malha, sendo posteriormente, colocadas em vasos plásticos de 3 dm^3 , na quantidade de 2,5 kg de solo seco por vaso (unidade experimental). A fonte de fósforo (SFT) foi moída e passada em peneiras de 0,297 mm, para uniformizar o tamanho das partículas. Logo após, as doses desse adubo fosfatado foram pesadas e misturadas uniformemente às amostras de solo contido nos vasos, ficando as mesmas incubadas por 30 dias. Este período foi escolhido em função do trabalho conduzido por Barbosa Filho et al. (1987), os quais observaram que transformações de fósforo em suas diferentes frações ocorreram entre zero e 45 dias de contato fosfato-solo. Após este período, foram retiradas 50 g de solo de cada vaso, com a finalidade de avaliar os teores de fósforo por diferentes métodos que estão descrito nos Anexos 3 a 8. Em seguida, foram colocadas 8 sementes por vaso da cultivar IRGA 417 e mantidos com umidade gravimétrica em torno de 18%, pela da adição de água destilada até o estágio de V3 (Counce et al., 2000). Neste estágio, foi realizado primeiramente o desbaste, deixando-se 3 plantas por vaso e posteriormente foi realizada a aplicação de nitrogênio na dose de 30 mg L^{-1} de uréia dissolvida em água destilada. Posteriormente, os vasos foram alagados com água destilada, mantendo-se uma lâmina de água de 5 cm de altura durante 38 dias de alagamento. Neste período, a parte aérea das plantas foi cortada a 1 cm da superfície do solo e secada em estufa à temperatura de 65°C, por 72 horas. Após a pesagem do material para a avaliação da produção de matéria seca, o tecido foi moído e nele determinado as concentrações de fósforo pela metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

5.4.4. Análise estatística

Os teores de fósforo obtidos por cada extrator (variável x) e os teores de fósforo acumulado (variável y) foram submetidos à regressão linear. Os teores de fósforo obtidos entre os extratores foram submetidos à correlação linear. Ambos os métodos estatísticos foram utilizados com o Sistema de Análise Estatística para Microcomputadores –SANEST – (Zonta et al., 1984).

5.5. Resultados e discussão

Os teores de fósforo extraídos pelo Mehlich-1 variaram de 2,8 a 18,9 mg kg⁻¹ (Apêndice 1). Na Figura 13 está apresentada a relação estabelecida entre os teores de fósforo obtidos por este método e as quantidades acumuladas pelo arroz para todo o conjunto de solos em estudo, cujo coeficiente de determinação foi significativo a 5% (p<0,05). Resultados semelhantes foram observados por Silva (1996) em amostras de solos de várzea utilizadas para o cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

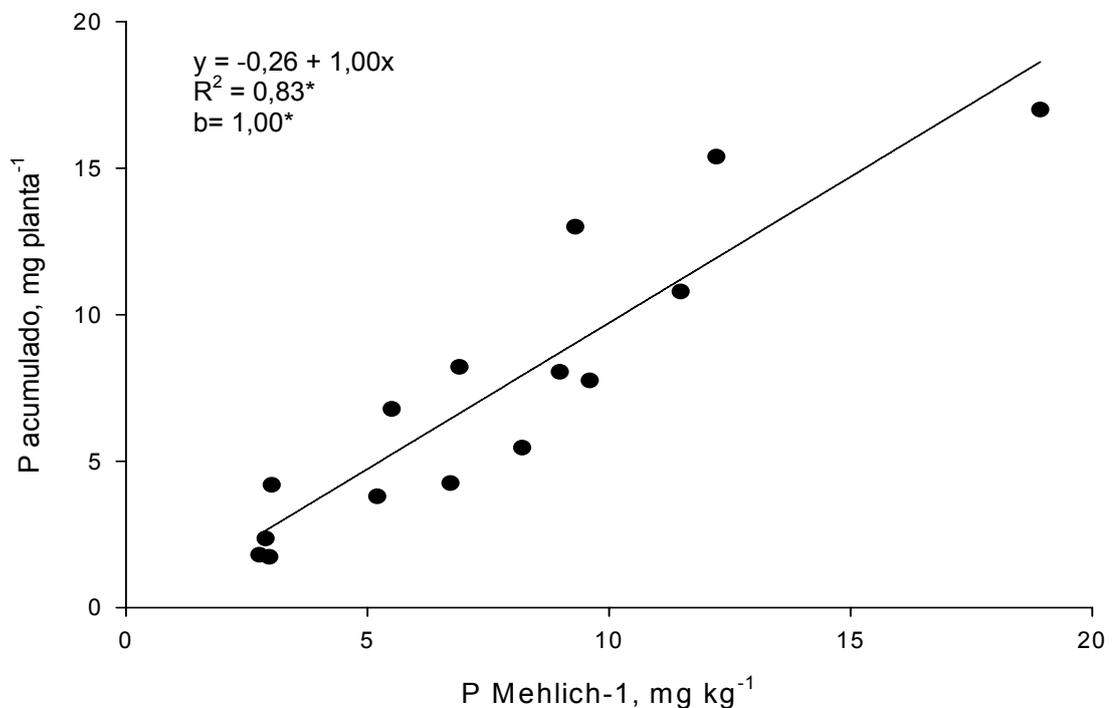


Figura 13. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo; Gleissolo; Luvissolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg de P kg⁻¹.

O princípio de extração de fósforo por este método baseia-se na manutenção da atividade do íon hidrogênio na solução, o qual promove a dissolução parcial de fosfatos de cálcio, ferro e alumínio.

O coeficiente angular (b) foi positivo e significativo a 5% pelo teste t de student. Isso indica que ocorre acúmulo de fósforo na planta com aumento dos teores de fósforo no solo. Resultados semelhantes foram observados nos demais extratores

Os teores de fósforo extraídos pelo Mehlich-3 variaram de 1,9 a 12,9 mg kg⁻¹ (Apêndice 2). Na Figura 14 está apresentada a relação estabelecida entre os teores de fósforo obtidos por este método e as quantidades acumuladas pelo arroz para todo o conjunto de solos em estudo, cujo coeficiente de determinação foi significativo a 5% ($p < 0,05$).

Os menores valores de fósforo no solo obtidos por este método em relação ao Mehlich-1 foram contraditórios aos obtidos por Sims (1989) e Kroth (1998). Segundo estes autores, a maior extração de fósforo pelo Mehlich-3 foi atribuída às características químicas do extrator. A presença do íon fluoreto extrai preferencialmente o fósforo ligado ao alumínio (Kamprath & Watson, 1980). A presença de agentes complexantes contribui significativamente na eliminação da readsorção de fósforo pelo solo, fazendo com que não ocorra a exaustão do extrator, em solos argilosos, aumentando assim as quantidades de fósforo extraídas. Entretanto, os menores teores de fósforo extraídos pelo Mehlich 3 em relação Mehlich 1, podem ter ocorrido devido a baixa saturação de alumínio obtida na maioria dos solos (Planossolo, Vertissolo e Chernossolo), já que o Mehlich-3 extrai principalmente fósforo ligado ao alumínio, devido à presença do fluoreto de amônio. Além disso, os teores de argila dos solos utilizados se enquadram na classe 3 e 4, não ocorrendo a exaustão do Mehlich-1.

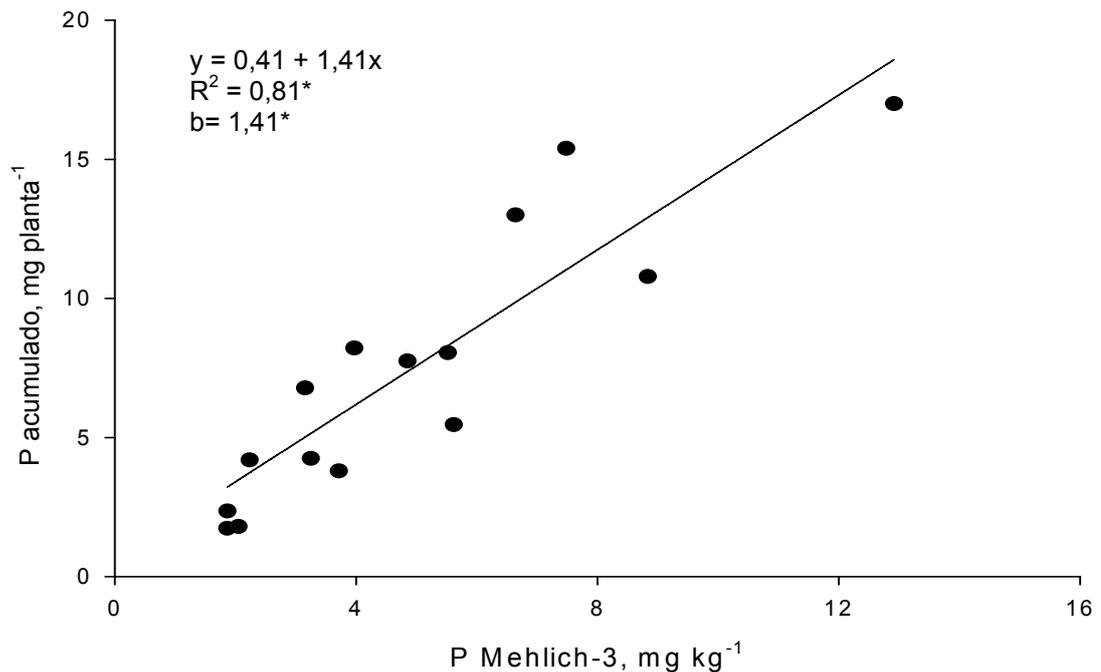


Figura 14. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Mehlich-3 e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo; Gleissolo; Luvissolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg de P kg⁻¹.

Os teores de fósforo obtidos pelo método da Resina, variaram de 1,6 a 11,1 mg kg⁻¹ (Apêndice 3). Na Figura 15 está apresentada a relação estabelecida entre os teores de fósforo obtidos por este método e as quantidades acumuladas pelo arroz para todo o conjunto de solos em estudo, cujo coeficiente de determinação foi significativo a 5% ($p < 0,05$).

Entre os cinco métodos testados, a Resina foi a mais eficiente para avaliar a disponibilidade do fósforo nas amostras de todos os solos. Grande et al. (1986) relata que a eficiência da Resina deve estar associada à transferência do fósforo lábil do solo à resina e principalmente pelo pH de equilíbrio entre 6,5 e 7,0 do extrato com a Resina. Este pH coincide com aquele que ocorre em solos reduzidos do Rio Grande do Sul, após o equilíbrio, o qual é muito distinto daquele encontrado em solo seco, geralmente com pH ácido, ambiente desfavorável à extração de fósforo ligado ao ferro. Teo et al. (2005) estudaram a relação de vários extratores (Mehlich-3, Bray-1, Olsen e Resina) com o fósforo acumulado pelas plantas, em três solos utilizados na cultura de arroz irrigado no Estado de Arkansas (E.U.A.). Os resultados

demonstraram que a Resina apresentou maiores coeficientes de determinação nos estádios vegetativo e reprodutivo.

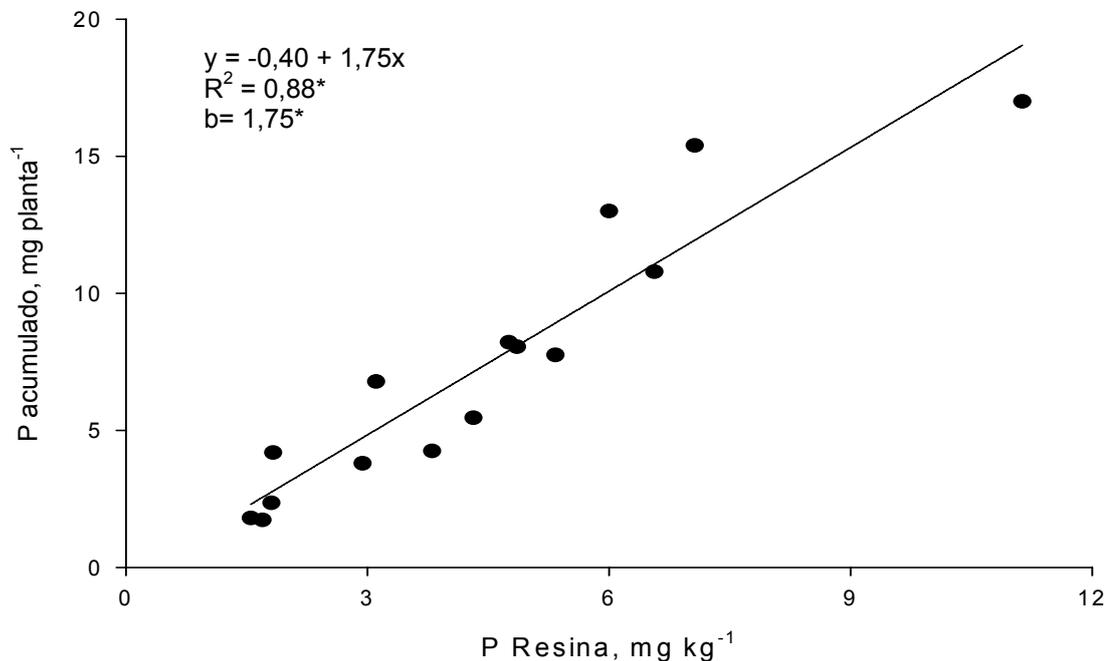


Figura 15. Relação entre os teores de fósforo extraídos pela Resina e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo; Gleissolo; Luvissolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg de P kg⁻¹.

Os teores de fósforo obtidos pelo método de Olsen, variaram de 7,5 a 35,8 mg kg⁻¹ (Apêndice 4). Na Figura 16 está apresentada a relação estabelecida entre os teores de fósforo obtidos por este método e as quantidades acumuladas pelo arroz para todo o conjunto de solos em estudo, cujo coeficiente de determinação foi significativo a 5% ($p < 0,05$). O coeficiente de determinação obtido por esse método foi intermediário aos valores obtidos pelo método da Resina e Mehlich-1.

Chang (1978) relatou que o método de Olsen é utilizado em todos os tipos de solos, independentemente do valor de pH do solo. Em solos ácidos, ocorre aumento na solubilidade de fosfatos de ferro e alumínio, desorvendo o fósforo, enquanto que nos solos próximos a neutralidade ou neutros, ocorre a precipitação de CaCO₃, impedindo a precipitação de fosfatos de cálcio.

Ranno (2004) realizou o fracionamento de fósforo pelo método de Chang & Jackson (1957) em solos do Rio Grande do Sul utilizados na cultura de arroz irrigado. Os resultados demonstraram que a fração de fósforo

predominante em ambientes sazonalmente reduzidos, é aquela ligada ao ferro, o que favoreceria a utilização de extratores alcalinos.

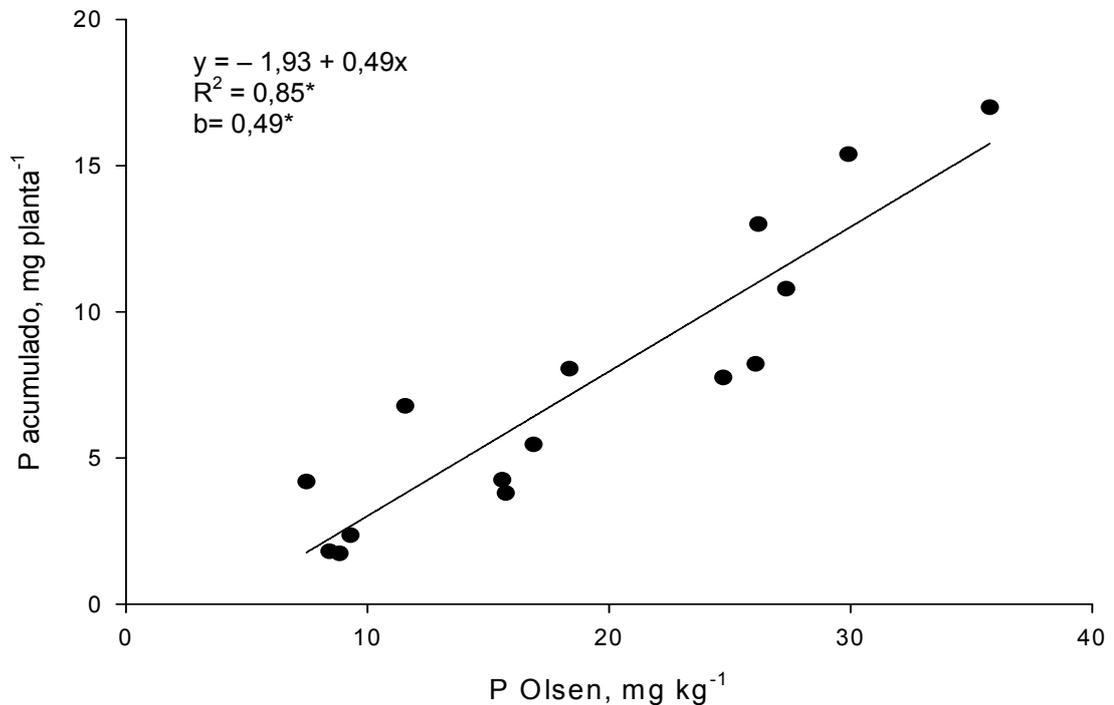


Figura 16. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Olsen e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo; Gleissolo; Luvissolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg de P kg⁻¹.

Os teores de fósforo obtidos pelo método de P oxalato, variaram de 15,2 a 71,9 mg kg⁻¹ (Apêndice 5). Este método extraiu quantidade maior de fósforo em relação aos demais métodos.

Na Figura 17 está apresentada a relação estabelecida entre os teores de fósforo obtidos por este método e as quantidades acumuladas pelo arroz para todo o conjunto de solos em estudo, cujo coeficiente de determinação foi significativo a 5% ($p < 0,05$). Este extrator apresentou menor eficiência em relação aos demais métodos, indicando que em somente 59% dos casos houve relação da quantidade de fósforo extraída do solo com a quantidade acumulada pelas plantas ($R^2 = 0,59^*$). Isso se deve, provavelmente, a extração de fósforo preferencialmente dos óxidos de ferro de baixa cristalinidade não contemplando a liberação de fósforo adsorvido aos óxidos de ferro cristalino. Favre et al. (2002), utilizando o espectra Mossbauer,

observaram completa dissolução da deposição de goetitha após a redução do ferro.

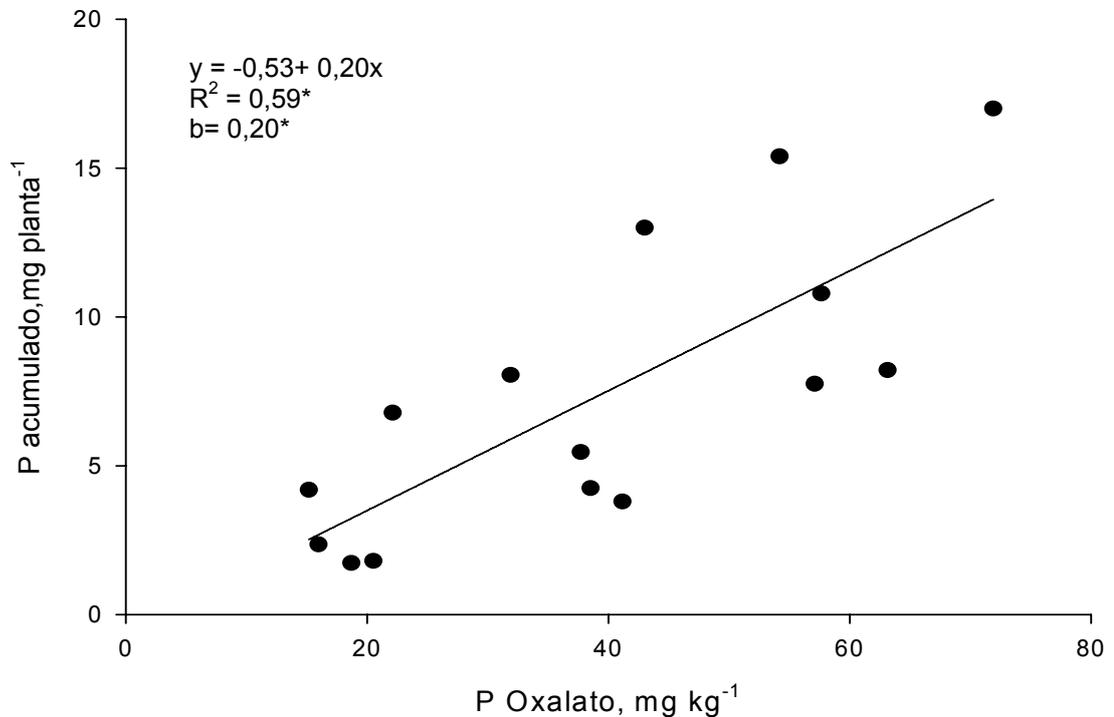


Figura 17. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo P oxalato e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo; Gleissolo; Luvissolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg de P kg⁻¹.

Outra possibilidade é a época diferenciada de redução dos óxidos de ferro de baixa cristalinidade com liberação do fósforo adsorvido entre os solos oriundos de diferentes materiais de origem. É provável que nos solos oriundos de sedimento de granito, o fósforo extraído pelo P oxalato pode ser dessorvido dos óxidos férricos a óxidos ferrosos, durante a redução do solo, tornando-o disponível para absorção pelas plantas, enquanto que nos solos oriundos de sedimento de basalto, o fósforo extraído pelo P oxalato pode ser parcialmente dessorvido dos óxidos férricos a óxidos ferrosos, tornando-o parcialmente disponível para absorção pelas plantas.

Com exceção do P oxalato, de uma maneira geral os métodos se mostraram eficazes para avaliar a disponibilidade de fósforo para a cultura, apresentando, inclusive, correlação significativa entre si (Tabela 7).

Tabela 7. Coeficiente de correlação linear (r) entre as quantidades de fósforo do solo extraído por diferentes métodos de extração

	Mehlich1	Mehlich 3	RTA	Olsen	P oxalato
Mehlich1	-	0,97**	0,99**	0,92**	0,84**
Mehlich 3	0,97**	-	0,97**	0,89**	0,79*
RTA	0,99**	0,97**	-	0,95**	0,86**
Olsen	0,92**	0,89**	0,95**	-	0,94**

* Significativo a 5% de probabilidade; ** Significativo a 1% de probabilidade.

Nesse estudo, buscou-se também agrupar os solos de acordo com alguma característica destes que influencie na disponibilidade de fósforo após o alagamento. Os óxidos de ferro de baixa cristalinidade extraídos a pH 6 (Tabela 5) são indicadores do aumento na disponibilidade de fósforo com a redução do solo. Essas formas de ferro são utilizadas preferencialmente pelas bactérias anaeróbias durante a redução dos óxidos férricos a ferrosos, aumentando a solubilidade do ferro e indiretamente os teores de fósforo na solução (Munch & Ottow, 1980; Kämpf, 1988). Além disso, os óxidos de ferro de baixa cristalinidade apresentam associação com a adsorção de fósforo em condições oxidadas e também com a adsorção de fósforo que ocorre anteriormente à redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos sob alagamento. Desta forma, separando-se os solos em função dos óxidos de ferro de baixa cristalinidade, possibilitaria-se o aumento das relações dos extratores com os teores de fósforo acumulados pelas plantas. Como consequência, poderiam ser obtidos diferentes níveis críticos de fósforo para cada grupo de solos. Diante desses argumentos, os solos foram separados em dois grupos (Tabela 8). O grupo 1 representado pelos solos oriundos de sedimento de granito (Planossolo e Gleissolo) com menores teores de óxidos de ferro de baixa cristalinidade, enquanto que o grupo 2 foi representado pelos solos oriundos de sedimento de basalto (Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo) com maiores teores de óxidos de ferro de baixa cristalinidade.

O efeito do agrupamento dos solos nos grupos 1 e 2 promoveu o aumento no coeficiente de determinação para a maioria dos métodos (Tabela 8; Apêndices 7 a 16), com exceção da Resina no grupo 1 e Mehlich-3 no grupo 2. Isso demonstra que os teores de óxidos de ferro de baixa cristalinidade

podem ser utilizados para aumentar a eficiência dos extratores de fósforo, sendo possível a obtenção de níveis críticos de fósforo diferenciados entre os solos oriundos de sedimento de basalto e os solos oriundos de sedimento de granito.

Em ambos os grupos de solos, foram observados aumentos consideráveis no coeficiente de determinação do extrator P oxalato. Isso pode ser explicado pelo mecanismo de extração deste método, associados a predominância dos teores de óxidos de ferro de baixa cristalinidade encontrados nos solos oriundos de sedimento de granito e basalto (Tabela 5). Segundo Schwertmann & Fischer (1973), a razão Fe_{ox3}/Fe_{dit} superior a 0,10, indica a predominância dos teores de óxidos de ferro de baixa cristalinidade nos solos. Os maiores coeficientes de determinação observados para o P oxalato foram obtidos no grupo 1. Isso se deve, provavelmente, a cinética diferenciada de dessorção de fósforo dos óxidos de ferro de baixa cristalinidade entre os solos oriundos de sedimento de granito e basalto ao longo do tempo de alagamento, já mencionadas anteriormente.

Tabela 8. Coeficiente de determinação entre os teores de fósforo obtidos pelos extratores e as quantidades de fósforo acumulados pelas plantas de arroz, considerando todos os solos como um único conjunto e separando-os em grupos de acordo com os teores de ferro de baixa cristalinidade extraídos por oxalato a pH 6

Métodos	Grupos de solo**		
	Geral	1	2
Mehlich-1	0,83*	0,84*	0,86*
Mehlich-3	0,81*	0,83*	0,79*
Resina	0,88*	0,88*	0,95*
Olsen	0,85*	0,98*	0,95*
P oxalato	0,59*	0,95*	0,85*

* Significativo 5% de probabilidade; ** Grupo 1: Planossolo e Gleissolo; Grupo 2: Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo

5.6. Conclusões

Conclusão 1: Com exceção da extração com P oxalato, as quantidades de fósforo extraídas das amostras de solos com os métodos Mehlich-1, Mehlich-3, Resina e Olsen apresentaram relação significativa com as quantidades de fósforo acumuladas pelas plantas de arroz.

Conclusão 2: A separação dos solos em grupos segundo o material de origem e os teores de óxidos de ferro de baixa cristalinidade extraídos com oxalato a pH 6, resultou em melhor eficiência dos métodos testados.

6. CAPÍTULO IV - Estudo 3: Disponibilidade de fósforo em solos reduzidos oriundos de diferentes materiais de origem

6.1. Introdução

O Rio Grande do Sul apresentou na safra de 2005/2006 uma produtividade média de 6,3 Mg ha⁻¹(Conab, 2007), abaixo do potencial produtivo das cultivares de arroz irrigado utilizadas neste estado, que são superiores a 10 Mg ha⁻¹(Azambuja et al., 2004). Com a finalidade de aumentar este potencial, tem sido recomendada a adoção correta de inúmeras práticas de manejo integrado da cultura, que inclui a nutrição do arroz irrigado. Dentre os macronutrientes exigidos por essa cultura, o fósforo tem merecido menor atenção, já que a sua própria tabela de recomendação para o arroz sugere que a disponibilidade deste elemento é a mesma para todos os solos, ou seja, com o alagamento do solo ocorre aumento na concentração de fósforo na solução de maneira semelhante em todos os solos. Essa recomendação foi obtida por estudos de calibração em experimentos de campo, realizados entre as décadas de 70 e 80, em solos derivados de arenito, siltito e granito, pertencentes à classe de solos Planossolos. Os experimentos mencionados proporcionaram a obtenção do teor crítico de 6 mg L⁻¹, ocorrendo a partir daí uma generalização daquela recomendação para todos os solos, estando classificados como classe solos alagados no Sistema de Recomendações de Adubação e de Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS/2004). Entretanto, a expansão do arroz irrigado para outras regiões agrícolas, como as localizadas na Fronteira Oeste, possibilitou a utilização de solos oriundos de sedimento de basalto, os quais, provavelmente, proporcionam variações nas características mineralógicas, eletroquímicas e

químicas da solução do solo e, conseqüentemente, afetam a disponibilidade de fósforo de maneira diferenciada em relação aos solos Planossolos.

Sousa (2001) observou que em um solo Plintossolo, oriundo de sedimento de basalto, a cinética de solubilização de manganês e de ferro foi atrasada em relação a um Planossolo. Resultados semelhantes foram observados por Gonçalves (2003), o qual observou que um Cambissolo oriundo de sedimento de basalto, apresentou também solubilização diferenciada de fósforo em relação ao Planossolo. Contudo, não foi possível observar se essas diferenças afetaram o rendimento das plantas, já que o objetivo do trabalho foi determinar a solubilização de fosfatos naturais e superfosfato triplo, na ausência de plantas. Desta forma, é necessária a realização de estudos com o objetivo de verificar a influência, ou não, das características mencionadas anteriormente na disponibilidade de fósforo para as plantas de arroz em solos oriundos de diferentes materiais de origem.

6.2. Hipóteses

Hipótese 1: Os solos oriundos de sedimento de arenito e granito, representados pelos solos da Classe Planossolo, por apresentarem menores teores de oxihidróxidos de manganês e de ferro, possuem uma rápida solubilização de ferro e, conseqüentemente, maior disponibilidade de fósforo nos estágios iniciais de alagamento do solo, enquanto que os solos oriundos de sedimento de basalto, representados pelo Chernossolo, Vertissolo e Luvisolo, por apresentarem maiores teores de oxihidróxidos de manganês e ferro, possuem uma lenta solubilização de ferro e fósforo com o decorrer do alagamento do solo.

Hipótese 2: Os solos da Classe Planossolo promovem maior produção de matéria seca e quantidade de fósforo acumulado pelo arroz do que os solos Chernossolo, Vertissolo e Luvisolo, considerando-se apenas os teor de fósforo disponível nativo sem adição de fonte de fósforo. Logo, os solos oriundos de sedimento de basalto apresentam maior resposta à adubação fosfatada do que os solos Planossolos.

Hipótese 3: A presença de plantas e a adição de fósforo resulta em maior concentração de fósforo na solução, concentração de fósforo no tecido, produção de matéria seca e fósforo acumulado pelo arroz do que a presença de plantas e sem a adição de SFT em todos os solos utilizados.

6.3. Objetivos

Objetivo 1: Determinar a influência das características eletroquímicas e químicas na disponibilidade de fósforo em solos oriundos de diferentes materiais de origem.

Objetivo 2: Determinar a influência ou não da adubação fosfatada em solos oriundos de diferentes materiais de origem.

6.4. Material e métodos

Para atingir o objetivo proposto, foi conduzido um experimento, em vasos na casa-de-vegetação do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, no período de dezembro de 2005 a fevereiro de 2006.

6.4.1. Características dos solos utilizados

Os solos utilizados no experimento foram os seguintes: a) Planossolo hidromórfico eutrófico solódico; b) Planossolo hidromórfico eutrófico arênico; c) Luvissole crômico pálico abrupto; d) Vertissolo ebânico órtico típico; e) Chernossolo ebânico carbonático vértico.

Os resultados das análises físicas e químicas são apresentados na Tabela 3. Além disso, os teores das formas de óxidos de ferro e de manganês realizados encontram-se na Tabela 5.

6.4.2. Delineamento experimental e tratamentos

O experimento se constituiu por um fatorial 5x3, delineado em blocos ao acaso, com 3 repetições, onde foram estudados os fatores e correspondentes níveis especificados a seguir.

a) Solos: Planossolos (SGe 3 e SGe 1), Luvissole, Vertissolo e Chernossolo.

Os solos foram escolhidos em função de serem oriundos de diferentes materiais de origem. Os Planossolos (SGe 3, SGe 1) oriundos de sedimentos de granito e arenito, respectivamente. Os demais solos são oriundos de sedimento de basalto (Luvissole, Vertissolo, Chernossolo).

b) Adubação fosfatada: com a presença de plantas sem a adição de fósforo; com a presença de plantas com a adição de fósforo (39,30 mg de P kg⁻¹); sem a presença de plantas (este nível foi utilizado para verificar a solubilização do fósforo nativo sem a presença de plantas).

O fator adubação fosfatada foi escolhido em função da resposta ou não das plantas de arroz à adubação fosfatada.

6.4.3. Sistema de coleta da solução do solo

O sistema de coleta foi construído com cano de PVC com 2,5 cm de diâmetro interno e 4 cm de comprimento, com as extremidades recobertas com tela de nylon com abertura de malha de 0,01 cm (Figura 18). No seu centro foi afixado um tubo de polietileno com 20 cm de comprimento e 0,6 cm de diâmetro interno. Na outra extremidade deste tubo foram colocadas duas camadas de 2 cm de resina de borracha separadas por uma camada de 2 cm de mercúrio para vedação do sistema, impedindo a entrada de oxigênio.

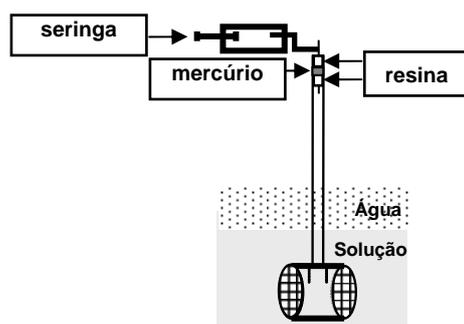


Figura 18. Sistema coletor da solução do solo

As coletas da solução foram realizadas através de um sistema composto por mangueira de borracha, que apresentava uma agulha em uma das extremidades e seringa comercial de polipropileno de 60 ml em outra extremidade. O procedimento adotado foi realizado da seguinte maneira: a agulha acoplada à mangueira foi injetada na resina de borracha situada na extremidade do tubo de polietileno, enquanto que na outra extremidade da borracha foi realizada uma leve sucção com a seringa para que a solução do solo se deslocasse até a célula eletrométrica construída em resina acrílica. Parte desta foi utilizada para determinação de pH e Eh, enquanto que o restante foi coletado para análises químicas.

6.4.4. Condução do experimento

Amostras da camada superficial dos solos (0-20 cm) foram expostas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de 1 cm de malha, sendo posteriormente, colocadas em recipientes de vidro de 2,5 dm³ (unidade experimental) na quantidade de 2,2 kg de solo seco. A fonte de fósforo utilizada foi moída e passada em peneira de 0,297 mm, para uniformizar o tamanho das partículas. À medida que as amostras do solo foram homogeneizadas, com ou sem SFT, nas unidades experimentais, acomodou-se os sistemas de coleta de solução, de modo que ficassem a uma profundidade de 10 cm. Posteriormente, foram retiradas 50 g de solo das unidades experimentais para determinação dos teores de óxidos de ferro e de manganês (oxalato de amônio pH 6,0 e 3,0 e ditionito bicarbonato de sódio), determinação do fósforo disponível (Mehlich-1 e Resina) e fracionamento de fósforo (Hedley et al., 1982). Após a aplicação dos tratamentos, os solos receberam 8 sementes da cultivar IRGA 417 e foram mantidos com umidade gravimétrica em torno de 18%, pela adição de água destilada até o estágio V3 (Counce, 2000). Neste estágio, foi realizado primeiramente o desbaste, deixando-se 3 plantas por unidade experimental e posteriormente foi realizada a aplicação de nitrogênio na dose de 30 mg L⁻¹ de uréia dissolvida em água destilada. Após, as unidades experimentais foram alagadas com água destilada, mantendo-se uma lâmina de água de 5 cm de altura durante 35 dias de alagamento (estádio V6). Durante o período de alagamento foram feitas coletas semanais da solução do solo para análise das

características eletroquímicas e químicas. Aos 35 dias de alagamento, a parte aérea das plantas foi coletada a 1 cm da superfície do solo, e secada em estufa à temperatura de 65°C, por 72 horas. Posteriormente à pesagem do material e avaliação da produção de matéria seca, o tecido foi moído e nele determinado as concentrações de fósforo através da metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

O fósforo acumulado foi obtido pela multiplicação da produção de matéria seca e a concentração de fósforo no tecido da parte aérea.

6.4.5. Indicadores avaliados

As análises de Eh e pH da solução dos solos foram realizados pelo uso de eletrodos específicos, ligados a um potenciômetro e previamente instalados em um recipiente de vidro, semelhante ao que foi utilizado por Sousa et al. (2002).

O pH foi analisado semanalmente, enquanto que o Eh foi avaliado aos 14 e 28 dias de alagamento do solo. Após as determinações das características eletroquímicas na solução do solo, aproximadamente 20 mL de solução foram filtrados diretamente para frascos de vidro, onde havia sido colocado 2 ml de HCl 1,1 mol L⁻¹, para que a concentração final de HCl da amostra ficasse em torno de 0,1 mol L⁻¹, possibilitando desta maneira a análise da composição química das amostras em laboratório.

Durante os 35 dias de alagamento foram avaliadas semanalmente as concentrações de manganês, ferro, cálcio e magnésio, por espectroscopia de absorção atômica (Perkin Elmer, 403), potássio por fotometria de chama (Digimed, NK-2000) e fósforo por fotocolorímetro (Varian series 634).

O carbono orgânico dissolvido foi obtido em analisador automático de carbono ("TOC analyzer" Shimadzu) e o sulfato por fotocolorimetria (Varian, series 634), ambos determinados aos 14 e 28 dias de alagamento. Nestes períodos, foram preditas as espécies iônicas presentes na solução pela utilização do software Minteq A2.

6.4.6. Análise estatística

A concentração de fósforo no tecido da parte aérea, produção de matéria seca e fósforo acumulado, foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade.

6.5. Resultados e discussão

O pH e a concentração de manganês, ferro, cálcio, ferro e fósforo na solução são discutidas em função do objetivo 1. A concentração de fósforo na parte aérea, produção de matéria seca e fósforo acumulado são discutidas em função do objetivo 2.

6.5.1. pH na solução

Os valores de pH na solução aumentaram com o alagamento do solo, em decorrência das reações de oxirredução que se processaram com consumo de hidrogênio em todos os tratamentos (Ponnamperuma, 1972). Nos solos Planossolo SGe 3 e Planossolo SGe 1, o aumento ocorreu até os 28 dias de alagamento, estabilizando-se a seguir (Figuras 19 e 20). Isso coincidiu com a estabilização das concentrações de ferro na solução de ambos os solos (Figuras 29 e 30). Comportamento semelhante a este, em um Planossolo SGe 3, foram encontrados por Madruga (1999), Sousa (2001) e Gonçalves (2003).

Os demais solos, não apresentaram estabilização dos valores de pH aos 35 dias de alagamento (Figuras 21 a 23). Esses resultados foram semelhantes aos obtidos por Sousa (2001) em um solo da classe Plintossolo, oriundo de sedimento de basalto, onde não ocorreu estabilização, mesmo após 88 dias de alagamento. Os maiores teores de ferro e de manganês cristalinos e de baixa cristalinidade presentes nos solos Chernossolo, Vertissolo e Luvisolo em relação aos solos da Classe Planossolo (Tabela 5), determinam a necessidade de um maior período de alagamento para atingir o equilíbrio. Conseqüentemente, após os 35 dias de alagamento, provavelmente, haveria

aumento nos valores de pH, devido ao consumo de hidrogênio pelas reações de redução do manganês, ferro e sulfato.

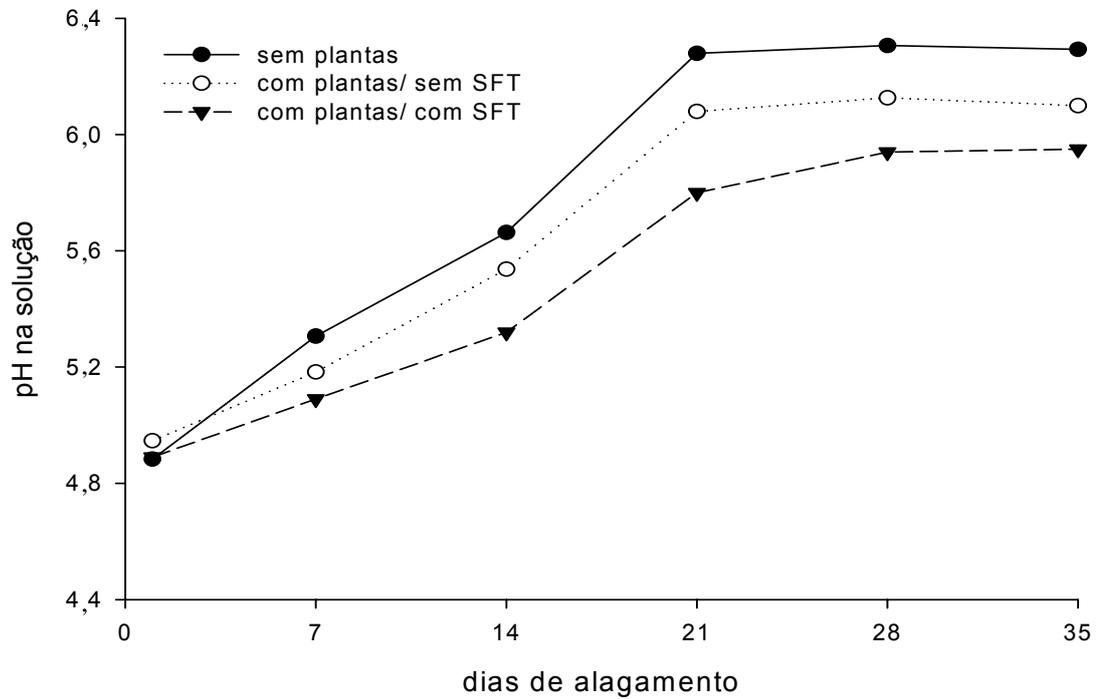


Figura 19. Valores de pH na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

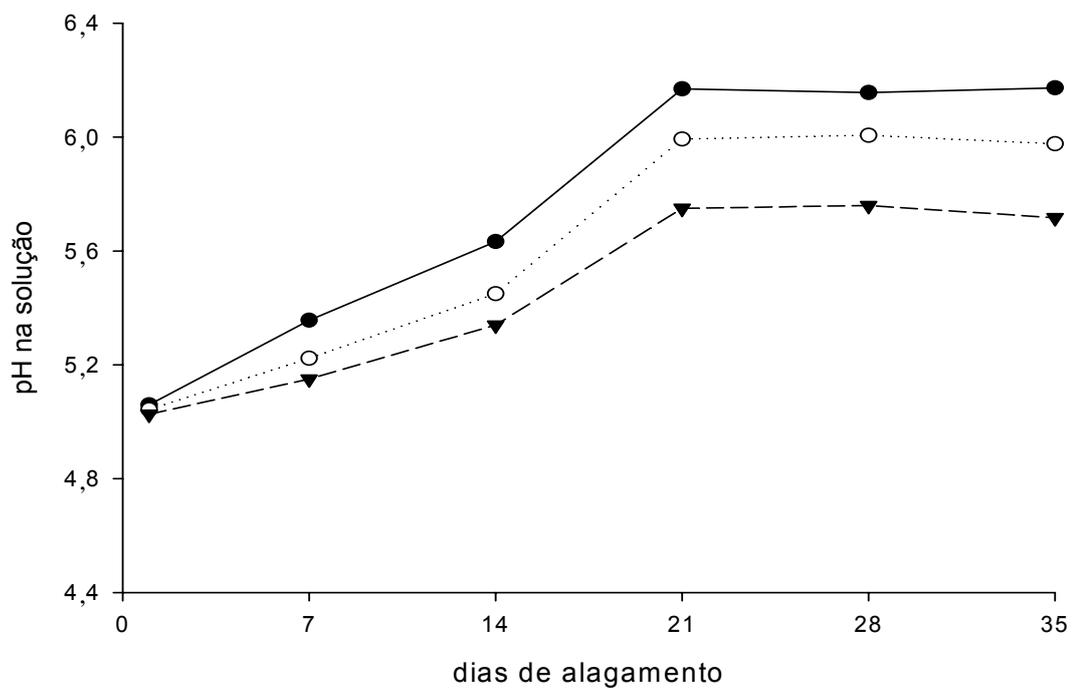


Figura 20. Valores de pH na solução do Planossolo SGe 1 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

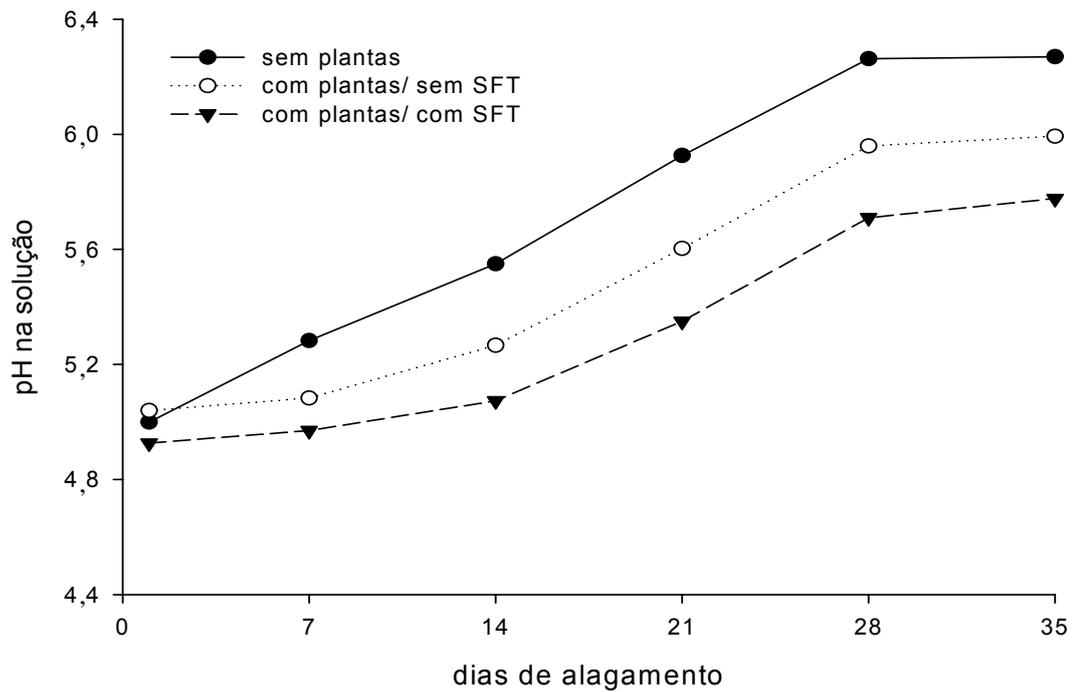


Figura 21. Valores de pH na solução do Luvisssolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

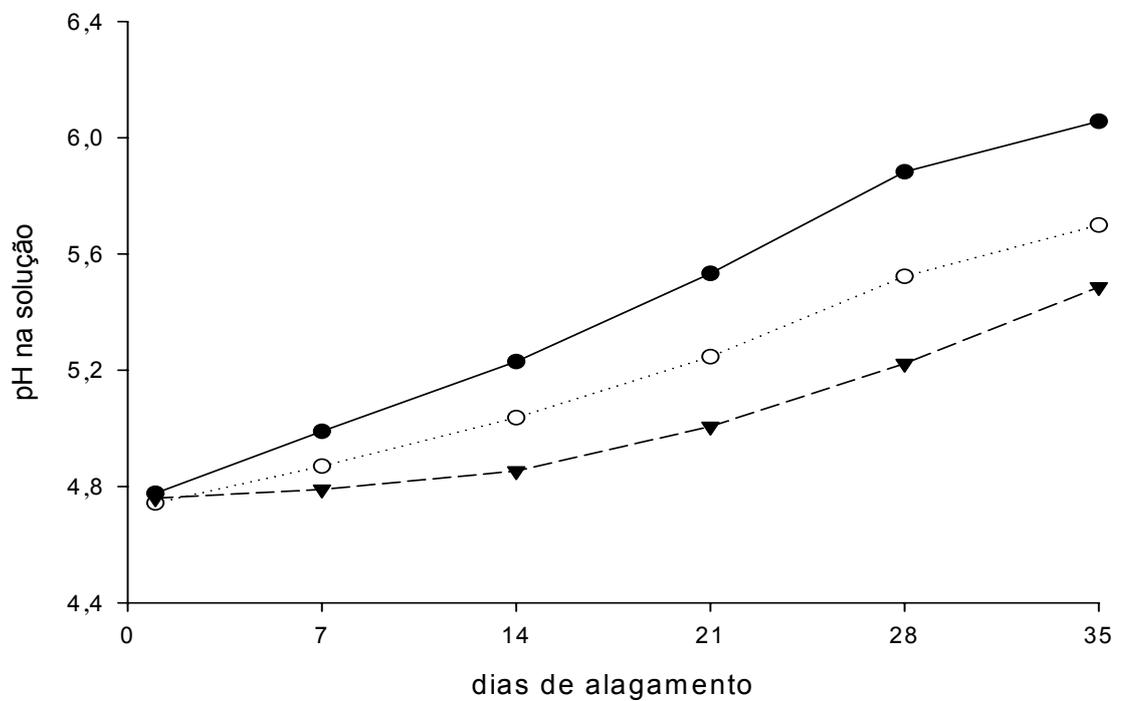


Figura 22. Valores de pH na solução do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

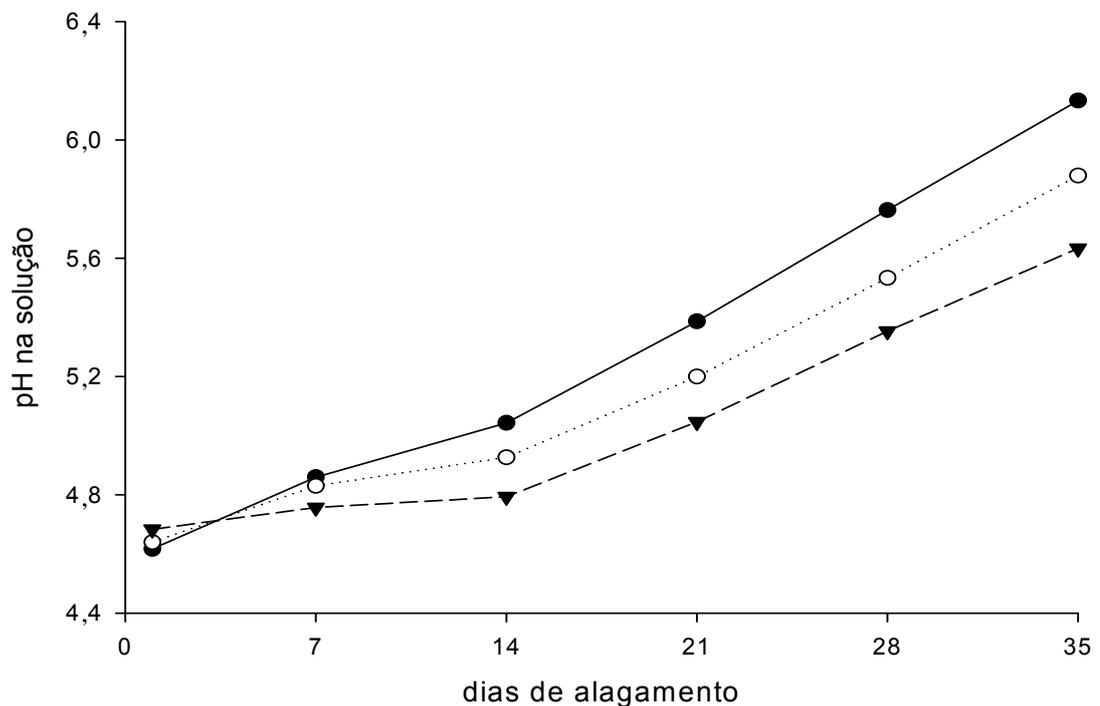


Figura 23. Valores de pH na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

6.5.2. Manganês na solução

As concentrações de manganês na solução do Planossolo SGe 3 e Planossolo SGe 1 aumentaram até os 7 dias de alagamento (Figuras 24 e 25). O aumento ocorreu pela redução das formas mangânicas para formas manganosas, mais solúveis. Após este período, ocorreu uma diminuição até 14 dias de alagamento, mantendo-se os valores estáveis nos períodos seguintes. As baixas concentrações de manganês na solução foram atribuídas aos baixos teores de óxidos mangânicos passíveis de redução presentes nestes solos (Tabela 5). Resultados semelhantes foram observados por Sousa (2001) e Gonçalves (2003), os quais observaram em um solo da classe Planossolo baixas concentrações de manganês na solução durante 88 dias de alagamento.

O solo Luvisolo apresentou aumento nas concentrações de manganês na solução até os 21 dias de alagamento (Figura 26). Enquanto que os solos Vertissolo e Chernossolo apresentaram aumento durante os 35 dias de alagamento (Figuras 27 e 28). Sousa (2001) e Gonçalves (2003), não

observaram estabilização das concentrações de manganês na solução do solo Plintossolo e Cambissolo durante 88 dias de alagamento.

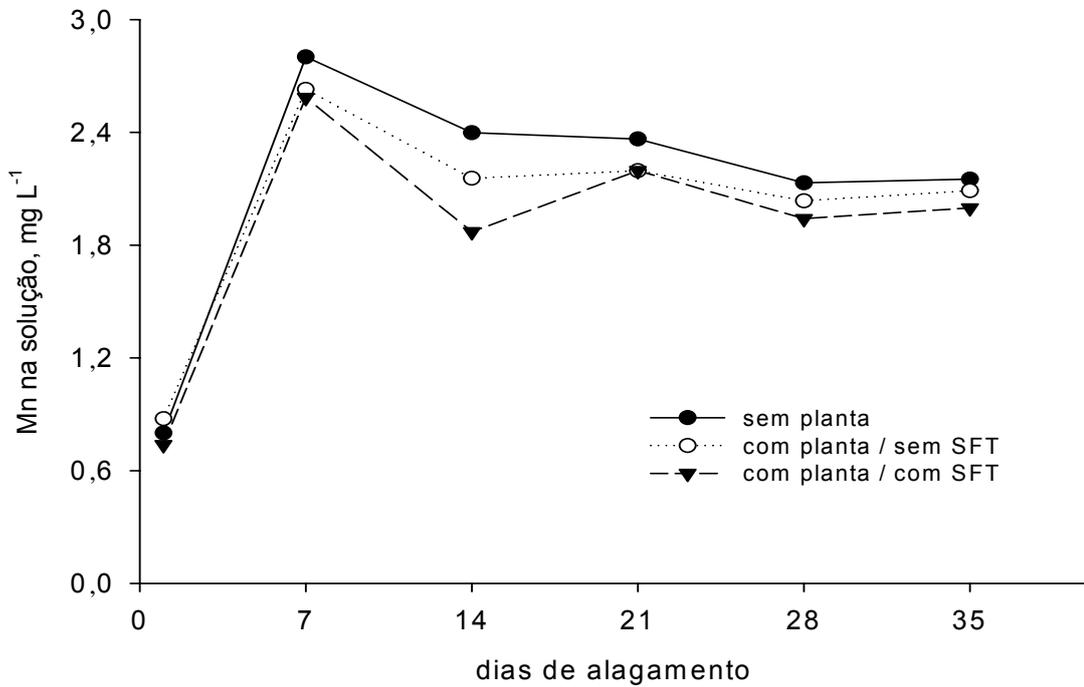


Figura 24. Concentração de manganês na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

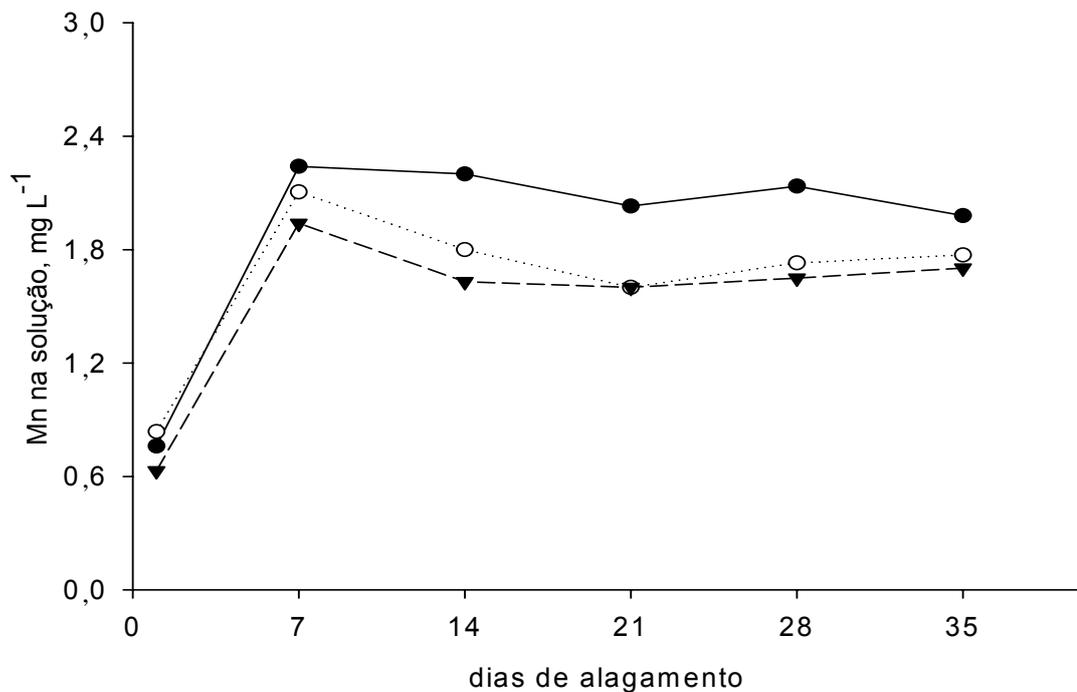


Figura 25. Concentração de manganês na solução do Planossolo SGe 1 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

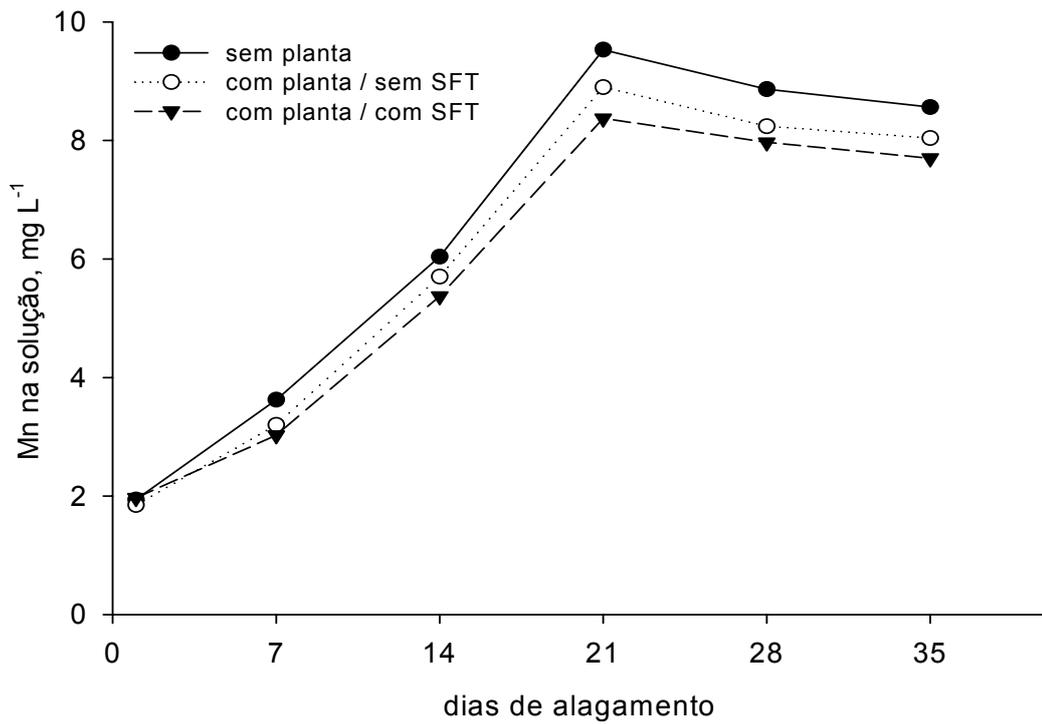


Figura 26. Concentração de manganês na solução do Luvissoilo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

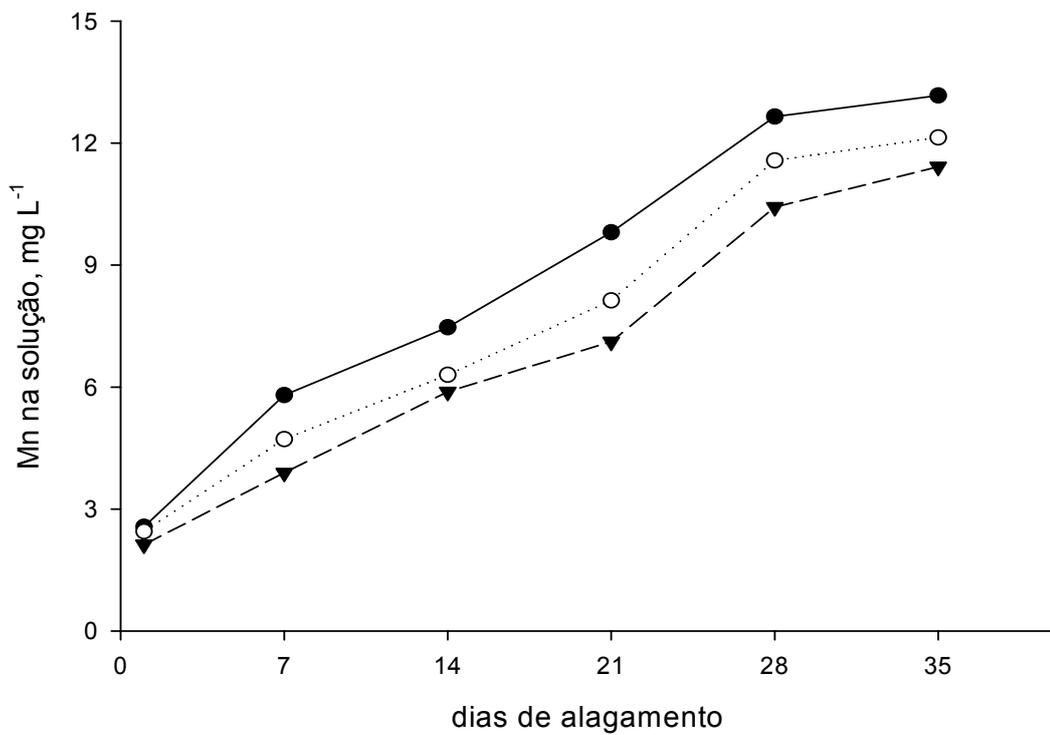


Figura 27. Concentração de manganês na solução do Vertissoilo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

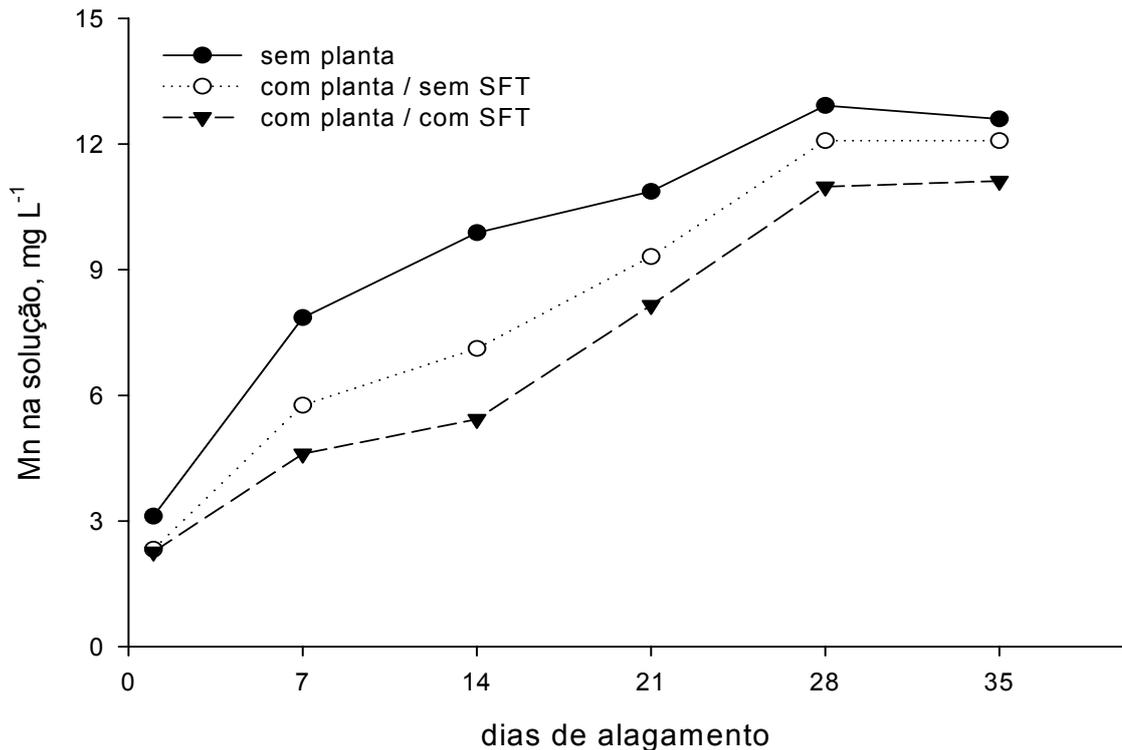


Figura 28. Concentração de manganês na solução do solo Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

6.5.3. Ferro na solução

As concentrações de ferro na solução do Planossolo SGe 3 e Planossolo SGe 1 aumentaram até os 21 dias de alagamento, diminuindo a seguir para valores estáveis (Figuras 29 e 30). O aumento ocorreu devido à redução das formas férricas pouco solúveis, para formas ferrosas, de maior solubilidade (Ponnamperuma, 1972). O comportamento do ferro na solução destes solos foi semelhante em um solo Planossolo SGe 3 observados por Madruga (1999), Sousa (2001) e Gonçalves (2003).

O solo Luvissole apresentou aumento nas concentrações de ferro na solução até os 28 dias de alagamento, enquanto que aos 35 dias de alagamento ocorreu estabilização nos seus valores (Figura 31). Os solos Vertissolo e Chernossolo apresentaram aumentos constantes de ferro na solução (Figuras 32 e 33). Esses solos, por apresentarem maiores teores de manganês e de ferro extraídos por oxalato de amônio, necessitam de um

tempo maior para que o equilíbrio seja atingido. Sousa (2001) observou durante 88 dias de alagamento, aumento gradual na concentração de ferro na solução de um Plintossolo, oriundo de sedimento de basalto.

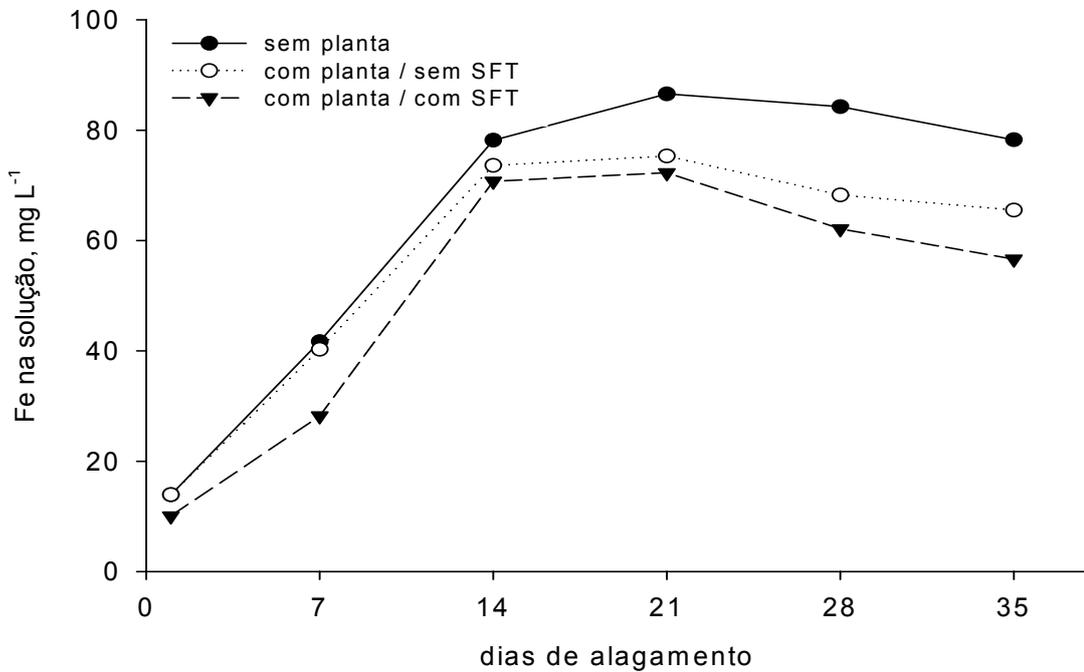


Figura 29. Concentração de ferro na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

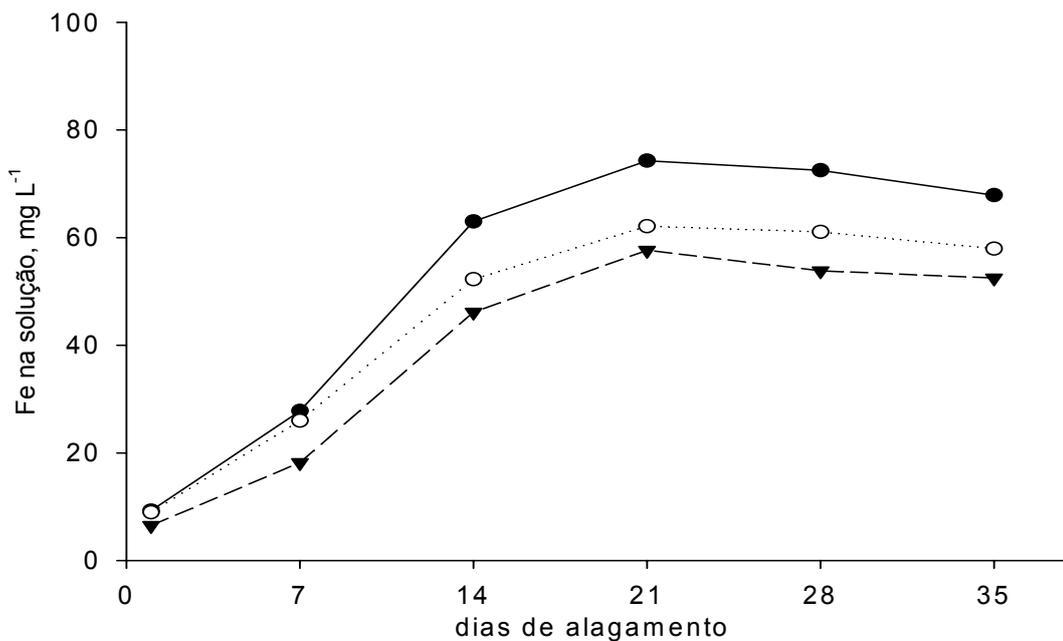


Figura 30. Concentração de ferro na solução do Planossolo SGe 1 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

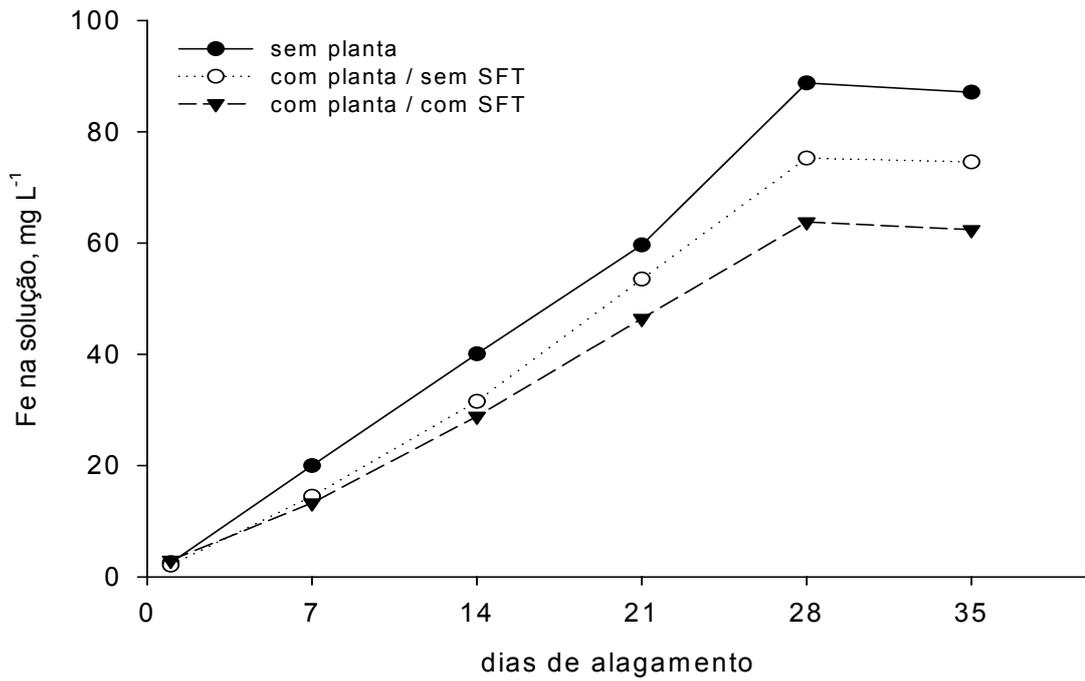


Figura 31. Concentração de ferro na solução do Luvisol em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

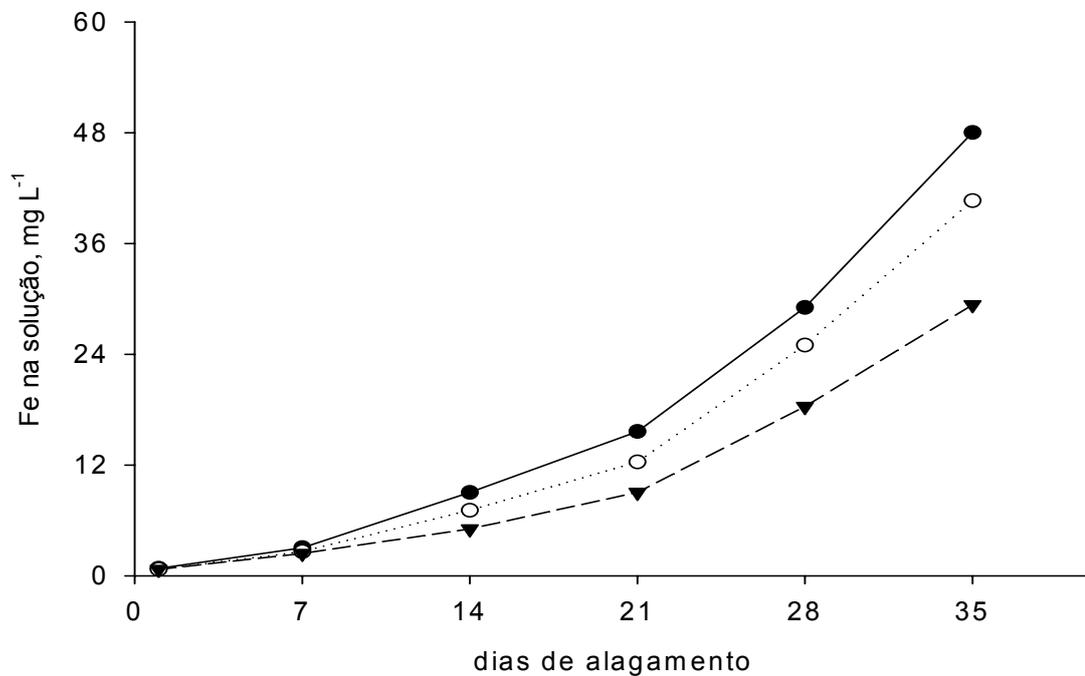


Figura 32. Concentração de ferro na solução do Vertisol em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

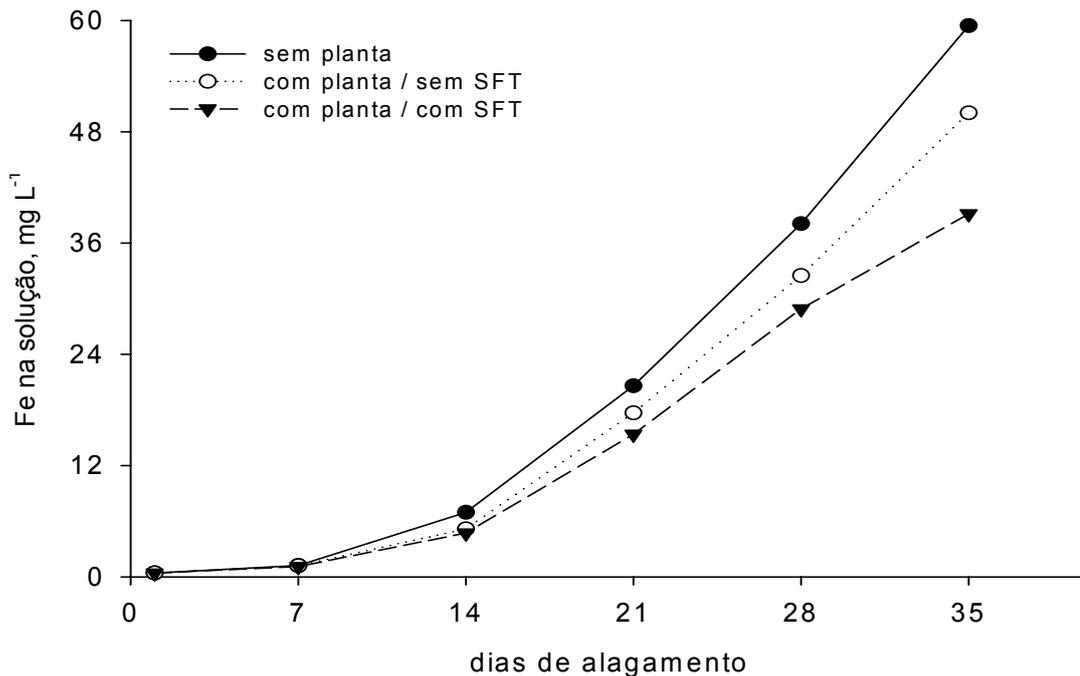


Figura 33. Concentração de ferro na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

6.5.4. Cálcio na solução

As concentrações de cálcio na solução da classe Planossolo e Luvisolo aumentaram até atingir um valor máximo aos 21 e 28 dias de alagamento, respectivamente (Figuras 34 a 36). Posteriormente, estes valores se mantiveram aproximadamente constantes até o final de período de alagamento. Resultados semelhantes foram obtidos em um Planossolo SGe 3 por Sousa (2001) e Gonçalves (2003).

Os solos Vertissolo e Chernossolo, apresentaram aumento constante nas concentrações de cálcio na solução durante o período de alagamento (Figuras 37 e 38), demonstrando que 35 dias não foram suficientes para a estabilização das concentrações de cálcio. Resultados semelhantes foram obtidos em um Plintossolo por Sousa (2001) e em um Cambissolo por Gonçalves (2003). Segundo Ponnampertuma (1972), a cinética de solubilização de ferro e de cálcio para a solução estão muito relacionadas, sendo que o ferro solubilizado desloca o cálcio e outros cátions dos sítios de troca para a solução do solo.

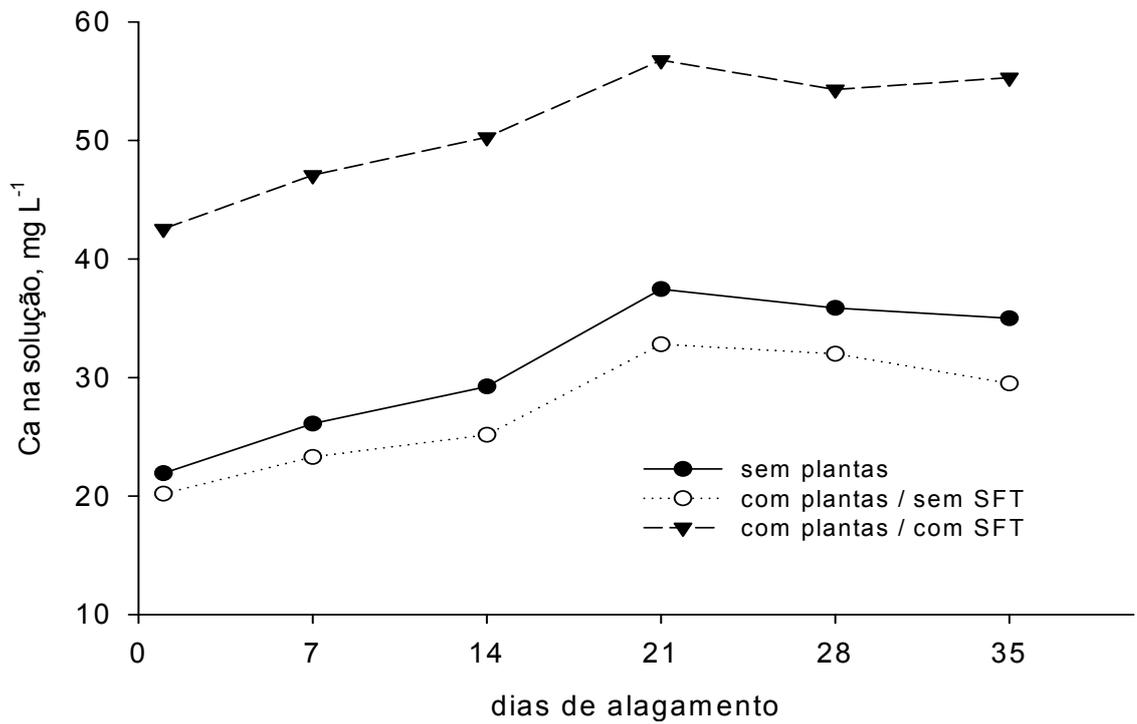


Figura 34. Concentração de cálcio na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

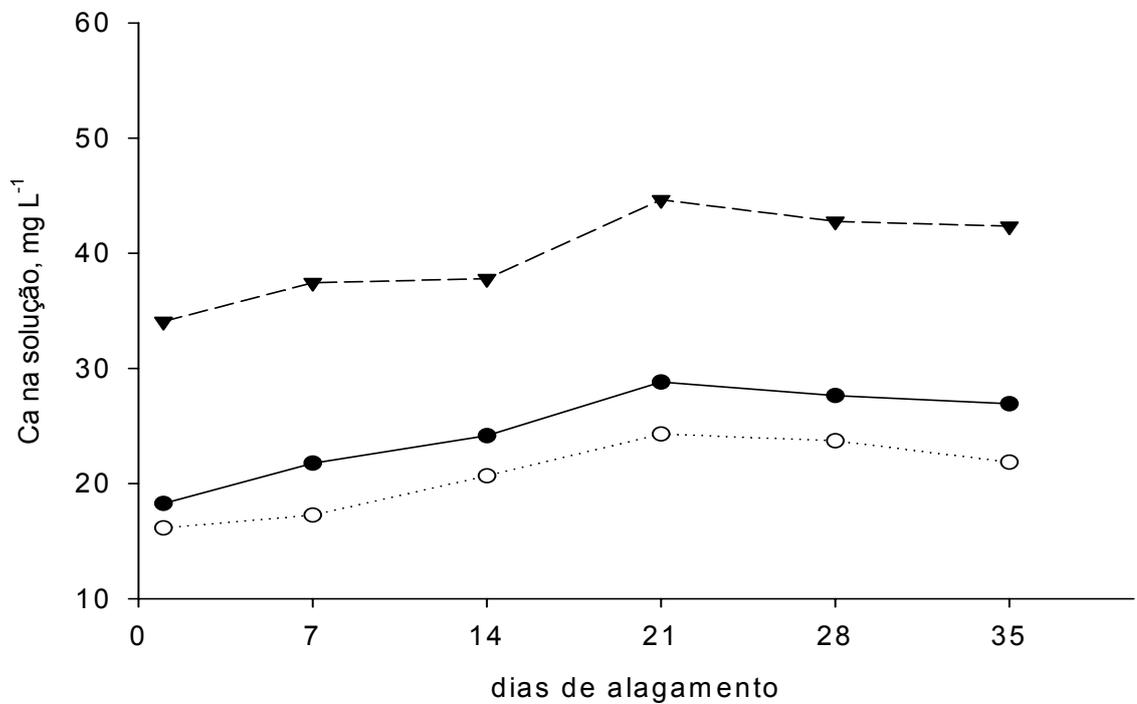


Figura 35. Concentração de cálcio na solução do Planossolo SGe 1 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

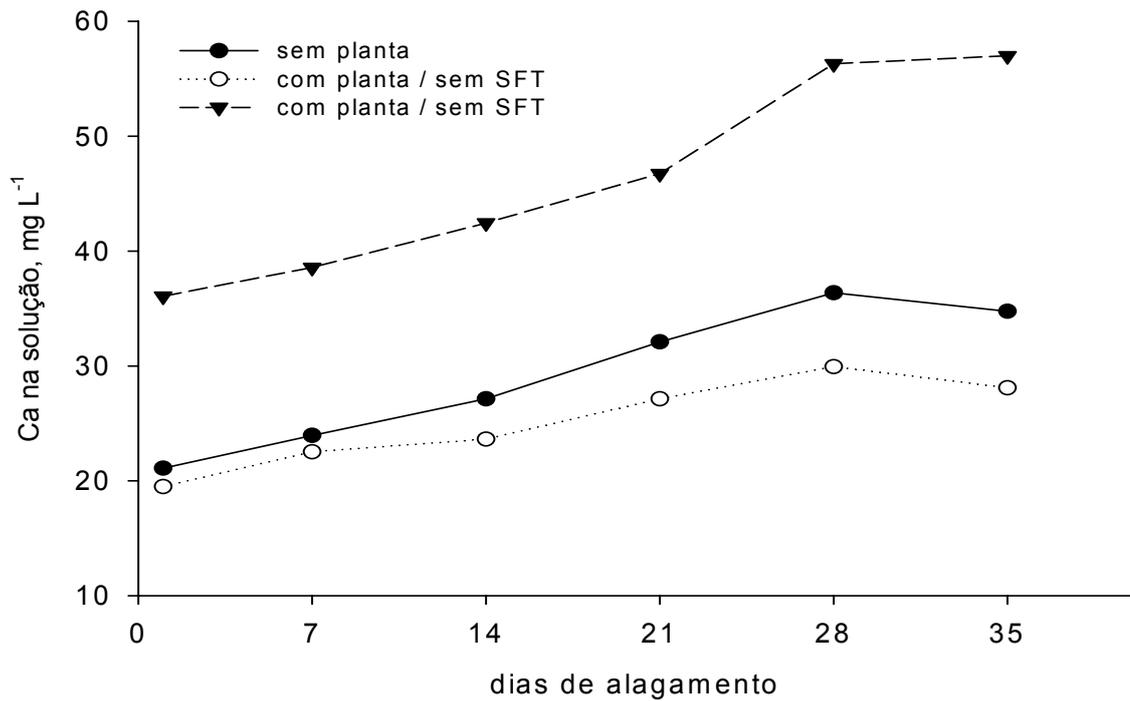


Figura 36. Concentração de cálcio na solução do Luvisso solo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

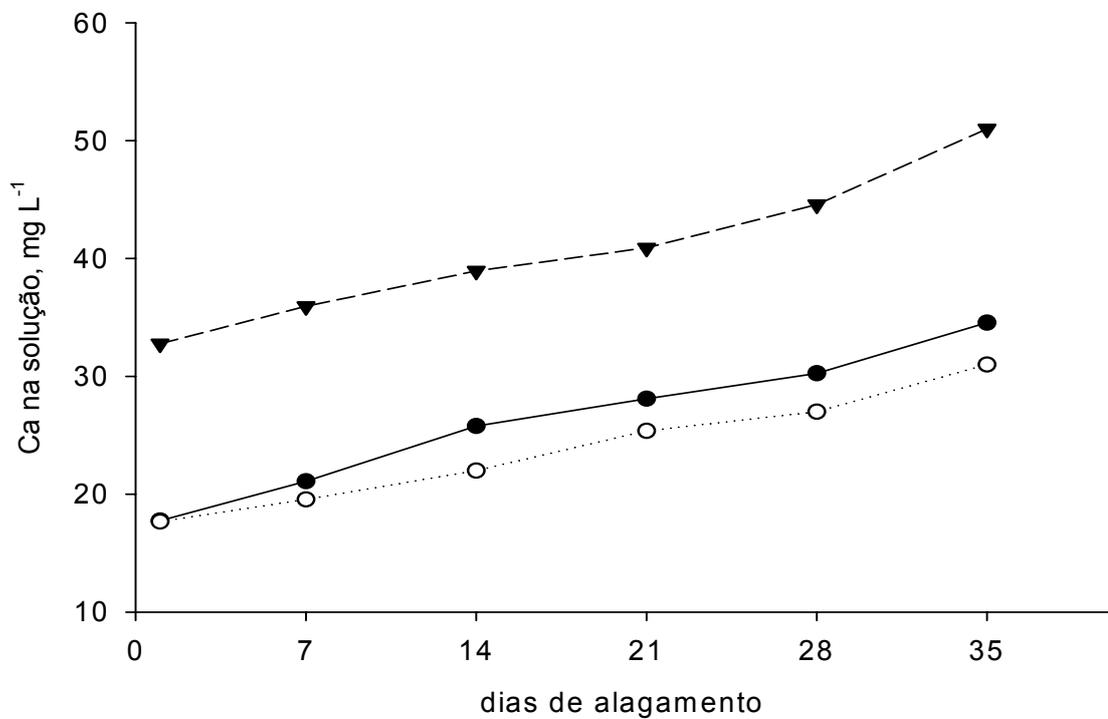


Figura 37. Concentração de cálcio na solução do Vertisso solo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

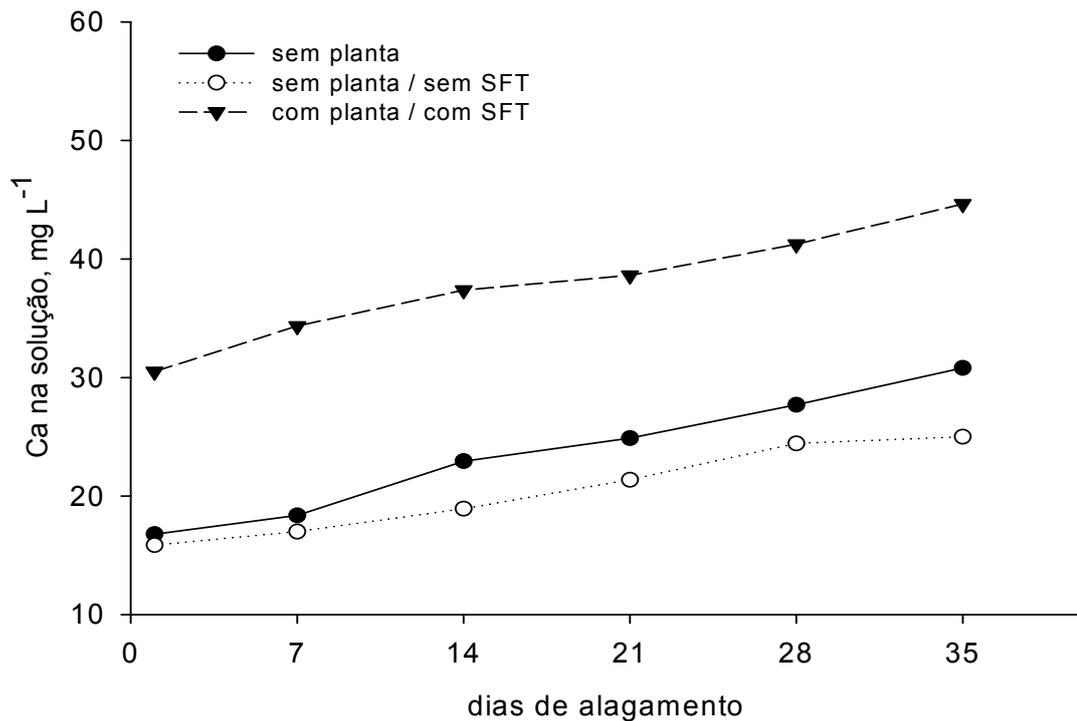


Figura 38. Concentração de cálcio na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

6.5.5. Fósforo na solução

Os solos da Classe Planossolo apresentaram maiores concentrações de fósforo na solução em relação aos solos oriundos de sedimento de basalto até os 21 dias de alagamento (Figura 39 e 43). Neste período, ocorreu a maior intensidade de redução dos óxidos férricos a ferrosos (Figuras 29 e 30), resultando no pico máximo de fósforo observado na solução dos Planossolos (Figuras 39 e 40). O solo Luvisolo apresentou as maiores concentrações deste elemento na solução aos 28 dias de alagamento (Figura 41), já que o pico máximo de liberação de ferro na solução deste solo ocorreu aos 28 dias de alagamento (Figura 31). Segundo Ponnampertuma (1972), a cinética de liberação de ferro e de fósforo para a solução estão relacionadas, e, normalmente, condições que favorecem a redução do ferro proporcionam também maior liberação de fósforo.

Os solos Vertissolo e Chernossolo apresentaram baixas concentrações de fósforo na solução, principalmente na primeira semana de

alagamento. Isso foi devido a um dos seguintes fatores: a) predominância das reações de redução do manganês (Figuras 27 e 28), proporcionando uma lenta redução do ferro (Figuras 32 e 33), com liberação do fósforo adsorvido; b) readsorção do fósforo dessorvido pela redução, já que estes solos apresentam maior CMAP em relação aos demais solos (Tabela 4). Durante o período de alagamento, não foi observada estabilização das concentrações de fósforo na solução destes solos (Figuras 42 e 43), já que as reações de redução do ferro não atingiram o equilíbrio durante o período de alagamento. Gonçalves (2003) observou que 88 dias de alagamento em um solo Cambissolo, oriundo de sedimento de basalto não foram suficientes para que houvesse a estabilização das concentrações de ferro na solução. A alta especificidade do fósforo com o ferro em todos os solos foi predita pela especiação de fósforo realizada aos 14 e 28 dias de alagamento, onde observou-se a predominância das espécies livres H_2PO_4 e HPO_4 e os pares iônicos FeHPO_4 e FeH_2PO_4 (Figuras 44 a 51).

Em todos os solos, a presença de plantas com a adição de SFT apresentou maiores concentrações de fósforo na solução em relação aos demais níveis fatoriais. Isso se deve, à solubilização do fósforo contido no adubo fosfatado.

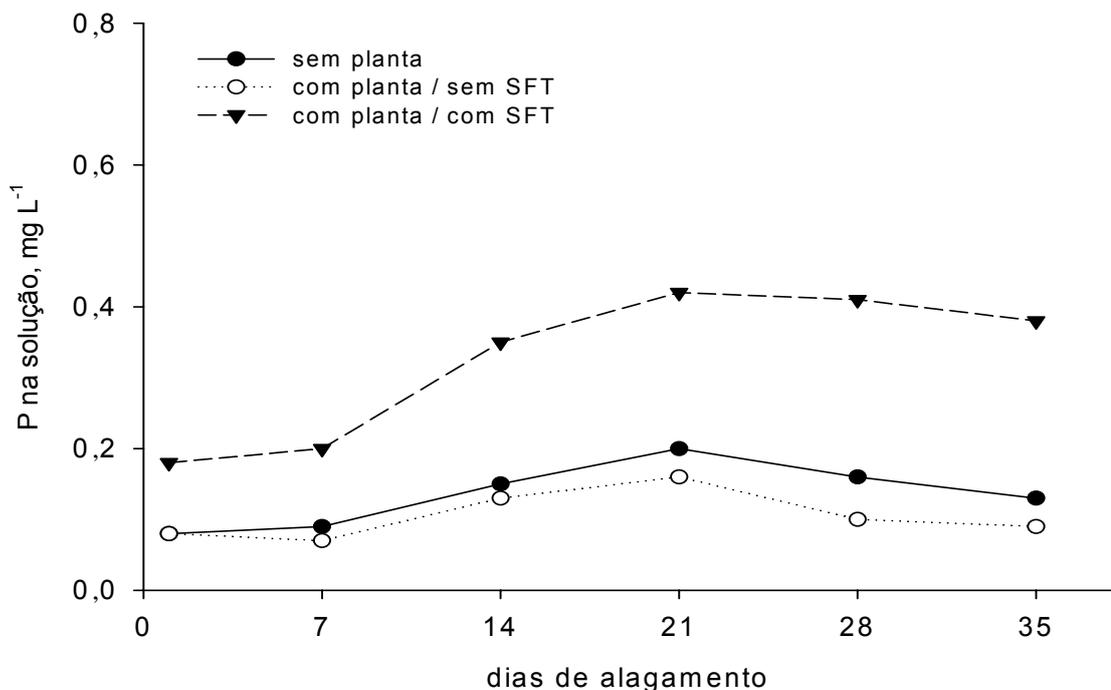


Figura 39. Concentração de fósforo na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

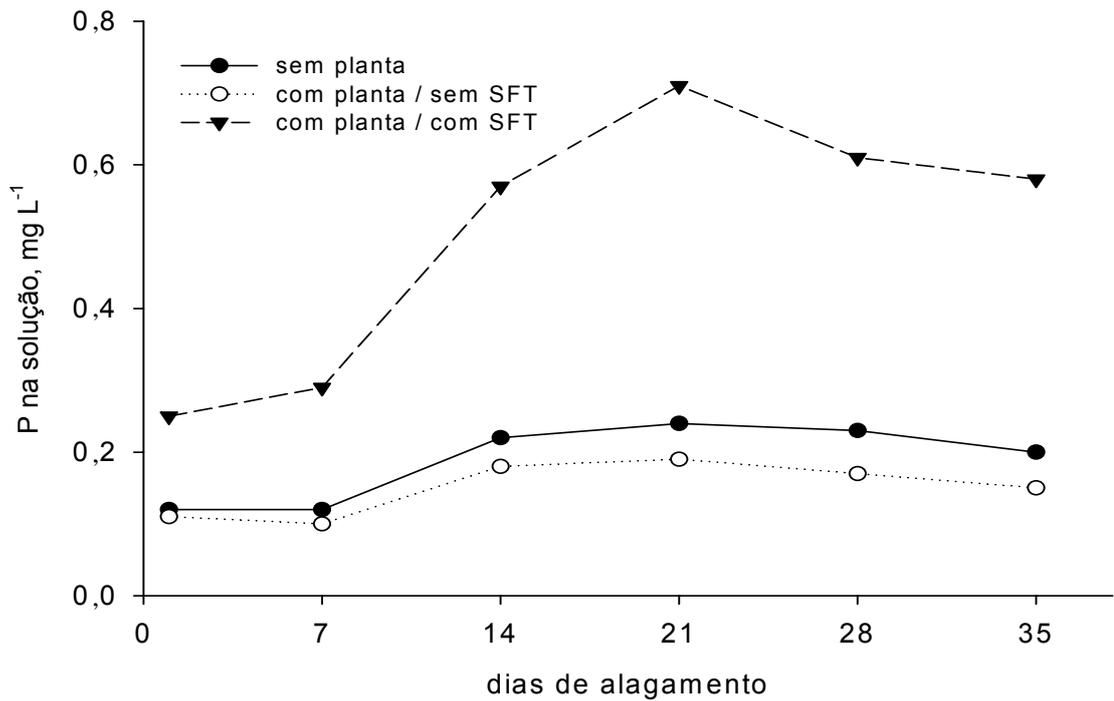


Figura 40. Concentração de fósforo na solução do Planossolo SGe 1 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

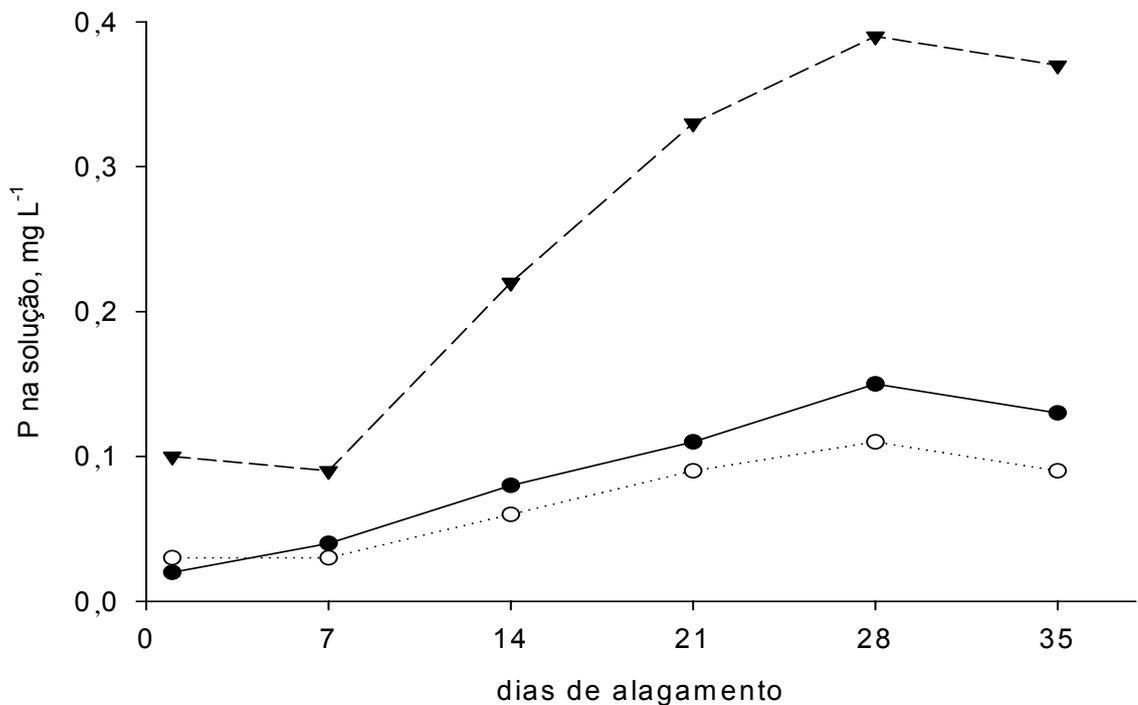


Figura 41. Concentração de fósforo na solução do Luvissole em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

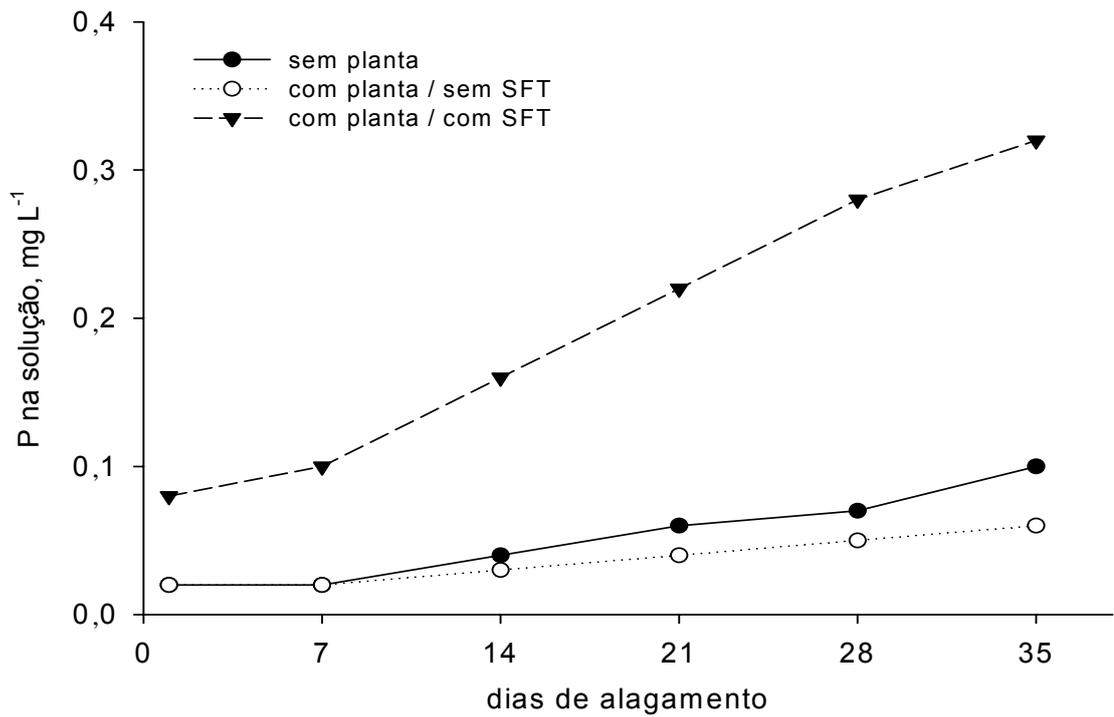


Figura 42. Concentração de fósforo na solução do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

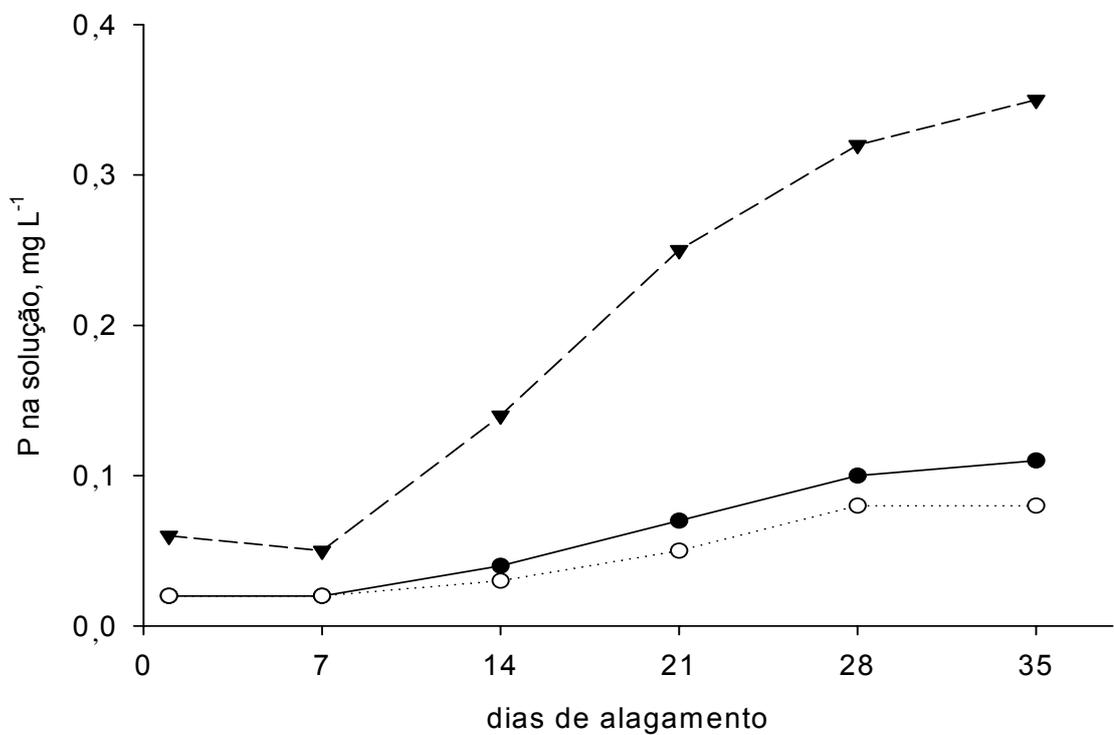
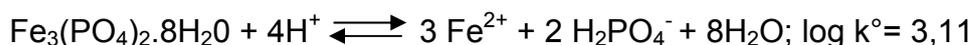


Figura 43. Concentração de fósforo na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

6.5.6. Especificação de fósforo na solução

A especificação de fósforo realizada aos 14 dias de alagamento, indicou a predominância da espécie H_2PO_4 em todos os tratamentos (Figuras 44 a 47). Isso se deve aos valores de pH atingidos neste período em todos os tratamentos (Apêndice 20), os quais favoreceram a presença da espécie H_2PO_4 em relação a espécie HPO_4 . A espécie H_2PO_4 ocorre predominantemente na faixa de pH 4 a 7,2, sendo que a espécie HPO_4 começa a aparecer com o pH próximo à 6,0 (Lindsay, 1979).

Além das espécies livres, observou-se a formação das espécies Fe_2HPO_4 e FeHPO_4 em todos os tratamentos. Esses pares iônicos formados são atribuídos à redução dos óxidos férricos a ferrosos, de maior solubilidade e afinidade com o fósforo na solução. Além disso, no solo Planossolo sem a presença de plantas ocorreu a predição de formação do mineral vivianita que apresenta a seguinte reação de equilíbrio:



Em todos os tratamentos, a menor intensidade de formação das espécies CaH_2PO_4 e CaHPO_4 em relação às espécies FeH_2PO_4 e FeHPO_4 podem ser atribuídas em parte à formação dos pares iônicos CaSO_4 e CaCO_3 (Apêndices 64 a 67) e também pela maior concentração relativa do ferro em relação aos demais cátions, observadas pela fração molar de ferro, principalmente nos solos Planossolos e Luvisolos (Tabela 9). Segundo Wolt (1994), a tendência de formação de complexos de esfera externa, intermediário ou interna, se deve à atuação do ortofosfato como base dura de Lewis, (doador de elétrons), e/ou à atuação dos metais como ácidos duros (Ca^{2+} , Mg^{2+}), intermediários (Fe^{2+}) ou moles de Lewis (Cu, Pb), já que apresentam orbitais vagos para a recepção de elétrons.

As maiores concentrações de sulfato (Apêndice 62) em relação ao fósforo na solução em todos os tratamentos, proporcionaram a formação dos pares iônicos FeSO_4 , CaSO_4 , MgSO_4 e MnSO_4 , as quais provavelmente diminuíram a formação dos pares iônicos FeH_2PO_4 , FeHPO_4 , CaH_2PO_4 e CaHPO_4 , MgHPO_4 e MnHPO_4 (Apêndices 64 a 67). Em condições de semelhantes concentrações de sulfato e fósforo na solução, espera-se que o fósforo tenha preferência pela formação de pares iônicos, devido à sua maior

afinidade com os cátions, originada pela maior carga efetiva negativa, em relação ao sulfato (McBride, 1994).

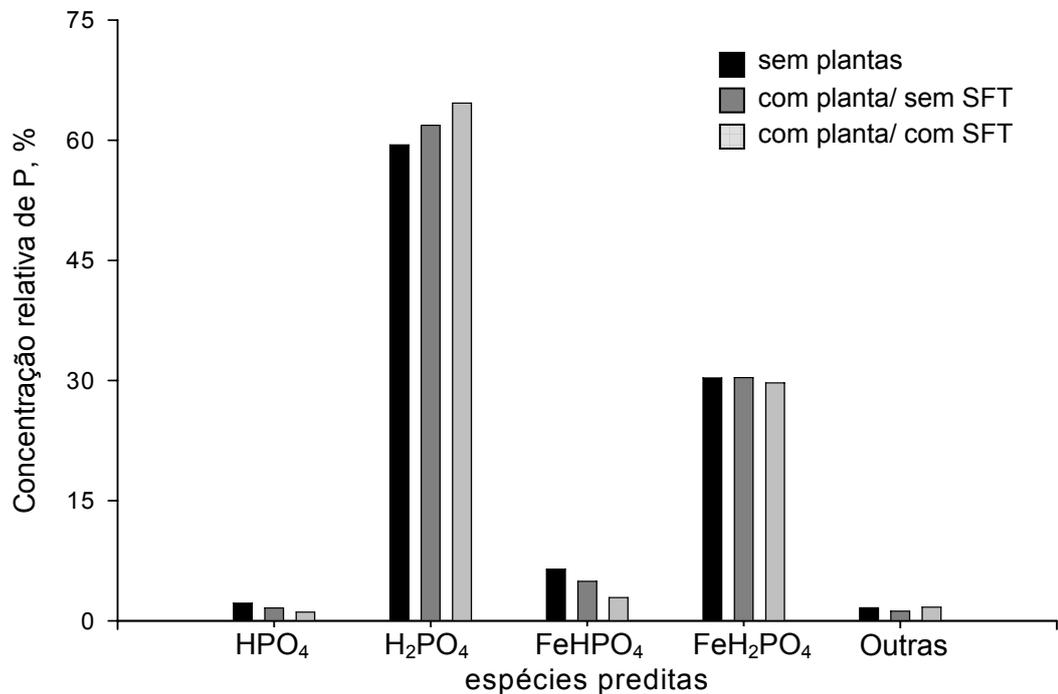


Figura 44. Concentração relativa das espécies previstas de fósforo na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 14 dias de alagamento.

Tabela 9. Fração molar de ferro na solução do solo aos 14 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	Sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
----- % -----			
Planossolo – SGe 3	61,9	64,7	52,6
Luvissolo	46,8	44,8	33,9
Vertissolo	14,7	13,6	7,7
Chernossolo	12,2	11,3	7,8

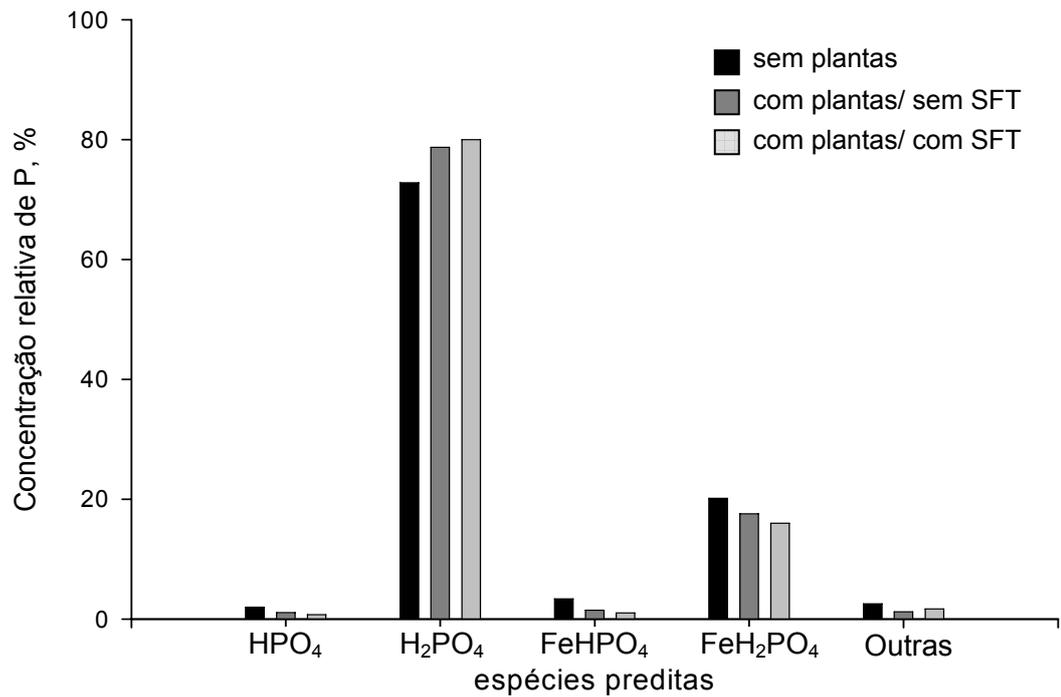


Figura 45. Concentração relativa das espécies previstas de fósforo na solução do Luvissoilo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 14 dias de alagamento.

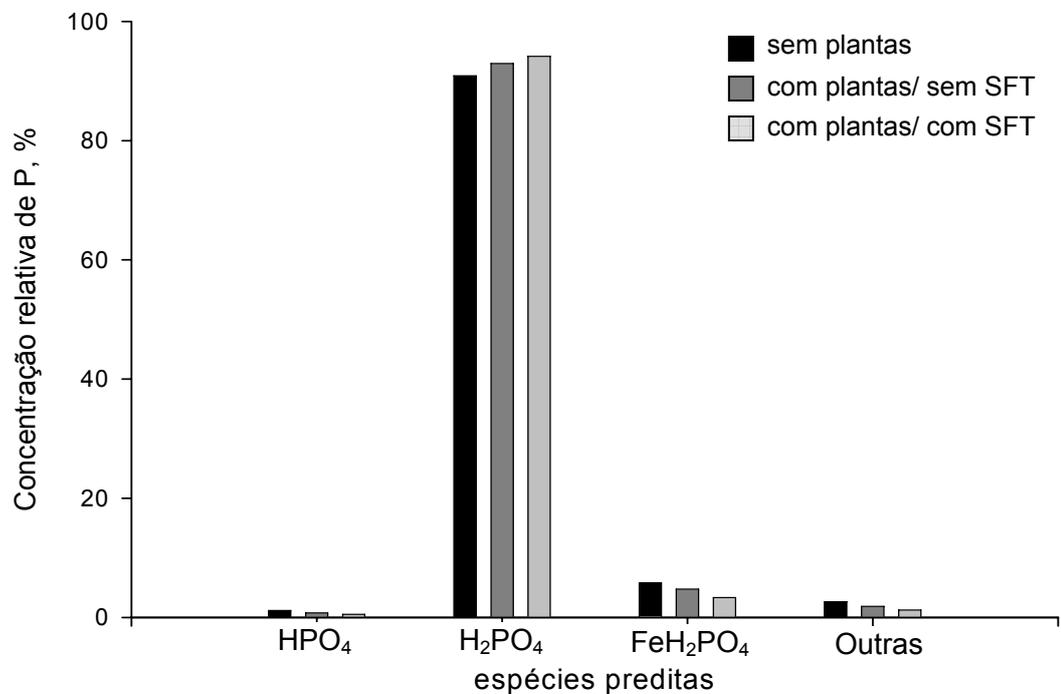


Figura 46. Concentração relativa das espécies previstas de fósforo na solução do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 14 dias de alagamento.

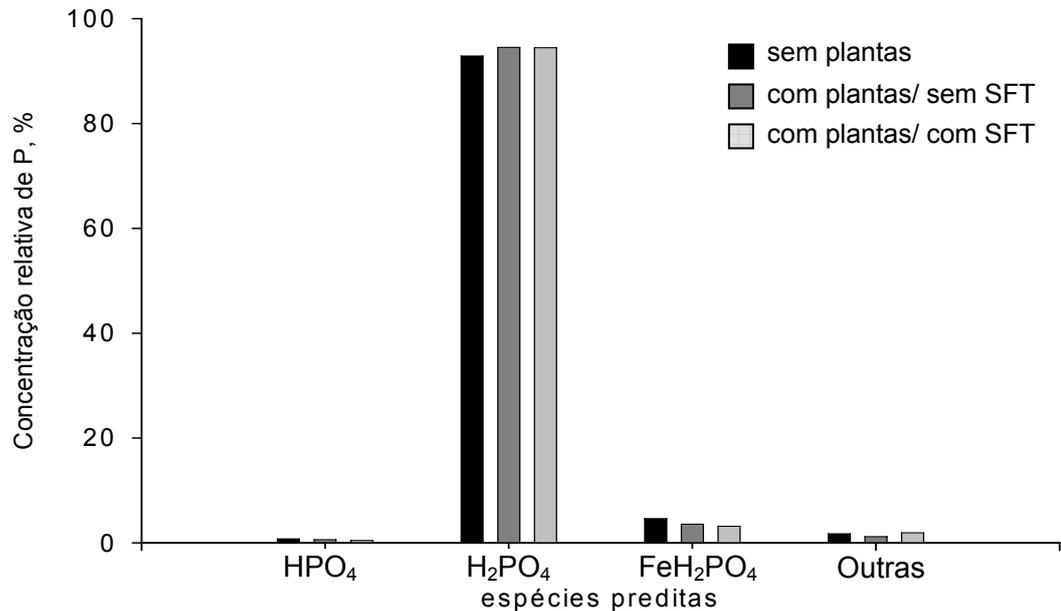


Figura 47. Concentração relativa das espécies preditas de fósforo na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 14 dias de alagamento

A especiação de fósforo realizada aos 28 dias de alagamento indicou a predominância das espécies H_2PO_4 e FeH_2PO_4 em todos os tratamentos (Figuras 48 a 51). Entretanto, quando comparados aos 14 dias de alagamento (Figuras 44 a 47), observou-se diminuição das mesmas e o aumento das espécies HPO_4 e FeHPO_4 . Isso se deve aos valores de pH atingidos aos 28 dias de alagamento (Apêndice 22), favorecendo a formação dessas espécies. Nos solos Planossolo e Luvisolo, foram também preditas a formação do mineral vivianita.

Em todos os tratamentos, observou-se maior formação dos pares iônicos CaHPO_4 , MgHPO_4 e MnHPO_4 (Apêndices 68 a 71) quando comparados aos 14 dias de alagamento (Apêndices 64 a 67). Isso se deve aos valores de pH atingidos (Apêndice 22) e também pela maior redução dos solos observadas nesse período em relação aos 14 dias de alagamento (Apêndice 17), favorecendo o deslocamento de cálcio e magnésio dos sítios de troca pelo ferro para a solução do solo. Isso pode ser corroborado pela alta concentração relativa de ferro observada neste período em todos os tratamentos utilizados (Tabela 10).

Em função da maior concentração absoluta de cátions na solução e consequentemente maior formação de pares iônicos observadas em todos os tratamentos, é de se esperar que a difusão de formas livres de fósforo na solução até as raízes, para a absorção pelas plantas, tenha diminuído quando comparadas aos 14 dias de alagamento.

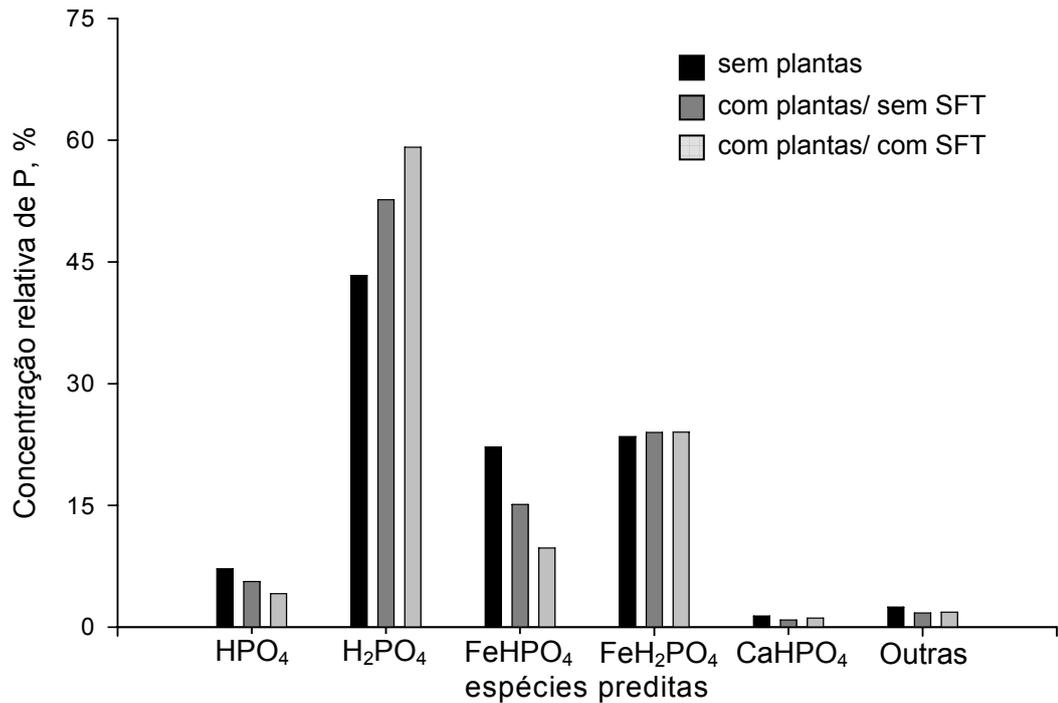


Figura 48. Concentração relativa das espécies preditas de fósforo na solução do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 28 dias de alagamento.

Tabela 10. Fração molar de ferro na solução do solo aos 28 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	Combinações fatoriais		
	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
----- % -----			
Planossolo – SGe 3	59,4	58,6	47,5
Luvissolo	59,0	59,1	45,5
Vertissolo	30,7	29,6	19,6
Chernossolo	38,4	37,1	29,3

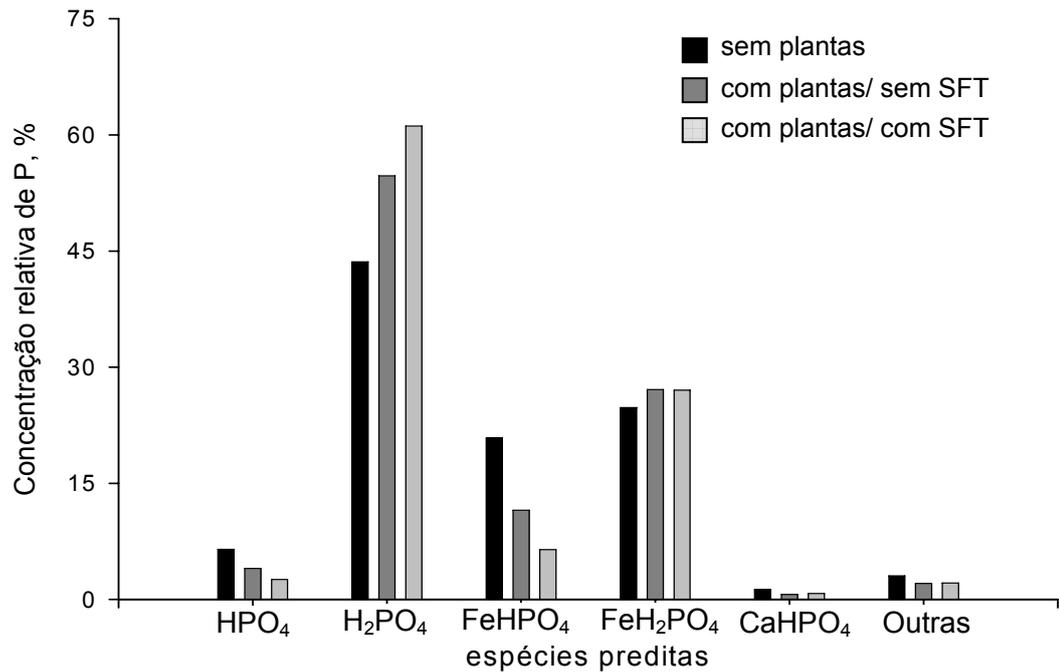


Figura 49. Concentração relativa das espécies previstas de fósforo na solução do Luvissole em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 28 dias de alagamento.

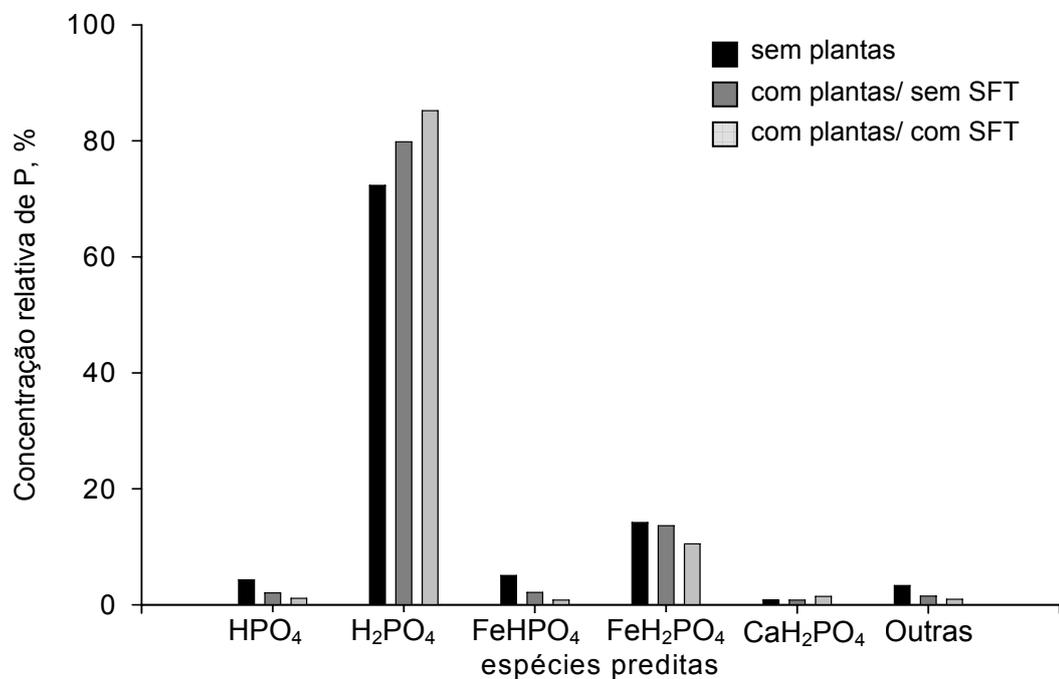


Figura 50. Concentração relativa das espécies previstas de fósforo na solução do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT aos 28 dias de alagamento.

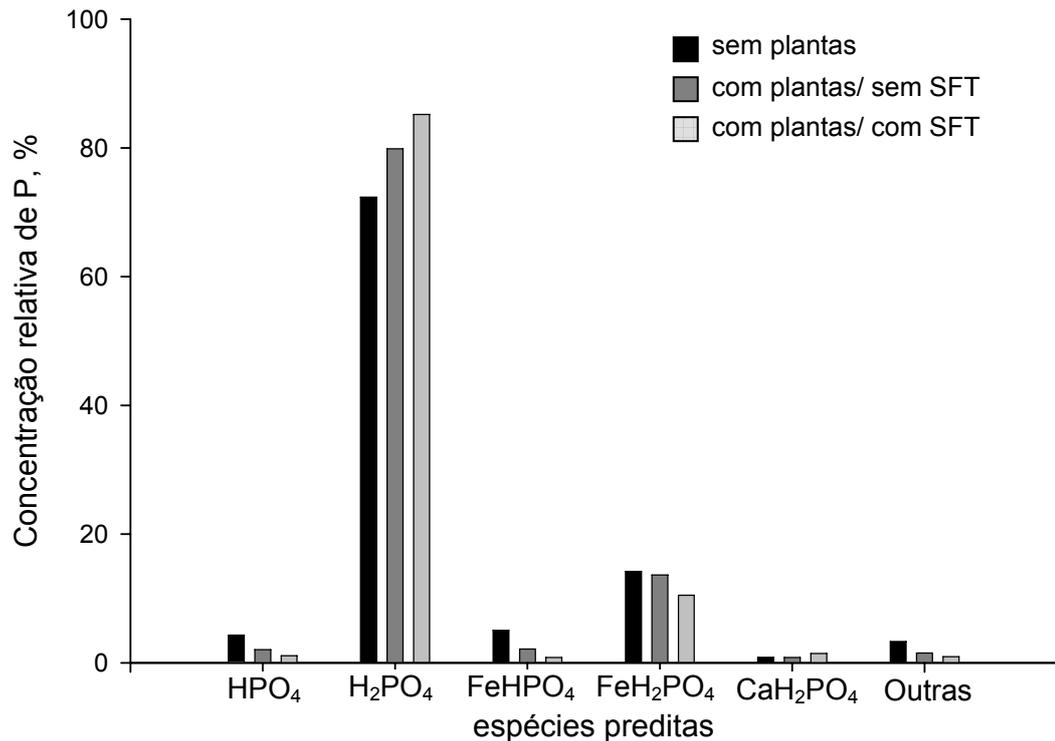


Figura 51. Concentração relativa das espécies preditas de fósforo na solução do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: sem plantas; com plantas sem a adição de SFT; c) com plantas com a adição de SFT aos 28 dias de alagamento.

6.5.7. Parâmetros de plantas

6.5.7.1. Concentração de fósforo na parte aérea

A concentração de fósforo na parte aérea, não apresentou interação significativa dos fatores estudados. Isso indica que os dois fatores estudados atuam independentemente sobre esta variável resposta. Desta forma, o efeito principal dos solos foi significativo (Tabela 11). O Planossolo SGe 1 apresentou maior concentração de fósforo na parte aérea em relação aos demais solos. Isso se deve provavelmente à maior absorção de fósforo obtida no solo Planossolo SGe1 em relação aos demais solos, já que foram observadas maiores concentrações de fósforo na solução do Planossolo SGe 1 em relação aos demais solos, na maior parte do período de alagamento (Figuras 39 a 43; Apêndices 42 a 47). Hossner et al. (1973), observaram que o aumento na

concentração de fósforo na solução proporcionaram aumento na concentração de fósforo na parte aérea e também na produção de matéria seca.

Nos solos com baixo teor de fósforo disponível obtido pelo Mehlich-1, o solo Planossolo SGe 3 apresentou maior concentração de fósforo na parte aérea em relação aos demais solos. Isso se deve aos mesmos fatores mencionados anteriormente.

O efeito principal adubação fosfatada (Tabela 11) demonstrou que a presença de plantas com a adição de SFT apresentou maior concentração de fósforo na parte aérea em relação a presença de plantas sem a adição de SFT. Isso se deve, provavelmente, à maior absorção de fósforo obtida na presença de plantas com a adição de SFT, já que o mesmo apresentou maior concentração de fósforo na solução em relação a presença de plantas sem a adição de SFT, em todos os períodos de alagamento (Figuras 39 a 43).

Fageria (1984) classificou as plantas de arroz conforme a concentração de fósforo na parte aérea nas seguintes classes: a) Deficiente: < 0,15%; b) Crítico: 0,16-0,24; c) Adequado: 0,25-0,48%. De acordo com essa classificação, as plantas localizadas nos solos oriundos de sedimento de granito e arenito (classe Planossolo), que não receberam a adição de SFT, se enquadraram na classe adequada, enquanto que as plantas localizadas nos solos oriundos de sedimento de basalto se enquadraram na classe deficiente (Vertissolo e Chernossolo) e crítico (Luvisolo). Algumas plantas presentes nestes solos apresentaram sintomas de deficiência de fósforo identificados visualmente pelo menor número de perfilhos e também pela coloração bronze nas margens das folhas velhas e posteriormente para as folhas mais novas, as quais apresentaram tonalidade mais verde e aspecto atrofiado, conforme sintomatologia observada por Fageria (1984).

A utilização do SFT fez com que o solo Vertissolo e o Chernossolo se enquadrassem na classe adequada. Isso demonstra a importância da utilização da adubação fosfatada, na cultura de arroz irrigado, em solos com baixo teor de fósforo disponível.

Tabela 11. Concentração de fósforo na parte aérea das plantas de arroz em função dos tratamentos utilizados

Solos	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT	Médias
	----- % -----		
Planossolo SGe 3	0,25	0,33	0,29 B
Planossolo SGe 1	0,38	0,44	0,41 A
Luvissolo	0,18	0,28	0,23 C
Vertissolo	0,12	0,25	0,19 D
Chernossolo	0,12	0,25	0,19 D
Médias	0,21 b	0,31 a	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si (Duncan, 5%).

6.5.7.2. Produção de matéria seca na parte aérea

A produção de matéria seca apresentou interação significativa dos fatores estudados. Na presença de plantas sem a adição de SFT, o solo Planossolo SGe 1 apresentou maior produção de matéria seca em relação aos demais (Tabela 12). Isso se deve, provavelmente, à maior absorção de fósforo obtida no solo Planossolo SGe 1 (Tabela 14), já que o mesmo apresentou maior concentração de fósforo na solução em relação aos demais solos, na maior parte do período de alagamento. Segundo Fageria (1984), a adubação fosfatada aumenta a produção de matéria seca devido ao aumento do número de perfilhos e do índice de área foliar.

Em relação aos solos com baixo teor de fósforo disponível, o solo Planossolo SGe 3 não diferiu do Luvissolo e apresentou maior produção de matéria seca em relação aos solos Vertissolo e Chernossolo. Isso se deve, provavelmente, à maior absorção de fósforo obtida no solo Planossolo SGe 3 em relação aos demais (Tabela 14), pois foram observadas maiores concentrações de fósforo na solução do Planossolo SGe 3 em relação ao Luvissolo até os 21 dias de alagamento, e também, em relação ao Vertissolo e Chernossolo até os 28 dias de alagamento.

O Vertissolo e o Chernossolo não diferiram entre si, pois apresentaram, provavelmente, absorção semelhante de fósforo (Tabela 14), já

que a concentração de fósforo na solução não diferiu entre ambos, em todos os períodos de alagamento.

Na presença de plantas com a adição de SFT (Tabela 12), o solo Planossolo SGe 3 não diferiu do Planossolo SGe 1. Este apresentou, provavelmente, maior absorção de fósforo, já que obteve maior concentração de fósforo na solução em relação ao Planossolo SGe 3, na maior parte do período de alagamento. Entretanto, a maior absorção de fósforo obtida no solo Planossolo SGe 1, não resultou em maior conversão em biomassa aérea. Uma das explicações para que isso tivesse ocorrido, está na possibilidade de que parte do fósforo absorvido no Planossolo SGe 1 tenha sido armazenado em órgãos de reserva, para ser utilizado quando houver uma escassez do mesmo para a manutenção do crescimento da planta. Este mecanismo é denominado de fator de capacidade interno da planta, onde a maior ou menor poder de estocar o fósforo na planta, é dependente das características do solo e da própria planta (Epstein & Bloon, 2006).

Os solos da classe Planossolo apresentaram maior produção de matéria seca em relação aos demais. Isso se deve, provavelmente, à maior absorção de fósforo obtida nos solos Planossolos, pois apresentaram maior concentração de fósforo na solução em relação aos solos oriundos de sedimento de basalto, na maior parte do período de alagamento. Entretanto, o solo Vertissolo e o Chernossolo apresentaram maior resposta à adubação fosfatada, já que obtiveram menor rendimento relativo em relação aos demais (Tabela 13).

Em todos os solos, a presença de plantas com a adição de SFT apresentou maior produção de matéria seca em relação a presença de plantas sem a adição de SFT (Tabela 12). Isso se deve, provavelmente, à maior absorção de fósforo obtida na presença de plantas com a adição de SFT (Tabela 14), pois o mesmo apresentou maior concentração de fósforo na solução em relação a presença de plantas sem a adição de SFT, em todos os períodos de alagamento (Figuras 39 a 43).

Tabela 12. Produção de matéria seca de plantas de arroz em função dos tratamentos utilizados

Solos	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
	-----g planta ⁻¹ -----	
Planossolo SGe 3	1,97 bB	4,11 aA
Planossolo SGe 1	2,53 bA	4,20 aA
Luvissolo	1,67 bB	3,82 aB
Vertissolo	1,26 bC	3,00 aD
Chernossolo	1,30 bC	3,32 aC

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si (Duncan, 5%).

Tabela 13. Rendimento relativo

Solos	Rendimento relativo (%) ¹
Planossolo SGe 1	60
Planossolo SGe 3	48
Luvissolo	43
Vertissolo	42
Chernossolo	40

¹ Rendimento relativo: produção de matéria seca do tratamento com plantas sem adição de SFT / produção de matéria seca do tratamento com plantas e com adição de SFT x 100.

6.5.7.3. Fósforo acumulado na parte aérea

O fósforo acumulado pelas plantas apresentou interação significativa dos fatores estudados (Tabela 14). Na presença de plantas sem a adição de SFT, o solo Planossolo SGe 1 apresentou maior quantidade de fósforo acumulado em relação aos demais. Isso se deve à maior concentração de fósforo na parte aérea, produção de matéria seca e do fósforo na solução obtidas no Planossolo SGe 1 em relação aos demais. Segundo Fageria & Stone (2003), as plantas de arroz absorvem 50% de fósforo necessário no estágio inicial de crescimento, quando atinge somente 20% do crescimento total (Fageria, 1984). Devido à maior exigência do fósforo na fase inicial de crescimento e a baixa mobilidade no solo, recomenda-se a aplicação integral deste elemento na semeadura (Scivittaro, 2006). Em relação aos solos com baixo teor de fósforo disponível, o Planossolo SGe 3 apresentou maior

quantidade de fósforo acumulado em relação aos solos Vertissolo e Chernossolo. Isso se deve à maior concentração de fósforo na parte aérea e produção de matéria seca obtidas no solo Planossolo SGe 3 em relação aos solos Vertissolo e Chernossolo.

Na presença de plantas com a adição de SFT, o solo Planossolo SGe 1 apresentou maior quantidade de fósforo acumulado em relação aos demais. Isso se deve à maior concentração de fósforo na parte aérea obtida no solo Planossolo SGe 1 do que nos demais e também pela maior produção de matéria seca em relação aos solos Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo. Em relação aos solos com baixo teor de fósforo disponível, o solo Planossolo SGe 3 apresentou maior quantidade de fósforo acumulado em relação aos demais. Isso se deve à maior concentração de fósforo na parte aérea e produção de matéria seca obtidas no Planossolo SGe 3 em relação aos solos oriundos de sedimento de basalto. O Solo Luvisolo apresentou maior quantidade de fósforo acumulado em relação aos solos Vertissolo e Chernossolo. Isso se deve à maior concentração de fósforo na parte aérea e produção de matéria seca obtidas no Luvisolo em relação aos solos Vertissolo e Chernossolo.

Em todos os solos, a presença de plantas com a adição de SFT apresentou maior quantidade de fósforo acumulado em relação a presença de plantas sem a adição de SFT. Isso se deve à maior concentração de fósforo na parte aérea e produção de matéria seca obtida na presença de plantas com a adição de SFT.

Tabela 14. Valores de fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz em função dos tratamentos utilizados

Solos	com plantas/ sem SFT	com plantas/ com SFT
	-----mg planta ⁻¹ -----	
Planossolo SGe 3	4,92 bB	13,52 aB
Planossolo SGe 1	9,50 bA	18,92 aA
Luvisolo	3,02 bC	10,69 aC
Vertissolo	1,51 bCD	7,47 aD
Chernossolo	1,59 bC	8,38 aD

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si (Duncan, 5%).

6.6. Conclusões

Conclusão 1: Os solos oriundos de sedimentos de granito e de arenito (Planossolo SGe 3 e Planossolo SGe 1) apresentaram redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos e liberação de fósforo na solução mais rápida do que os solos oriundos de sedimento de basalto (Luvissolo, Vertissolo e Chernossolo)

Conclusão 2: A menor adsorção de fósforo e a liberação mais rápida para a solução nos Planossolos proporcionaram maior concentração de fósforo na parte aérea, produção de matéria seca e fósforo acumulado do que os solos Vertissolo e Chernossolo, sem ou com a adição de superfosfato triplo.

Conclusão 3: Os solos oriundos de sedimento de basalto apresentaram maior resposta à adubação fosfatada.

Conclusão 4: A adição de superfosfato triplo resultou em maior concentração de fósforo na solução e no tecido, produção de matéria seca e fósforo acumulado em todos os solos.

7. CAPÍTULO V - Estudo 4: Formas de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul

7.1. Introdução

A calibração de fósforo extraído pelo Método Mehlich-1, utilizado para a obtenção da recomendação da adubação fosfatada na cultura de arroz irrigado no Rio Grande do Sul e Santa Catarina foi realizada em solos da Classe Planossolo. Entretanto, a eficiência do mesmo para esta cultura tem sido questionada, já que as frações de fósforo extraídas podem não ser as mesmas absorvidas pelas plantas. Alguns trabalhos desenvolvidos por Saleque et al. (2004) e Pheav et al. (2005) na cultura de arroz irrigado demonstraram a absorção de formas de fósforo de vários graus de labilidade. No Brasil, as pesquisas que associam as frações de fósforo obtidas pelo fracionamento desse elemento e o fósforo extraído pela resina de troca aniônica (Resina) e o Mehlich-1 são escassas. Desta forma, a obtenção das frações de fósforo no solo e sua associação com os teores de fósforo acumulado pelo arroz, indicariam as frações que mais contribuem na disponibilidade de fósforo para a cultura de arroz irrigado, bem como auxiliaria na escolha de um extrator apropriado a essas frações, resultando numa melhor eficiência dos métodos de análise.

No Rio Grande do Sul, os solos utilizados na cultura de arroz irrigado são oriundos de diferentes materiais de origem, o que provavelmente proporcionam variações na distribuição das frações de fósforo. Desta maneira, o fósforo acumulado pelas plantas e o fósforo extraído pelos extratores podem ser diferenciados entre os solos.

Ranno (2004) realizou o fracionamento pelo Método de Chang & Jackson (1957) em solos de várzea oriundos de diferentes materiais de origem submetidos a cultura de arroz irrigado, onde observou que os solos oriundos de

sedimento de basalto apresentaram maiores teores de ferro ligado ao fósforo, quando comparados aos solos oriundos de sedimento de arenito e granito. Segundo Machado et al. (1993), basalto é o material de origem dos solos do Rio Grande do Sul de maior riqueza de fósforo e também de minerais, como piroxênio e anfibólio, que possuem ferro na sua estrutura.

Pheav et al. (2005), estudando a ciclagem de nutrientes em solos cultivados com arroz irrigado, observou que o fósforo inorgânico extraído pelo NaOH 0,1 mol L⁻¹, considerado moderadamente lábil, foi uma das formas preferencialmente absorvidas pelas plantas de arroz.

Ranno (2004) observou que o fósforo ocluído, considerado não lábil, foi parcialmente ou totalmente dissolvidos pela redução do ferro. Esta fração determinada pelo fracionamento de Chang & Jackson (1957) corresponde a fração inorgânica de fósforo extraída pelo NaOH 0,5 mol L⁻¹ obtida pelo fracionamento de Hedley et al. (1982).

7.2. Hipóteses

Hipótese 1: Os solos oriundos de sedimento de basalto têm maior quantidade de fósforo extraído pelos extratores Pi NaOH 0,1 mol L⁻¹ e Pi NaOH 0,5 mol L⁻¹ quando comparados aos solos oriundos de sedimento de granito. Isso se deve aos maiores teores de óxidos de ferro cristalinos e de baixa cristalinidades presentes nos solos oriundos de sedimento de basalto em relação aos solos oriundos de sedimento de granito.

Hipótese 2: Os teores de fósforo acumulado apresentam associação com as frações de fósforo inorgânicas extraídas pelos extratores Resina, NaHCO₃, NaOH 0,1 mol L⁻¹ e NaOH 0,5 mol L⁻¹. As formas consideradas moderadamente lábil e não lábil (NaOH 0,1 e 0,5 mol L⁻¹) são dissolvidas durante a redução do ferro, sendo acessadas pelas plantas de arroz.

Hipótese 3: Os teores de fósforo extraídos pelos extratores Resina e Mehlich-1 apresentam associação com a fração de fósforo inorgânica lábil extraída pelo extrator NaHCO₃. Os extratores químicos utilizados para quantificar o fósforo disponível nos solos atuam sobre a forma lábil.

7.3. Objetivos

Objetivo 1: Quantificar as frações de fósforo em solos utilizados no cultivo de arroz irrigado, através do fracionamento de Hedley.

Objetivo 2: Relacionar as frações de fósforo obtidas no fracionamento com o fósforo acumulado pelas plantas de arroz.

Objetivo 3: Associar as frações de fósforo obtidas no fracionamento com o fósforo extraído pelos extratores Resina e Mehlich-1.

7.4. Material e métodos

Para atingir o objetivo proposto, foi utilizado o experimento descrito no Estudo 3. As amostras dos solos submetidas ao fracionamento foram obtidas anteriormente ao alagamento nos solos: Planossolo SGe 3, Luvissoilo, Vertissolo e Chernossolo submetidos a presença de plantas sem a adição de SFT e a presença de plantas com a adição de SFT.

7.4.1. Metodologia utilizada

O fracionamento de fósforo no solo foi realizado pela utilização do método de Hedley et al. (1982) modificado por Condrón et al. (1985), o qual se encontra descrito no Anexo 8. Esses autores consideram as frações de fósforo extraídas pela Resina e NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ formas lábeis, já que são formas mais biologicamente disponíveis, enquanto que as frações extraídas com NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ são consideradas moderadamente lábeis, já que representa o fósforo associado aos óxidos de ferro e alumínio com diferentes graus de cristalização. As frações de fósforo extraídas por NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, HCl 1 mol L^{-1} e o residual seriam consideradas não lábeis, já que representam o fósforo presente no interior dos agregados, fosfatos de cálcio estáveis e formas inorgânicas de fósforo insolúveis, respectivamente.

7.5. Resultados e Discussão

As frações de fósforo obtidas pelo fracionamento de Hedley em todos os solos, indicam que houve aumento das frações de fósforo inorgânicas lábeis e moderadamente lábeis (Resina, NaHCO_3 0,5, NaOH 0,1, NaOH 0,5) com adição de SFT (Figuras 52 a 55). Adições de fertilizantes fosfatados onde o solo é revolvido, expõe o fósforo adicionado aos sítios de adsorção, ocorrendo a retenção de fósforo nas frações inorgânicas. Resultados semelhantes foram observados por Tiessen et al. (1984), os quais observaram que, em solos pouco intemperizados, ocorreu aumento das frações Pi NaHCO_3 e Pi NaOH . Segundo Novais & Smith (1999), a adição de fertilizantes fosfatados, proporciona a distribuição e o acúmulo do fósforo nas frações inorgânicas lábeis. Com o tempo, ocorre o processo de envelhecimento do fósforo, pois o mesmo passa para formas de menor labilidade devido ao aumento da energia de adsorção do fósforo.

Em todos os solos, independentemente ou não da utilização de SFT, observou-se que a fração residual apresentou a maior quantidade de fósforo extraído (Figuras 52 a 55). Esta fração considerada não-lábil é representada por formas inorgânicas e orgânicas de alta recalcitrância, que não participam da disponibilidade de fósforo às plantas (Gatiboni et al., 2005). Isso foi confirmado neste trabalho, pois não houve significância da regressão linear ($R^2= 0,13$) desta fração com o fósforo acumulado pelas plantas.

Na ausência de SFT, foi observado que a fração residual e a fração orgânica extraída por NaOH 0,1 foram as maiores em todos os solos (Figuras 52 a 55). A fração NaOH é constituída, provavelmente, por fosfatos monoéster (hexafosfato de inositol, açúcares fosfatados, mononucleotídeos e fosfato colina), as quais representam a maior parte do fósforo orgânico nos solos do Rio Grande do Sul (Santos & Anghinoni, 2003). Estas formas são adsorvidas com alta energia por causa de sua elevada carga residual, tornando quimicamente e fisicamente protegida do ataque microbiano (Stewart & Tiesse, 1987; Condrón et al., 1990). Isso talvez explique a ausência da significância da regressão linear ($R^2= 0,08$) desta fração com o fósforo acumulado pelas plantas.

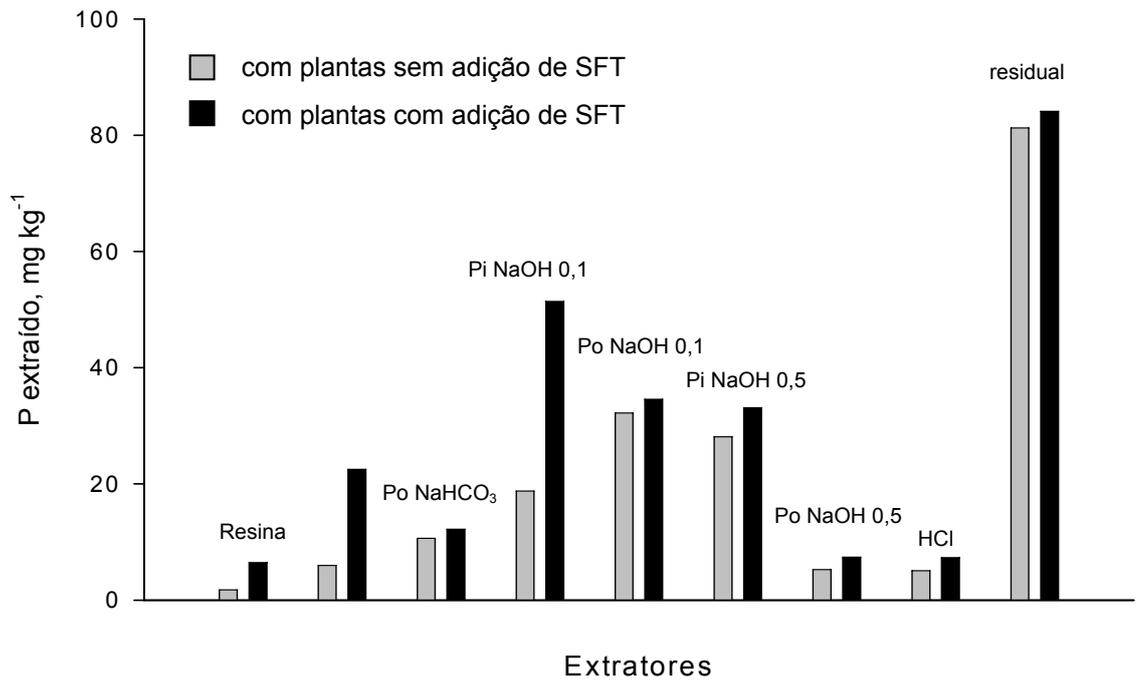


Figura 52. Frações de fósforo obtidas nas amostras do Planossolo SGe 3 em função dos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

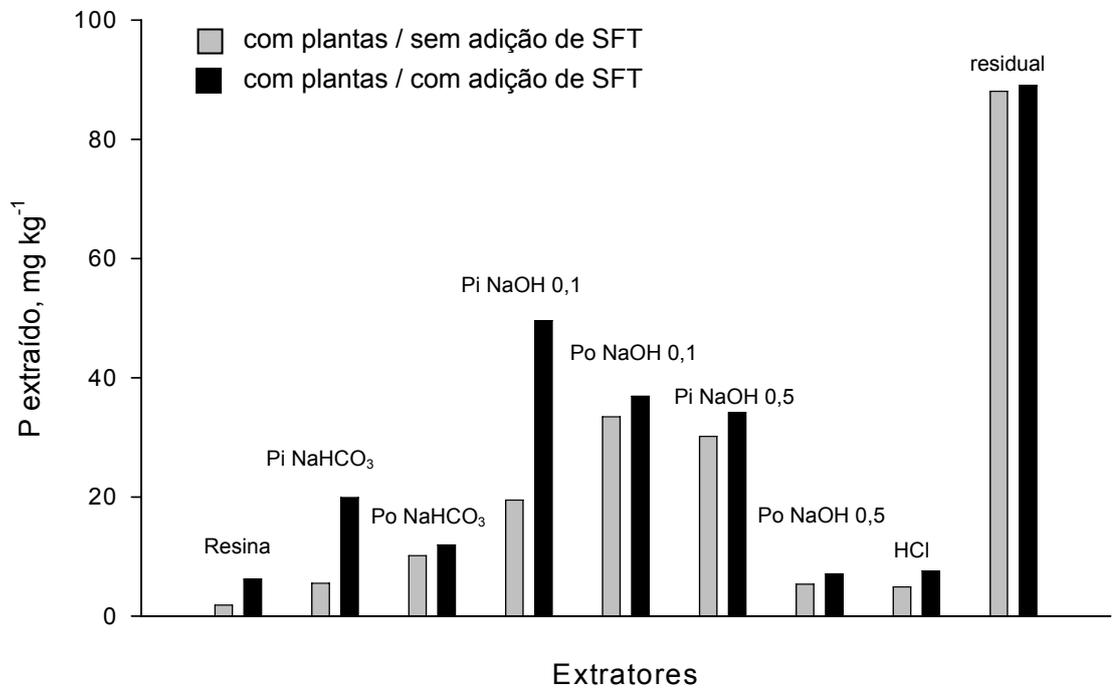


Figura 53. Frações de fósforo obtidas nas amostras do Luvisso em função dos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

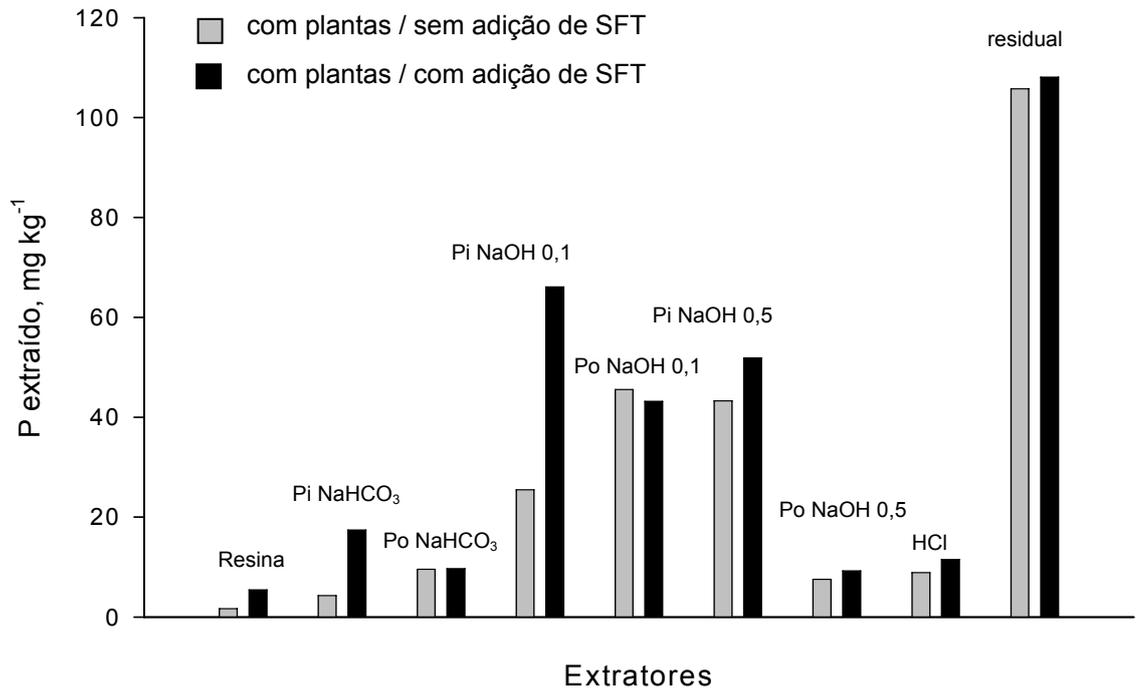


Figura 54. Frações de fósforo obtidas nas amostras do Vertissolo em função dos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

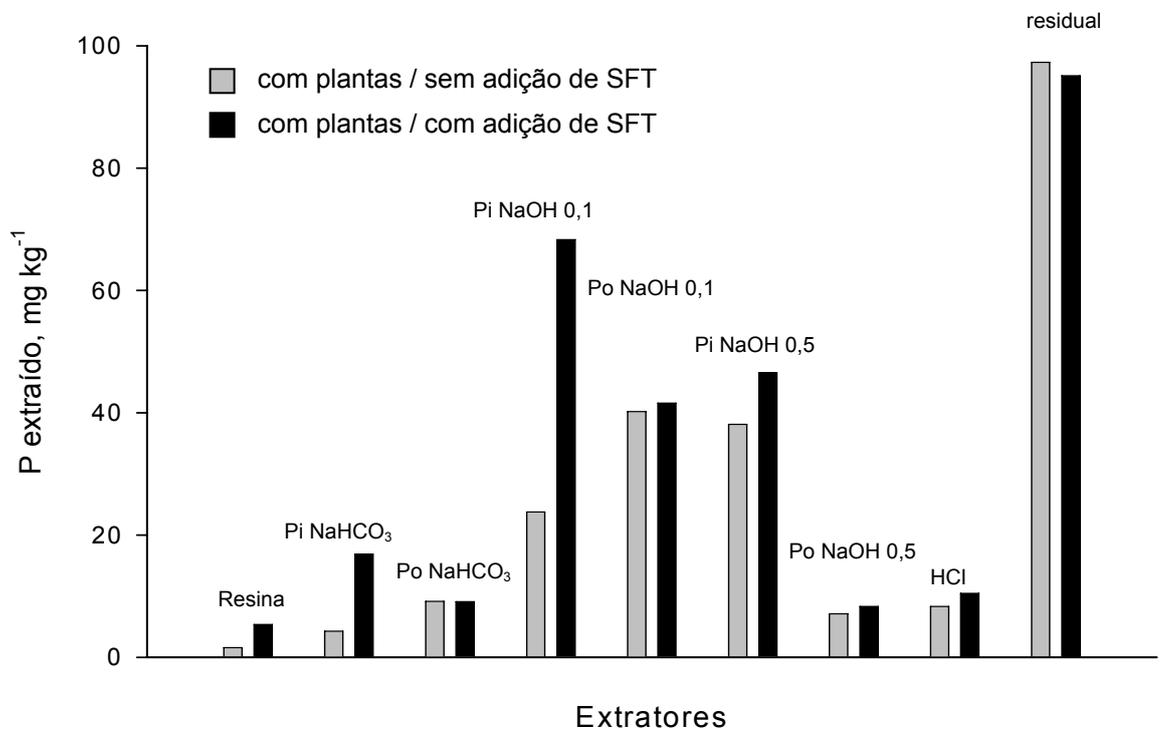


Figura 55. Frações de fósforo obtidas nas amostras do Chernossolo em função dos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

O solo Planossolo, oriundo de sedimento de granito, apresentou maiores teores de fósforo extraídos pelas frações de fósforo consideradas lábeis (Tabela 15 a 17), quando comparados aos solos oriundos de sedimento de basalto, com excessão do Luvissole, na presença de plantas sem a adição de SFT extraídos com RTA (Tabela 15). Isso, provavelmente contribua com a maior disponibilidade de fósforo às plantas, em curto espaço de tempo no Planossolo, em comparação aos solos oriundos de sedimento de basalto, já que essas frações de fósforo se encontram em equilíbrio com o fósforo na solução (Raij, 1991).

Os solos Vertissolo e Chernossolo apresentaram maiores teores de fósforo inorgânicos obtidos pelos extratores NaOH 0,1 e NaOH 0,5 do que o Planossolo nos seguintes níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT e com plantas com a adição de SFT (Tabela 18 e 19), o que confirma a hipótese formulada. Isso se deve ao maior teor de óxidos de ferro presentes nos solos oriundos de sedimento de basalto (Tabela 5). Desta forma, ocorreu provavelmente nestes solos maior sorção do fósforo inorgânico, por ligações monodentadas e bidentadas, bem como a difusão de fósforo no interior dos óxidos de ferro (Sposito, 1989).

Segundo Barrow (1998), as reações do ânion fosfato com os óxidos de ferro envolvem uma rápida troca de ligante, seguida de uma reação mais devagar, por uma lenta penetração para a superfície interior dos óxidos.

Tabela 15. Teores de fósforo extraídos pela Resina em função dos tratamentos utilizados

Solos	com plantas/ sem SFT	com plantas/ com SFT
	-----mg L ⁻¹ -----	
Planossolo	1,75 bA	6,44 aA
Luvissole	1,83 bA	6,22 aB
Vertissolo	1,65 bB	5,45 aC
Chernossolo	1,58 bB	5,36 aD

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si (Duncan, 5%).

Tabela 16. Teores de fósforo inorgânico extraídos pelo extrator NaHCO_3 em função dos tratamentos utilizados

Solos	com plantas/ sem SFT	com plantas/ com SFT
	-----mg L ⁻¹ -----	
Planossolo	5,95 bA	22,50 aA
Luvissolo	5,49 bB	19,90 aB
Vertissolo	4,29 bC	17,44 aC
Chernossolo	4,27 bC	17,15 aD

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si (Duncan, 5%).

Tabela 17. Teores de fósforo orgânico extraídos pelo extrator NaHCO_3 em função dos tratamentos utilizados

Solos	com plantas/ sem SFT	com plantas/ com SFT
	-----mg L ⁻¹ -----	
Planossolo	10,65 bB	12,20 aA
Luvissolo	10,15 bB	11,94 aB
Vertissolo	9,55 bB	9,70 aC
Chernossolo	9,11 aD	9,10 aD

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si (Duncan, 5%).

Tabela 18. Teores de fósforo inorgânico extraídos pelo extrator NaOH 0,1 mol L⁻¹ em função dos tratamentos utilizados

Solos	com plantas/ sem SFT	com plantas/ com SFT
	-----mg L ⁻¹ -----	
Planossolo	18,75 bD	51,40 aD
Luvissolo	19,47 bC	53,40 aC
Vertissolo	25,50 bB	68,30 aA
Chernossolo	23,75 bA	66,10 aB

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si (Duncan, 5%).

Tabela 19. Teores de fósforo inorgânico extraído pelo extrator NaOH 0,5 mol L⁻¹ em função dos tratamentos utilizados

Solos	com plantas/ sem SFT	com plantas/ com SFT
	-----mg L ⁻¹ -----	
Planossolo	24,00 bD	64,25 aD
Luvissolo	26,10 bC	67,82 aC
Vertissolo	38,50 bA	84,85 aA
Chernossolo	36,10 bB	78,92 aB

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si (Duncan, 5%).

A análise de regressão linear entre o fósforo acumulado pelas plantas e as frações de fósforo Resina e Pi NaHCO₃ (Figura 56 e 57) demonstraram coeficiente de determinação altamente significativo ($p < 0,01$), enquanto que as frações Po NaHCO₃ e Pi NaOH 0,1 (Figura 58 e 59) apresentaram significância a 5% ($p < 0,05$). Além disso, o coeficiente angular (b) foi positivo e significativo a 5% pelo teste t de student, indicando a tendência de acumulação de fósforo com aumento dessas frações de fósforo no solo. Isso demonstra que, neste experimento, as plantas de arroz absorveram o fósforo lábil e moderadamente lábil. Saleque et al. (2004) observaram que o fósforo acumulado pelas plantas de arroz foi associado ao fósforo lábil e a fração moderadamente lábil Pi NaOH 0,1. Huguenin-Elie et al. (2003) observaram que 10% do fósforo acumulado pelas plantas foram oriundos da fração lábil (Resina, Pi NaHCO₃ e Po NaHCO₃). Pheav et al. (2005) observaram que as sucessões de cultivos de arroz provocaram a diminuição das frações consideradas lábil, moderadamente lábil e não lábil, sugerindo que, sob condições de alagamento, todas as frações de fósforo fornecem fósforo indiretamente ou diretamente às plantas.

Vários autores têm demonstrado que, em um primeiro momento, a absorção de fósforo pelas plantas é fornecida pelas frações de fósforo inorgânico lábeis e de labilidade intermediária. Posteriormente, com a diminuição da disponibilidade de fósforo inorgânico no solo, ocorre a mineralização do fósforo orgânico, que repõe os teores das frações inorgânicas (Santos & Anghinoni, 2003; Gatiboni et al., 2005). No presente estudo, além

das formas lábeis, ocorreu também a contribuição do fósforo inorgânico adsorvido aos óxidos de ferro, extraídos pela fração NaOH 0,1, na disponibilidade de fósforo para as plantas. Isso se deve, provavelmente, à redução desses óxidos de ferro com o alagamento do solo, proporcionando a dessorção de fósforo.

A ausência de regressão linear do fósforo acumulado com a fração NaOH 0,5 mol L⁻¹, provavelmente, pode ter ocorrido pelo tamponamento do fósforo na solução através das frações lábil e moderadamente lábil, ou seja, as quantidades de fósforo na solução oriundas destas frações de fósforo foram suficientes para que houvesse a absorção de fósforo pelas plantas. Outra explicação é que a época da redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos com liberação do fósforo adsorvido, foi diferenciada entre os solos oriundos de sedimento de basalto quando comparados aos solos oriundos de sedimento de granito e arenito. Desta forma, o fósforo localizado no interior dos agregados no solo Planossolo pode ter dessorvido integralmente, devido à dissolução total dos óxidos de ferro durante o alagamento. Por outro lado, o fósforo localizado no interior dos agregados nos solos oriundos de sedimento de basalto, pode ter dessorvido parcialmente, devido à dissolução parcial dos óxidos de ferro. Ranno (2004) utilizando o fracionamento de Chang & Jackson (1957), em solos utilizados à cultura de arroz irrigado, observou diminuição do teor de fósforo ocluso obtido após o alagamento do solo, indicando que alguma fração desta forma de fósforo foi dissolvida e absorvida pelas plantas durante o alagamento do solo.

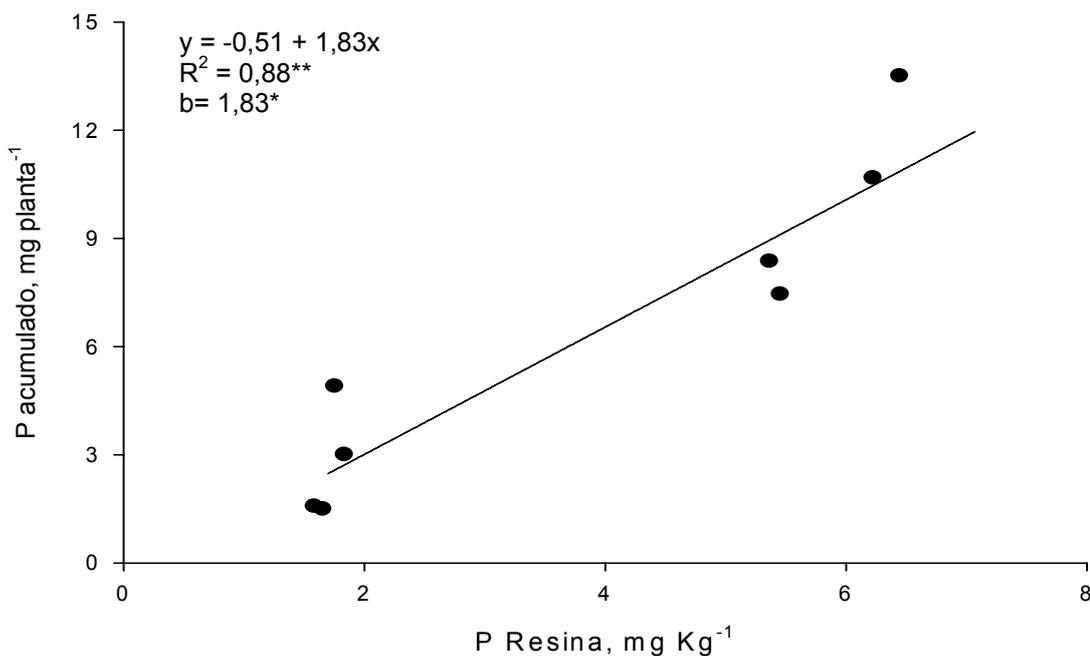


Figura 56. Relação entre os teores de fósforo extraído pela Resina e o teores de fósforo acumulado pelas plantas, nas amostras dos solos: Planossolo; Luvisolo; Vertissolo; Chernossolo, submetidas aos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

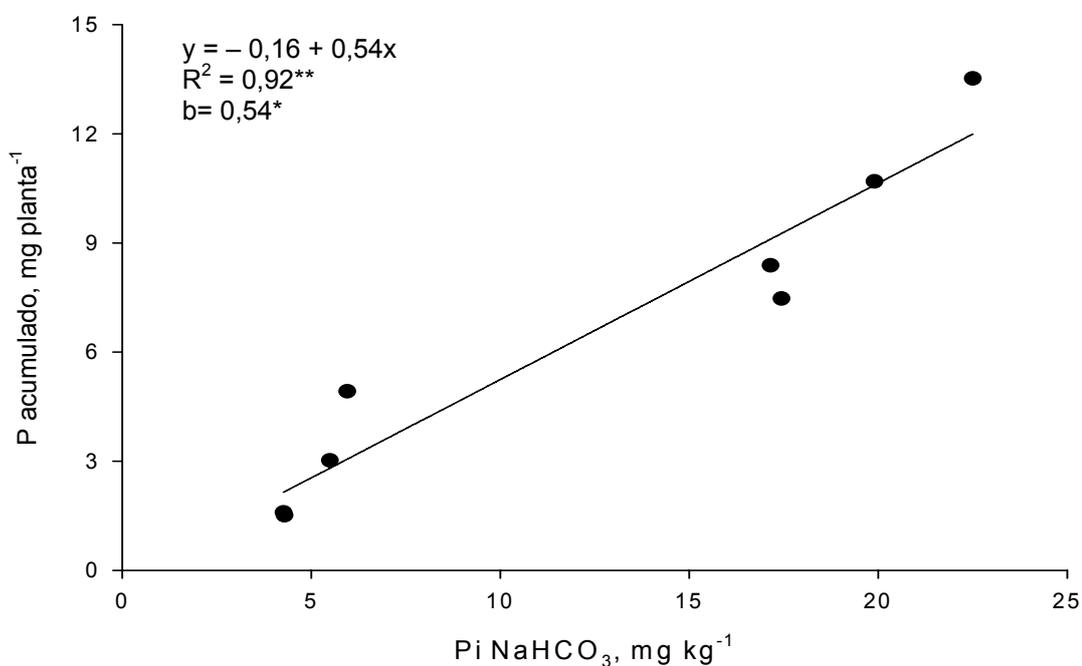


Figura 57. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Pi NaHCO₃ e os teores de fósforo acumulado pelas plantas, nas amostras dos solos: Planossolo; Luvisolo; Vertissolo; Chernossolo, submetidas aos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

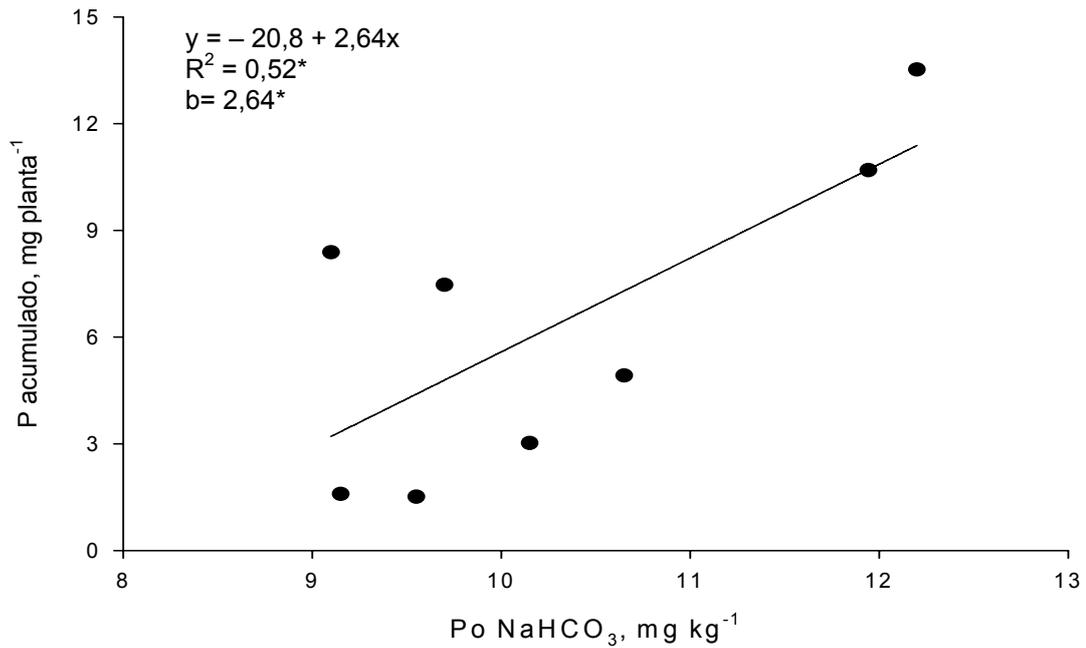


Figura 58. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Po NaHCO₃ e os teores de fósforo acumulado pelas plantas, nas amostras dos solos: Planossolo; Luvisolo; Vertissolo; Chernossolo, submetidas aos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

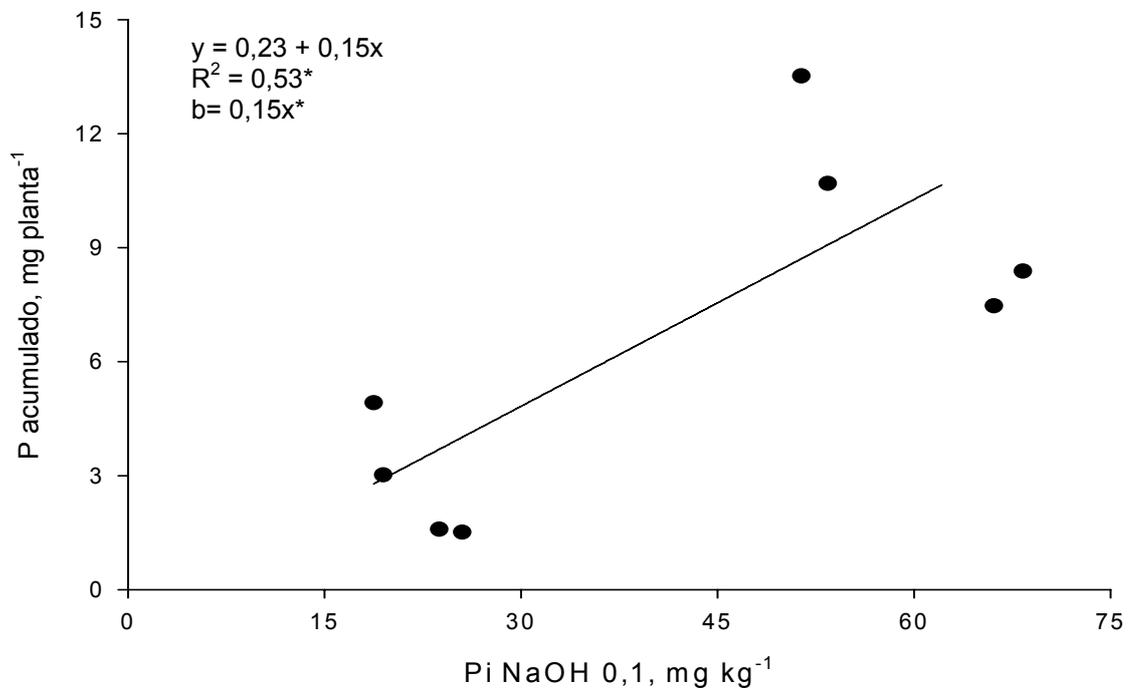


Figura 59. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Pi NaOH 0,1 mol L⁻¹ e os teores de fósforo acumulado pelas plantas, nas amostras dos solos: Planossolo; Luvisolo; Vertissolo; Chernossolo, submetidas aos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

Os extratores de fósforo utilizados atualmente na cultura de arroz irrigado, utilizam diferentes soluções extratoras com a finalidade de contemplar a dinâmica deste elemento em solo reduzido em suas localidades. A utilização da técnica de fracionamento permite a obtenção das formas de fósforo que mais se correlacionam com o fósforo acumulado, tornando necessária a utilização de um método que esteja associado a estas formas e também as quantidades extraídas. Diante disso, o método da Resina e Mehlich-1 se correlacionaram com as frações inorgânicas extraídas pelo NaHCO_3 e NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (Tabela 20). Logo, os resultados obtidos neste experimento indicam que estas frações de fósforo extraídas pelos métodos Resina e Mehlich-1 são também as absorvidas pelas plantas. Isso talvez explique a correlação significativa obtidas entre os extratores Resina e Mehlich-1 neste estudo ($R=0,98$).

Tabela 20. Coeficiente de correlação linear entre as frações de fósforo obtidas no fracionamento e o fósforo extraído pela Resina e Mehlich-1

Frações de Fósforo	Extratores	
	Resina	Mehlich-1
Pi NaHCO_3	0,99**	0,98**
Pi NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$	0,90**	0,83*

* e ** Significativo a 5 % e 1% de probabilidade, respectivamente.

Por outro lado, a ausência de correlação de ambos os extratores com a fração lábil Po NaHCO_3 , a qual foi associada ao fósforo acumulado pelas plantas, explique o porquê dos coeficientes de determinação não serem maiores (Figuras 56 e 60). Segundo Machado et al. (1993), em solos de várzea utilizados na cultura de arroz irrigado, cerca de 57% do fósforo total é representado pelo fósforo orgânico. Vários autores relatam que as frações orgânicas de fósforo que podem contribuir na disponibilidade de fósforo para as plantas de arroz não são detectadas pelos extratores Mehlich-1 e Resina (Novais & Smyth, 1999).

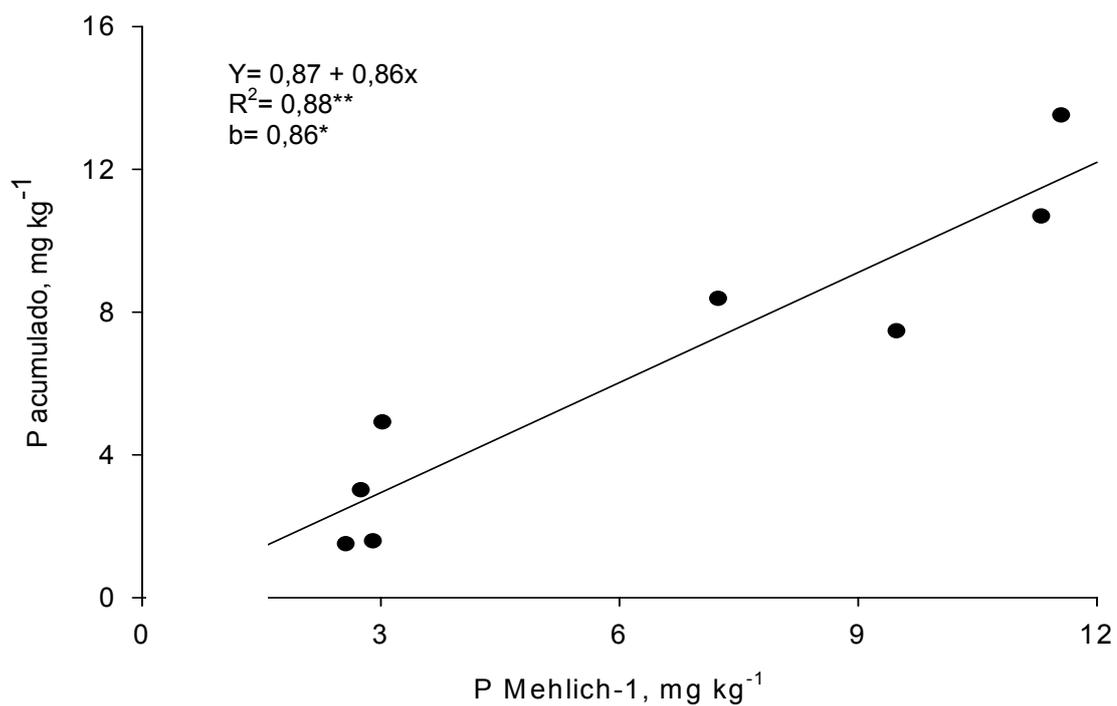


Figura 60. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumulado pelas plantas, nas amostras dos solos: Planossolo SGe 3; Luvisolo; Vertissolo; Chernossolo, submetidas aos níveis fatoriais: com plantas sem a adição de SFT; com plantas com a adição de SFT.

7.6. Conclusões

Conclusão 1: Os solos oriundos de sedimento de basalto apresentam maior quantidade de minerais contendo ferro na sua estrutura quando comparados aos solos oriundos de sedimento de granito. Isso proporcionou maior quantidade de sítios de adsorção de fósforo e conseqüentemente maior quantidade de fósforo extraído pelos extratores Pi NaOH 0,1 mol L⁻¹ e Pi NaOH 0,5 mol L⁻¹ que fornecem o fósforo moderadamente lábil e não lábil, em relação ao solo oriundo de sedimento de granito, os quais apresentaram maior quantidade de fósforo lábil.

Conclusão 2: Os teores de fósforo acumulados pelo arroz apresentaram associação com as frações de fósforo obtidas pelos extratores Resina, Pi NaHCO₃, Po NaHCO₃ que fornecem o fósforo lábil e também com a fração de fósforo inorgânica obtida pelo extrator Pi NaOH 0,1 mol L⁻¹ que fornecem o fósforo moderadamente lábil.

Conclusão 3: Os teores de fósforo extraídos pelos extratores Resina e Mehlich-1 apresentaram associação com as frações de fósforo inorgânicas NaHCO₃ e o NaOH 0,1 mol L⁻¹.

8. CONCLUSÕES GERAIS

1. Os solos oriundos de sedimento de granito apresentaram menores quantidades de óxidos de ferro e de manganês e conseqüentemente menor capacidade máxima de adsorção de fósforo quando comparados aos solos oriundos de sedimento de basalto.

2. Os solos oriundos de diferentes materiais de origem apresentaram sorção de fósforo diferenciada com o alagamento do solo. A sorção de fósforo é promovida, provavelmente, pela precipitação de fosfatos de ferro e também pela formação de hidróxidos de ferro, os quais adsorvem o fósforo da solução.

3. Dentre os métodos testados para avaliar a disponibilidade de fósforo para a cultura de arroz irrigado, o Método da Resina apresentou a maior relação com o fósforo acumulado pelas plantas de arroz. A separação dos solos em grupos, em função do material de origem e dos teores de óxidos de ferro de baixa cristalinidade, promoveu aumento no coeficiente de determinação na maioria dos métodos testados.

4. Os solos oriundos de sedimento de granito apresentaram solubilização mais rápida de manganês e ferro, promovendo a dessorção de fósforo antecipada em relação aos solos oriundos de sedimento de basalto, os quais apresentaram maior resposta à adubação fosfatada.

5. Os solos oriundos de sedimento de granito apresentaram maior quantidade de fósforo lábil em relação aos solos oriundos de sedimento de basalto. Os teores de fósforo acumulados pelas plantas de arroz foram

relacionados às frações de fósforo extraídas pela Resina, P_i NaHCO_3 , P_o NaHCO_3 e NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, demonstrando que o arroz acessou o fósforo lábil e moderadamente lábil.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A recomendação de fósforo para a cultura de arroz irrigado, atualmente utilizada no Rio Grande do Sul sugere que todos os solos usados para esta cultura têm comportamento semelhante na disponibilidade de fósforo para as plantas. Entretanto, os solos oriundos de diferentes materiais de origem apresentam comportamento diferenciado em relação às características mineralógicas, eletroquímicas e químicas, as quais afetam a disponibilidade de fósforo.

Os solos da classe Planossolo, em relação as demais classes utilizadas (Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo) têm menores teores de óxidos de manganês e de ferro cristalinos e de baixa cristalinidade, os quais proporcionam menor capacidade de adsorção de fósforo e redução antecipada de manganês e ferro na solução. Isso resulta em uma dessorção de fósforo adiantada em relação aos solos oriundos de sedimento de basalto. Além disso, os solos da Classe Planossolo têm maiores teores de fósforo na forma lábil do que os solos oriundos de sedimento de basalto. Isso pode contribuir para o aumento das concentrações de fósforo na solução nos períodos iniciais de alagamento, já que esta forma de fósforo se encontra em rápido equilíbrio com o fósforo na solução.

A cultura de arroz irrigado apresenta maior exigência de fósforo no estágio inicial de desenvolvimento; daí o porquê da aplicação de fósforo no momento da semeadura. Desta forma, as maiores concentrações de fósforo na solução da Classe Planossolo, possibilitam maior absorção de fósforo e também produção de matéria seca em relação aos solos oriundos de sedimento de basalto, os quais apresentam maior resposta à adubação fosfatada. O solo Vertissolo e o Chernossolo, com baixo teor de fósforo disponível, apresentam baixas concentrações de fósforo na solução inferiores

ao C_{min} (0,04 mg L⁻¹) obtidos em cultivares de arroz por Anghinoni et al. (1989). Isso demonstra a dificuldade de absorção de fósforo pelas plantas nestes solos.

As observações mencionadas anteriormente levam a acreditar que os solos oriundos de diferentes materiais de origem, utilizados para a cultura de arroz irrigado, necessitam de recomendação de fósforo diferenciada, ou seja, a adoção do nível crítico atual de 6 mg L⁻¹ P para todos os solos pode estar equivocada. Desta forma, seria oportuno a adoção de níveis críticos de fósforo diferenciados para cada grupo de solo, em função de alguma característica do mesmo, que viesse a auxiliar na distinção entre os solos oriundos de sedimento de basalto e os solos oriundos de sedimento de arenito, siltito e granito, com a finalidade de melhorar a recomendação atual deste nutriente para a cultura de arroz irrigado. Essa característica parece ser o teor de óxidos de ferro de baixa cristalinidade extraídos a pH 6, os quais se encontram relacionados à dinâmica do fósforo, seja em ambiente aeróbio, seja em ambiente anaeróbio. Neste trabalho, observou-se que a separação dos solos em grupos de acordo com os teores de óxidos de ferro de baixa cristalinidade, proporcionou aumento do coeficiente de determinação entre os teores de fósforo acumulado pelas plantas e o fósforo extraído na maioria dos métodos de extração utilizados. Isso se assemelha à separação dos solos em função dos teores de argila para a interpretação dos teores de fósforo do solo extraídos pelo Mehlich-1 em solos de sequeiro no Rio Grande do Sul.

Outra possibilidade seria a realização de um estudo de calibração de fósforo em todos os solos do Rio Grande do Sul. Isso se justifica pelo fato de que a realização da calibração de fósforo em solos da Classe Planossolo, que originou a recomendação atual, foi realizada com variedades tradicionais e não com as variedades modernas e os híbridos atualmente utilizados, os quais devem apresentar maior resposta à adubação fosfatada.

As futuras pesquisas em termos da utilização de fósforo na cultura de arroz irrigado deverão também envolver a questão da redução da utilização da água na lavoura de arroz. Isso tornará o manejo do fósforo diferenciado em relação ao manejo atual (época, fontes e doses), devido às alterações nas características eletroquímicas e químicas na solução, e seus reflexos no desenvolvimento das plantas.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLISON, J.D.; BROWN, D.S.; NOVO-GRADAC, K.J. **MINTEQA2 /Prodefa**: A geochemical assessment model for environmental systems. Version 3.0 user's manual. Athens: Environmental Protection Agency, 1991. 107 p. (EPA/600/3-91/021).
- ANGHINONI, I.; VOLKART, C.R.; FATTORE, N.; ERNANI, P.R. Morfologia de raízes e cinética de absorção de nutrientes em diversas espécies e genótipos de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, p. 355-361, 1989.
- AZAMBUJA, I.H.V.; VERNETTI Jr, F. de J.; MAGALHÃES Jr, A.M. de. Aspectos físico-químico de solos alagados. In: GOMES, A.da S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. de (Ed. Tec.) **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 97-118.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A.C. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de Latossolos do planalto central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.221-226, 1983.
- BARBOSA FILHO, M.P.; KINJO, T.; MURAOKA, T. Relações entre fósforo extraível, frações inorgânicas de fósforo e crescimento do arroz em função de fontes de fósforo, calagem e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, p. 147-155, 1987.
- BARROW, N.J.; BOLLAND, M.D.A.; ALLEN, D.G. Effect of previous additions of superphosphate on sorption of phosphate. **Australian Journal of Soil Research**, Adelaide, v.36, p. 359, 1998.
- BEEGLE, D. Assessing soil phosphorus for crop production by soil testing. In: SIMS, T.; SHARPLEY, A.N. (Eds.) **Phosphorus: Agriculture and the Environment**. Madison: ASA : CSSA : SSSA, 2005. p.123-144.
- BOYLE, F.W.; LINDSAY, W.L. Manganese phosphate equilibrium relationships in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, p. 588-593, 1986.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.J. **The nature and properties of soils**. New Jersey: Pearson Education, 2002. 960p.

- BRAY, R.H.; KURTZ, L.T. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. **Soil Science**, Baltimore, v.59, p.39-45, 1945.
- CAMPBELL, A.S.; SCHWERTMANN, U. Iron oxide mineralogy of placic horizons. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.35, p. 569-582, 1984.
- CHANG, S.C. Evaluation of the fertility of rice soils. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Soils and Rice**. Los Baños, 1978. p. 521-542.
- CHANG, S.C.; JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v. 84, p. 133-144, 1957.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre: Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 394 p.
- CONAB. [Informações]. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/8levsafra.pdf>. Acesso em: 21 maio 2007.
- CONDON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by P³¹ nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.36, p.199-207, 1985.
- CONDON, L.M.; FROSSARD, E.; TIESSEN, H.; NEWMAN, R.H.; STEWART, J.W.R. Chemical nature of organic phosphorus in cultivated and uncultivated soils under different environmental conditions. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.41, p.41-51, 1990.
- COUNCE, P.A.; KEISLING, T.C.; MITCHELL, A.J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v.40, p. 436-443, 2000.
- CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v.64, p.197-214, 1995.
- DALAL, R.C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.29, p.83-117, 1977.
- DICK, D.P. **Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes latossólicos**. 1986. 196f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.
- ELIASON, R.; LAMB, J.L.; REHM, G.W. Colorimetric and ICP measurement of P extracted by the Mehlich-3 procedure. In: ANNUAL MEETINGS, Madison, 2001. **Abstracts...** Madison, 2001. CD-ROM

- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa – Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa- CNPS, 2006. 306p.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição Mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Planta, 2006. 403p.
- FAGERIA, N. K. **Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1984. 341p.
- FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. Manejo do fósforo. In: FAGERIA, N.K.; STONE, L.F.; SANTOS, A.B. dos (Eds.) **Manejo da fertilidade do solo para o arroz irrigado**. Santo Antonio de Goias: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p. 95-120.
- FAVRE, D.; TESSIER, D.; ABDELMOULA, GENIN, J.M.; GATES.; W.P.; BOIVIN, P. Iron reduction and changes in cation exchange capacity in intermittently waterlogged soil. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.53, p.175-183, 2002.
- FONTES, M.P.F.; WEED, S.B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, Amsterdam, v.72, p.37-51, 1996.
- GATIBONI, L.C.; SANTOS, D. R. dos.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Phosphorus Forms and Availability Assessed by ³¹P-NMR in Successive Cropped Soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, p. 2625-2640, 2005.
- GHILDYAL, B.P. Effects of compaction and puddling on soil physical properties and rice growth. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Soils and Rice**. Los Baños, 1978. p. 316-336.
- GONÇALVES, G.K. **Solubilização de fosfatos naturais em solos alagados**. Pelotas, 2003. 49f. Dissertação (Mestrado em Solos) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2003.
- GOSWANI, N.N.; BENERJEE, N.K. Phosphorus, potassium and other macroelements. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Soils and Rice**. Los Baños, 1978. p. 561-580.
- GRANDE, M.A.; CURI, N.; QUAGGIO, J.A. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich e resina, em solos cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, p. 45-50, 1986.
- GUGGENBERGER, G.; CHRISTENSEN, B.T.; RUBACK, G. Land use and fertilization effects on P forms in two European soil resin extraction and ³¹P-RMN analysis. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.47, p. 605-614, 1996.
- GUO, F.; YOST, R.S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, Baltimore, v.163, p.822-833, 1998.

- GUO, F.; YOST, R.S.; HUE, N.V.; EVENSEN, C.I.; SILVA, J.A. Changes in phosphorus fractions under intensive plant growth. **Soil Science of America Journal**, Madison, v.64, p.1681-1689, 2000.
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.46, p. 970-976, 1982.
- HERNANDEZ, J.; MEURER, E.J. Adsorção de fósforo e sua relação com formas de ferro em dez solos do Uruguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.22, p. 223-230, 1998.
- HOLFORD, I.C.R.; PATRICK JR, W.H. Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in an acid soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.43, p. 292-297, 1979.
- HOSSNER, L.R.; RICHARDS, R.E. The effect of phosphorus sources on the movement of band applied manganese. **Soil Science Society of American Proceeding**, Madison, v.32, p. 83-85, 1968.
- HOSSNER, L.R.; FREEOUF, J.A.; FOLSOM, B.L. Solution phosphorus concentration and growth of rice in flooded soils. **Soil Science Society of American Proceeding**, Madison, v.37, p. 405-407, 1973.
- HUE, N.V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, Baltimore, v.152, p. 463-471, 1991.
- HUGUENIN-ELIE, O.; KIRK, G.J.D.; FROSSARD, E. Phosphorus uptake by rice from soil that is flooded, drained or flooded then drained. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 54, p. 77-90, 2003.
- INDA JUNIOR, A.V.; KÄMPF, N. Avaliação de procedimentos de extração dos óxidos de ferro pedogênicos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1139-1147, 2003.
- INDA JUNIOR, A.V.; KÄMPF, N. Variabilidade de goethite e hematite via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.851-866, 2005.
- KÄMPFT, N. O ferro no solo. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, 1988, Goiânia. **Anais**. Goiânia: Embrapa-CNPAP, 1988. p. 35-71.
- KAMPRATH, E.J.; WATSON, M.E. Conventional soil and tissue test for assessing the phosphorus status of soil. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Eds) **The role of phosphorus in agriculture**. Madison, 1980. p. 433-469.

- KHALID, R.A.; PATRICK JR, W.H.; DELAUNE, R.D. Phosphorus sorption characteristics of flooded soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, p. 305-309, 1977.
- KIRK, G.J.D.; SOLIVAS, J.L.; ALBERTO, M.C. Effects of flooding and redox condition on solute diffusion in soil. **European Journal Soil Science**, Oxford, v.54, p. 617-624, 2003.
- KPOMBLEKOU, K.; TABATABAI, M.A. Effect of organic acids on release of phosphorus from phosphate the rocks. **Soil Science**, Baltimore, v.158, p.442-453, 1994.
- KRAIRAPANOND, A.; PATRICK Jr, H. Phosphorus sorption characteristics in acid sulphate soils of Thailand: Effect of uncontrolled and controlled soil redox potential (Eh) and pH. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.157, p. 227-237, 1993.
- KROTH, P.L. **Disponibilidade de fósforo no solo para plantas e fatores que afetam a extração por resina de troca em membrana**. 1998. 168f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- LINDSAY, W. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979. 449p.
- LOPEZ, F.C.; DALURZO, H.C.; VASQUEZ, S.; MENDOZA, R. Fracciones de fósforo en un Alfisol con cultivo de arroz fertilizado. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*. [S.l.] : Universidad Nacional del Nordeste, 2004. p. 1-4.
- MACHADO, M.I.C.S. **O fósforo nos solos da região Sul do Rio Grande do Sul- formas, capacidade máxima de adsorção e poder tampão**. Pelotas, 1992. 100f. Dissertação (Mestrado em Solos) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1992.
- MADRUGA, E.F. **Efeito da aplicação de material vegetal e nitrato sobre a redução do solo**. Pelotas, 1998. 47f. Dissertação (Mestrado em Solos) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1998.
- MATTIGOD, S.V; SPOSITO, G. Chemical modeling of trace metal equilibrium in contaminated soil solutions using the computer program GEOCHEM. In: JANNE, E.A. (ed.). **Chemical modeling in aqueous systems**. Washington: American Chemical Society, 1979. v.3.
- ARROZ irrigado no Sul do Brasil. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 97-118.
- McBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994. 406p.

- McGILL, W.B., C.V. COLE. Comparative aspects of cycling of organic C,N,S and P through soil organic matter. **Geoderma**, Amsterdam, v.26, p. 267-286, 1981.
- McKENZIE, R.M. Manganese oxides and hydroxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S.B. (Eds.). **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 439-465.
- MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina Soil Testing Laboratories**. Raleigh: University of North Carolina, 1953.
- MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.15, p. 1409-1416, 1984.
- MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clay by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE CLAYS & CLAY MINERALS, 7., Ottawa, 1960. **Proceedings...** [Ottawa], 1960. p. 317-327.
- MIOLA, G.R. **Extração de P, K, Ca e Mg por diferentes métodos e avaliação da disponibilidade de fósforo para as plantas**. 1995. 127f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós – Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.
- MOTTA, P.E.F.; KÄMPF, N. Iron oxide properties as support to soil morphological features for prediction of moisture regimes in Oxisols of Central Brazil. **Zeitschrift Fur Pflanzenernährung Und Bodenkunde**, Weinheim, v. 155, p. 385-390, 1992.
- MUNCH, J.C.; OTTOW, J.C.G. Preferential reduction of amorphous to crystalline iron oxides by bacterial activity. **Soil Science**, Baltimore, v.129, p.15-21, 1980.
- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; FREIRE, F.M.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação avaliadas por meio de extratores químicos e do crescimento de soja em amostras de solo com diferentes valores do fator capacidade. **Revista Ceres**, Campinas, v.34, p. 125-151, 1987.
- MURPHY, J.; RILLEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, v.27, p. 31-36, 1962.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- OLSEN, S.R.; COLE, C.V.; WATANABE, F.S.; DEAN, L.A. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Washington, D.C. : USDA, 1954. (USDA Circ., 939).

- PARFITT, R. L. Phosphate reactions with natural allophone, ferrhydrite and goethite. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.40, p. 359-369, 1989.
- PATRICK, JR.; REDDY, C.N. Chemical Changes in rice soils. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Soils and Rice**. Los Baños, 1978. p. 361-380.
- PATRICK Jr, W.H.; GOTOH, S.; MORAGHAN, J.T. A simple system for controlling redox potential and pH in suspensions. **Soil Science Society of American Proceeding**, Madison, v.37, p. 331-332, 1973.
- PHEAV, S.; BELL, R.W.; KIRK, G.J.D.; WHITE, P.F. Phosphorus cycling in rainfed lowland rice ecosystems on sandy soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.269, p. 89-98, 2005.
- PHILLIPS, I.R.; GREENWAY, M. Changes in water-soluble and exchangeable ions, cation exchange capacity, and phosphorus max in soils under alternating waterlogged and drying conditions. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.29, p. 51-65, 1998.
- PIERZYNSKI, G, M.; McDOWELL, R.M.; SIMS, J.T. Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils. In: SIMS, T.; SHARPLEY, A.N. (Eds.) **Phosphorus: Agriculture and the Environment**. Madison: ASA : CSSA : SSSA, 2005. p.53-86.
- PINTO, L.F.S.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.da S.; SOUSA, R.O. Caracterização de solos de várzea. In: GOMES, A. da S., PAULETTO, E.A. (Eds.) **Manejo do solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 11-33.
- PINTO, L.F.S.; NETO, J.P.L.; PAULETTO, E.A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A.da S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. de (Eds) **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 75-95.
- PONNAMPERUMA, F.N. Dynamic aspects of flooded soils and the nutrition of the rice plant. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE **The mineral nutrition of the rice plant**. Baltimore, 1965. p. 295-328
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.24, p.29-96, 1972.
- PONNAMPERUMA, F.N. Electrochemical changes in submerged soils and the growth of rice. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Soils and Rice**. Los Baños, 1978. p. 421-444.
- PONNAMPERUMA, F.N. Chemical kinetics of wetland rice soils relative to soil fertility. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Wetland Soils: Characterization, Classification, and Utilization**. Los Baños, 1978. p.71-90.

- PORTO, M.P.; SILVA, C.A. da.; PARFITT, J.M.B. Diversificação do sistema de produção de arroz irrigado com cultivos anuais. In: GOMES, A. da S., PETRINI, J.A.; FAGUNDES, P.R.R. (Eds.) **Manejo racional da cultura do arroz irrigado “Projeto Marca”**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. p. 171-184.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 343p.
- RAIJ, B.van. Métodos de diagnose de fósforo no solo em uso no Brasil. In SIMPÓSIO SOBRE O FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba, SP Anais. Piracicaba, 2003. CD-ROM.
- RAIJ, B. van; QUAGIO, J.A.; SILVA, N.M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.17, p. 547-566, 1986.
- RANNO, S.K. **Estimativa da disponibilidade de fósforo para a cultura de arroz irrigado**. 2004. 137f. Dissertação (Mestrado em Solos) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.
- REDDY, R. K.; WETZEL, R.G.; KADLEC, R.H. In: SIMS, T.; SHARPLEY, A.N. (Eds.) **Phosphorus: Agriculture and the Environment**. Madison: ASA : CSSA : SSSA, 2005. p.263-316.
- RUIZ, J.M.; DELGADO, A.; TORRENT, J. Iron-related phosphorus in overfertilized European soils. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 26, p. 1548-1554, 1997.
- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S.; HAFEZ, A.A. Phosphorus behavior in flooded-drained soils. I. Effects on phosphorus sorption. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p. 1718-1722, 1989A.
- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S.; HAFEZ, A.A. Phosphorus behavior in flooded-drained soils. II. Iron transformation and phosphorus sorption. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p. 1723-1729, 1989B.
- SALEQUE, M.A.; NAHER, U.A.; ISLAM, A.; PATHAN, A.B.M.B.U.; HOSSAIN, A.T.M.S.; MEISNER, C.A. Inorganic and organic phosphorus fertilizer effects on the phosphorus fractionation in wetland rice soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, p.1635-1644, 2004.
- SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J.; RACZ, G.J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: Khasawneh, F.E. et al. (Eds.) **The role of phosphorus in Agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 263-310.
- SANTOS, D. R. dos.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, p. 2339-2354, 2003.

- SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisenoxide des bodens durch extraction mit ammoniumoxalat-losung. **Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde**, Weinheim, v. 105, p. 194-202, 1964.
- SCHWERTMANN, U. Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous ferric hydroxide. **Nature**, London, v.212, p. 645-646, 1966.
- SCHWERTMANN, U. Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. In: STUCKI, J.W. et al. (Eds.) **Iron in soils and clay minerals**. Dordrecht: D. Reidel, 1988. p. 267-308.
- SCHWERTMANN, U. Solubility and dissolution of iron oxides. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.130, p. 1-25, 1991.
- SCHWERTMANN, U.; FISCHER, W.R. Natural "amorphous" ferric hydroxides. **Geoderma**, Amsterdam, v.10, p. 237-247, 1973.
- SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Óxidos de ferro jovens em ambientes pedogenéticos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 251-255, 1983.
- SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of southern and central Brazil. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 139, p. 344-358, 1985.
- SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J. B. ; WEED, S.B. (Eds). **Minerals in soil environments**. Madison : Soil Science Society of America, 1989. p. 379-438.
- SCIVITTARO, W.B. Otimização do uso de fertilizantes nas lavouras de arroz do RS. In: GOMES, A. da S.; PETRINI, J.A.; FAGUNDES, P.R.R. (Eds.) **Manejo racional da cultura do arroz irrigado "Projeto Marca"**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. p. 77-90.
- SHAHANDEH, H.; HOSSNER, R.L.; TURNER, F.T. Phosphorus relationships in flooded rice soils with low extractable phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p. 1184-1189, 1994.
- SHAHANDEH, H.; HOSSNER, L.R.; TURNER, F.T. Phosphorus relationships to manganese and iron in rice soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 168, p. 489-500, 2003
- SHARPLEY, A.N.; TIESSEN, H.; COLE C.V. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p. 362-365, 1987.
- SILVA, R.J. da. **Metodologia de avaliação da disponibilidade de fósforo em solos alagados**. 1999. 47f. Dissertação (Mestrado em Solos) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1996.

- SILVA, F.C.; RAIJ, B. van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, p. 267-288, 1999.
- SIMS, J.T. Comparison of Mehlich 1 and Mehlich 3 extractants for P, K, Ca, Mg, Mn, Cu and Zn in atlantic coastal plain soils. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.20, p. 1707-1726, 1989.
- SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI). **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. Santa Maria, 2005. 159 p.
- SOUSA, R.O. **Oxirredução em solos alagados afetada por resíduos vegetais**. 2001. 164f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- SOUSA, R.O.; BOHNEN, H.; MEURER, E.J. Composição da solução de um solo alagado conforme a profundidade e o tempo de alagamento, utilizando novo método de coleta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 26, p. 343-348, 2002.
- SOUSA, R.O.; GOMES, A.da S.; VAHL, L.C. Toxidez por ferro em arroz irrigado. In: GOMES, A.da S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. de (Eds.) **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 305-338.
- SPARKS, D.L. **Environmental soil chemistry**. San Diego: Academic Press, 1995. 267p.
- SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 277p.
- STEFFENS, D. Phosphorus release kinetics and extractable phosphorus after long-term fertilization. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.58. p. 1702-1708, 1994.
- STEWART, J.W.B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, Netherlands, v.4, p.41-60, 1987.
- STRECK, V.E.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E., NASCIMENTO, P.C do.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Emater/ RS : Departamento de Solos da UFRGS, 2002. p. 23-51.
- SYERS, J.K.; EVANS, T.D.; WILLIAMS, J.D.H.; MURDOCK, J.T. Phosphate sorption parameters of representative soils from Rio Grande do Sul, Brazil. **Soil Science**, Baltimore, v.112, p.267-275, 1971.
- TATE, K.R.; NEWMAN, R.K. Phosphorus fractions of a climosequence of soils in New Zeland tussock gassland. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.14, p. 191-196, 1982.

- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre: Departamento de solos da UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).
- TEO, Y.H.; BEYROUTY, C.A.; GBUR, E.E. Relating soil test P to P uptake by paddy rice. **Soil Science**, Baltimore, v. 59, 409-414, 1995.
- 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, p. 853-858, 1984.
- TISDALE, L.S.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Lehig Press, 1993. 633p.
- TURNER, F.T.; W.H. PATRICK, Jr. Increased P diffusion as an explanation of increased P availability in flooded rice soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.45, p. 365-377, 1976.
- VAHL, L.C.; ANGHINONI, I.; KAMPF, N. Previsão da acumulação de ferro trocável no solo durante o alagamento através de análise química. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24., 1993, Goiânia. **Resumos**. Goiânia,1993. p. 183-184.
- VAHL, L.C.; SOUSA, R.O. Aspectos físico-químico de solos alagados. In: GOMES, A.da S.; MAGALHÃES Jr, A.M. de (Eds.) **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 97-118.
- VAIDYANATHAM, L.V.; TALIBUDEEN. Rate processes in the desorption of phosphate from soils by ion exchange resins. **Journal Soil Scienc** Oxford, v.21, p.173-183, 1970.
- WILLETT, I.R. Causes and prediction of changes in exctrable phosphorus during flooding. **Australian Journal of Soil Research**, Adelaide, v.27, p.45-54. 1989.
- WILLETT, I.R.; HIGGINS, M.L. Phosphate sorption by reduced and re-oxidized rice soils. **Australian Journal of Soil Research**, Adelaide, v.16, p. 319-326, 1978.
- WOLT, J.D. **Soil solution chemistry**: applications to environmental science and agriculture. New York: Wiley, 1994. 345p.
- YAMANE, I. Electrochemical changes in rice soils. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Soils and Rice**. Los Baños, 1978. p. 381-398.
- YOSHIDA, T. Microbial Metabolism of flooded soil. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Soils and Rice**. Los Baños, 1978. p. 445-463.

ZHANG, X.; ZHANG, F.; MAO, D. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.): phsphorus uptake. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 209, p. 187-192, 1999.

ZONTA, E.P.; MACHADO, A.A.; SILVEIRA, J.P. **Sistema de análise estatística para microcomputadores(SANEST)**. Pelotas : Universidade Federal de Pelotas, 1984. 151p.

11. APÊNDICES

APÊNDICE 1. Fósforo extraído por Mehlich-1 em função da aplicação de doses de SFT nos solos utilizados (média das três repetições)

Solos	Doses (mg P kg ⁻¹)		
	0	19,65	39,30
	----- mg L ⁻¹ -----		
Planossolo SGe 3	3,02	8,98	12,22
Planossolo SGe 1	5,50	9,30	18,93
Luvissole	2,89	8,20	11,48
Vertissolo	2,97	6,72	9,60
Chernossolo	2,76	5,20	6,90

APÊNDICE 2. Fósforo extraído por Mehlich-3 em função da aplicação de doses de SFT nos solos utilizados (média das três repetições)

Solos	Doses (mg P kg ⁻¹)		
	0	19,65	39,30
	----- mg L ⁻¹ -----		
Planossolo SGe 3	2,23	5,52	7,48
Planossolo SGe 1	3,15	6,64	12,92
Luvissole	1,87	5,62	8,83
Vertissolo	1,86	3,25	4,85
Chernossolo	2,05	3,71	3,97

APÊNDICE 3. Fósforo extraído por Resina em função da aplicação de doses de SFT nos solos utilizados (média das três repetições)

Solos	Doses (mg P kg ⁻¹)		
	0	19,65	39,30
	----- mg L ⁻¹ -----		
Planossolo SGe 3	1,83	4,86	7,07
Planossolo SGe 1	3,11	6,00	11,13
Luvissole	1,81	4,32	6,56
Vertissolo	1,70	3,80	5,33
Chernossolo	1,55	2,94	4,76

APÊNDICE 4. Fósforo extraído por Olsen em função da aplicação de doses de SFT nos solos utilizados (média das três repetições)

Solos	Doses (mg P kg ⁻¹)		
	0	19,65	39,30
	----- mg L ⁻¹ -----		
Planossolo SGe 3	7,47	18,37	29,91
Planossolo SGe 1	11,57	26,18	35,77
Luvissolo	9,30	16,88	27,33
Vertissolo	8,84	15,58	24,73
Chernossolo	8,43	15,72	26,07

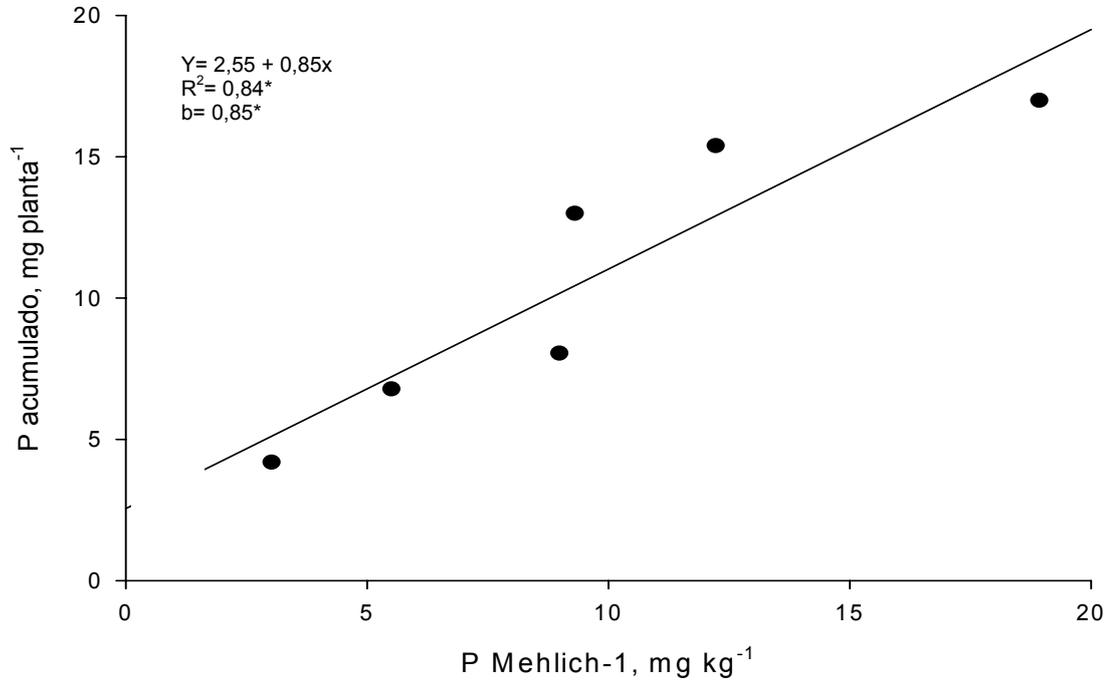
APÊNDICE 5. Fósforo extraído por Oxalato em função da aplicação de doses de SFT nos solos utilizados (média das três repetições)

Solos	Doses (mg P kg ⁻¹)		
	0	19,65	39,30
	----- mg L ⁻¹ -----		
Planossolo SGe 3	15,17	31,90	54,18
Planossolo SGe 1	22,13	43,00	71,89
Luvissolo	15,98	37,70	57,63
Vertissolo	18,70	38,51	57,10
Chernossolo	20,52	41,17	63,12

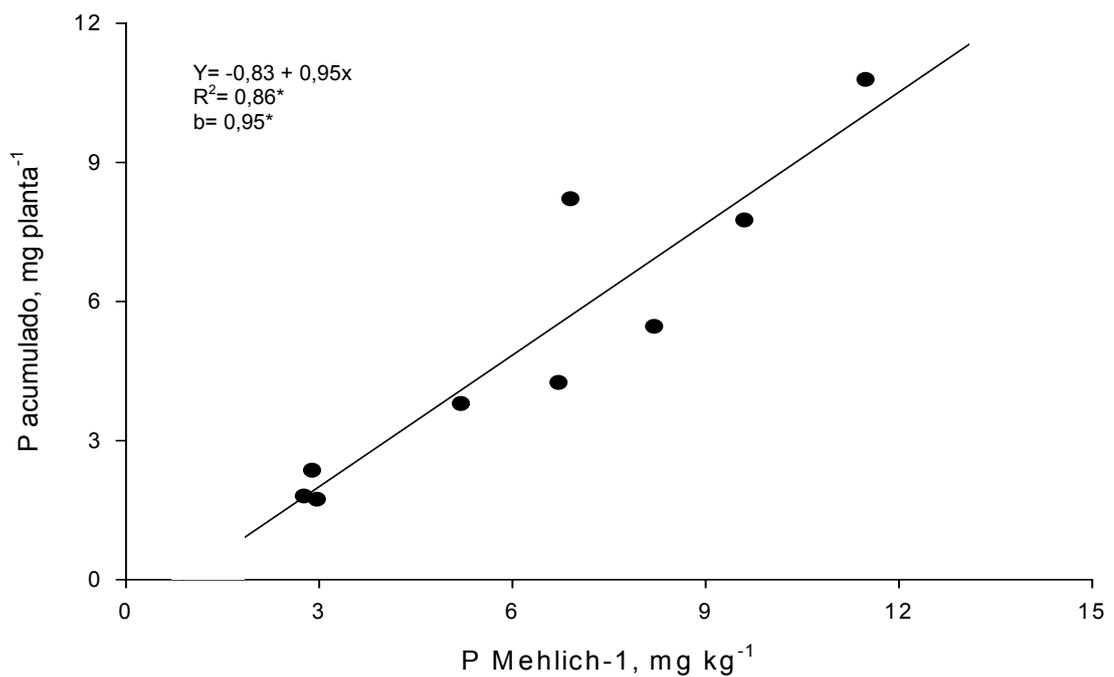
APÊNDICE 6. Fósforo acumulado em função da aplicação de doses de SFT aos solos utilizados (média das três repetições)

Solos	Doses (mg P kg ⁻¹)		
	0	19,65	39,30
	----- mg planta ⁻¹ -----		
Planossolo SGe 3	4,19	8,05	15,39
Planossolo SGe 1	6,78	13,00	17,00
Luvissolo	2,36	5,46	10,78
Vertissolo	1,73	4,25	7,75
Chernossolo	1,80	3,80	8,21

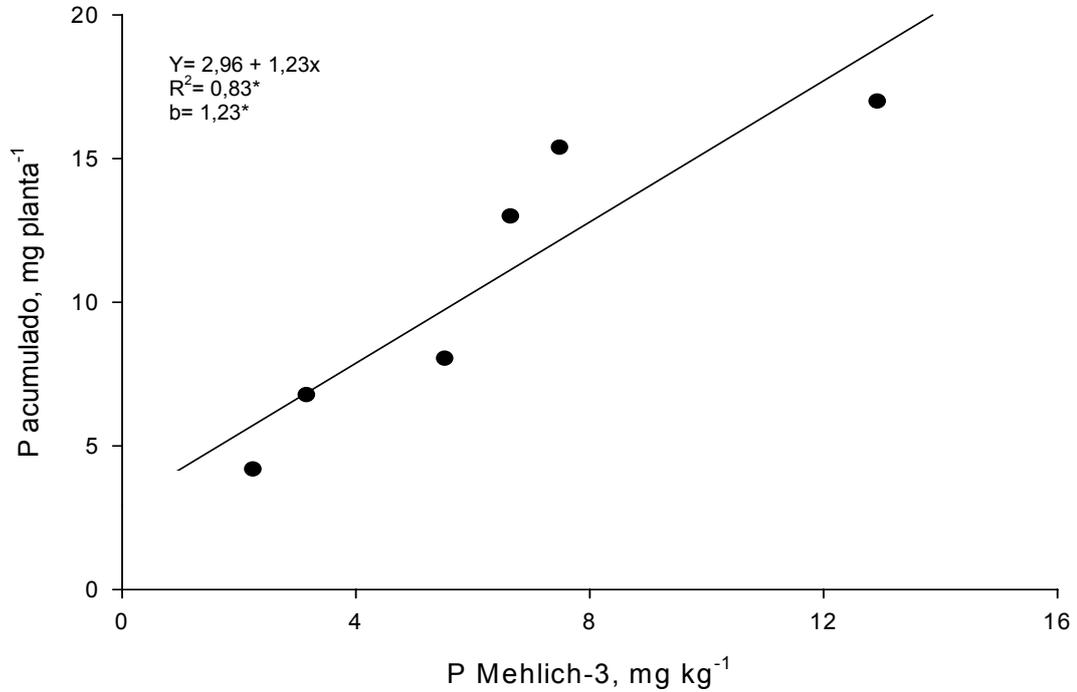
APÊNDICE 7. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo e Gleissolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg total kg⁻¹



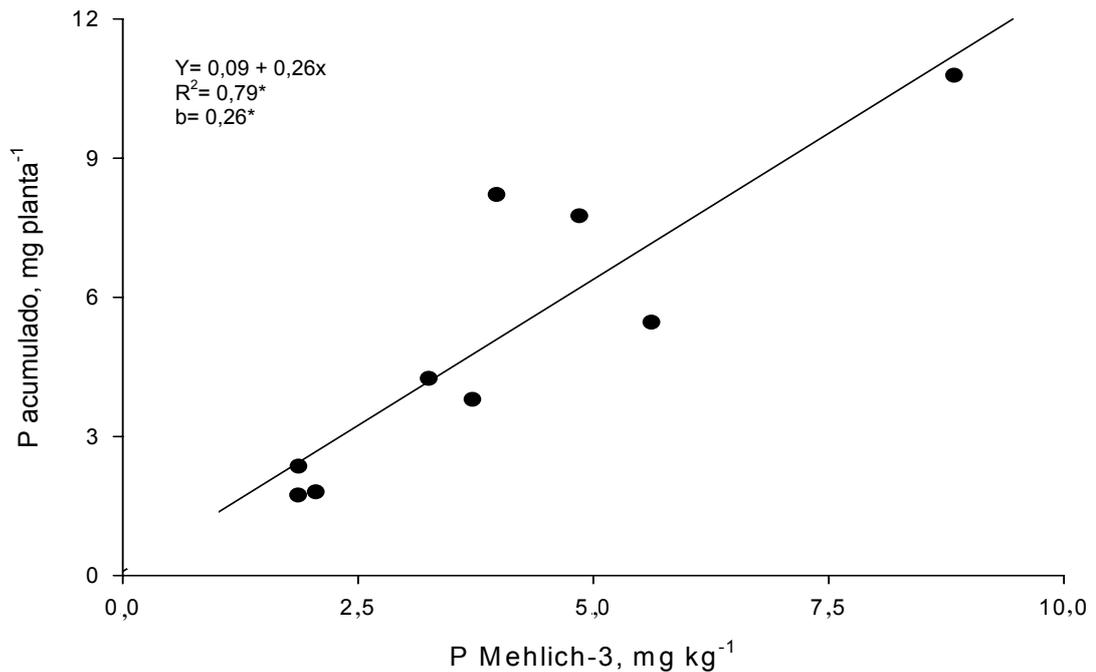
APÊNDICE 8. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Luvisolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg P kg⁻¹



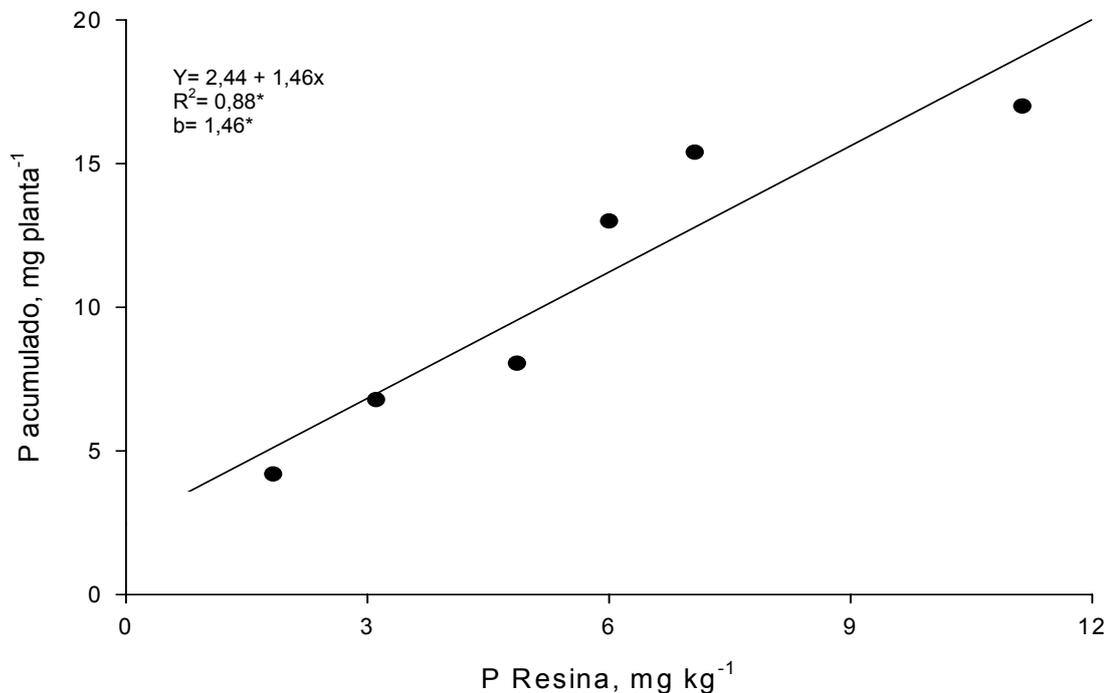
APÊNDICE 9. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Mehlich-3 e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo e Gleissolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg P kg⁻¹



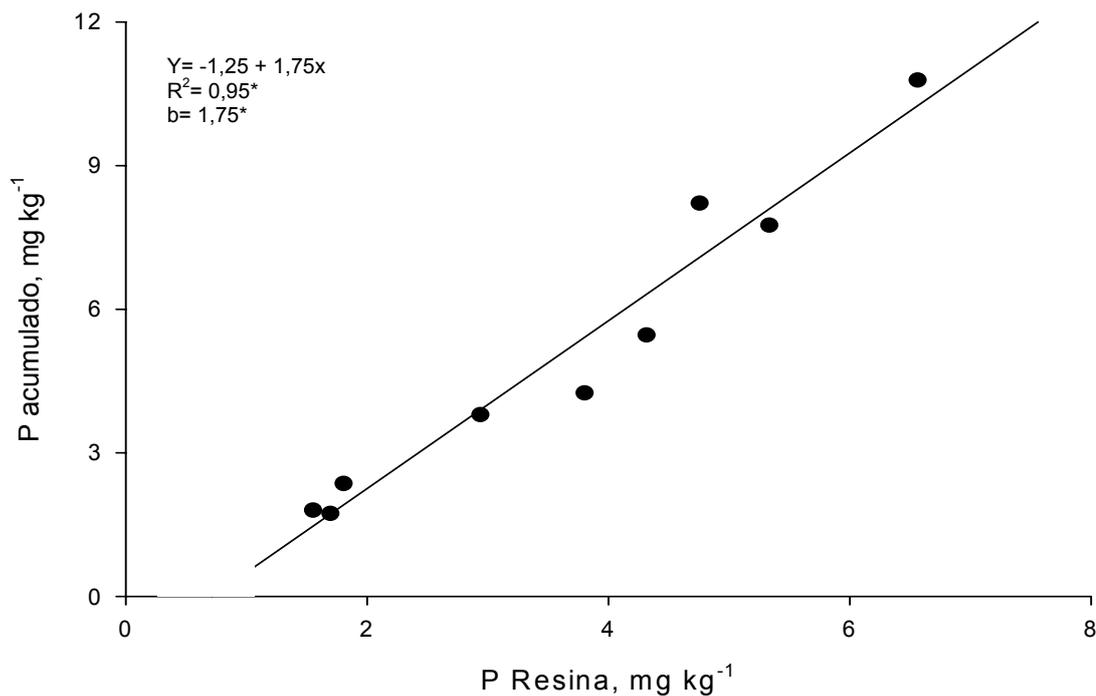
APÊNDICE 10. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Mehlich-3 e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Luvissoilo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg P kg⁻¹



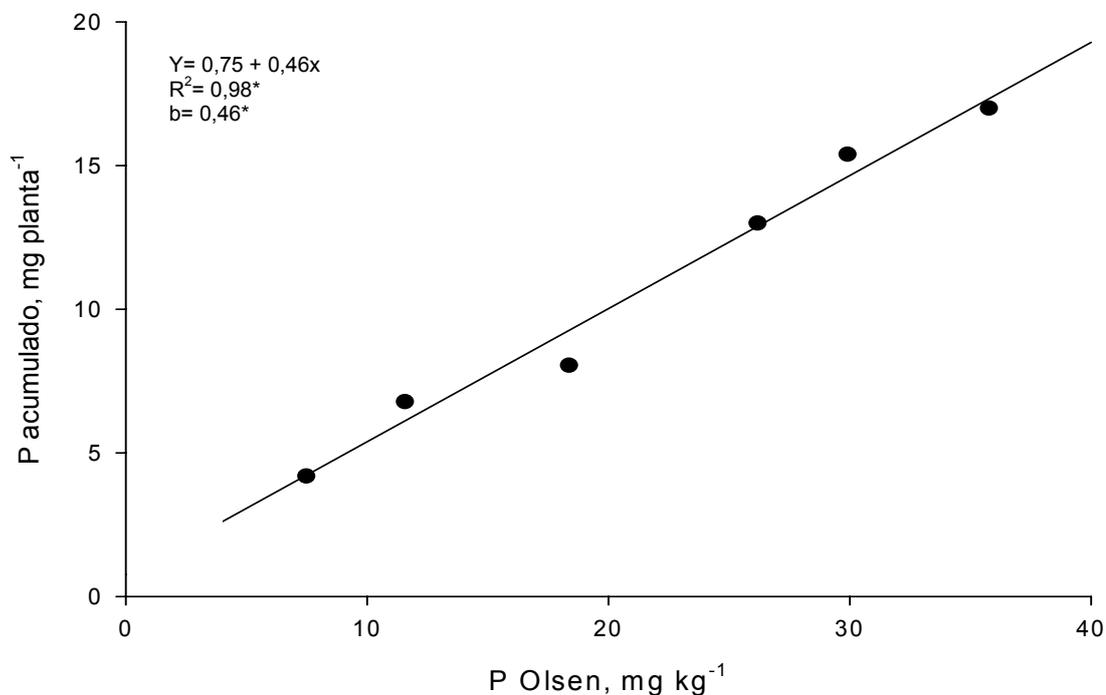
APÊNDICE 11. Relação entre os teores de fósforo extraídos pela Resina e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo e Gleissolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg P kg⁻¹



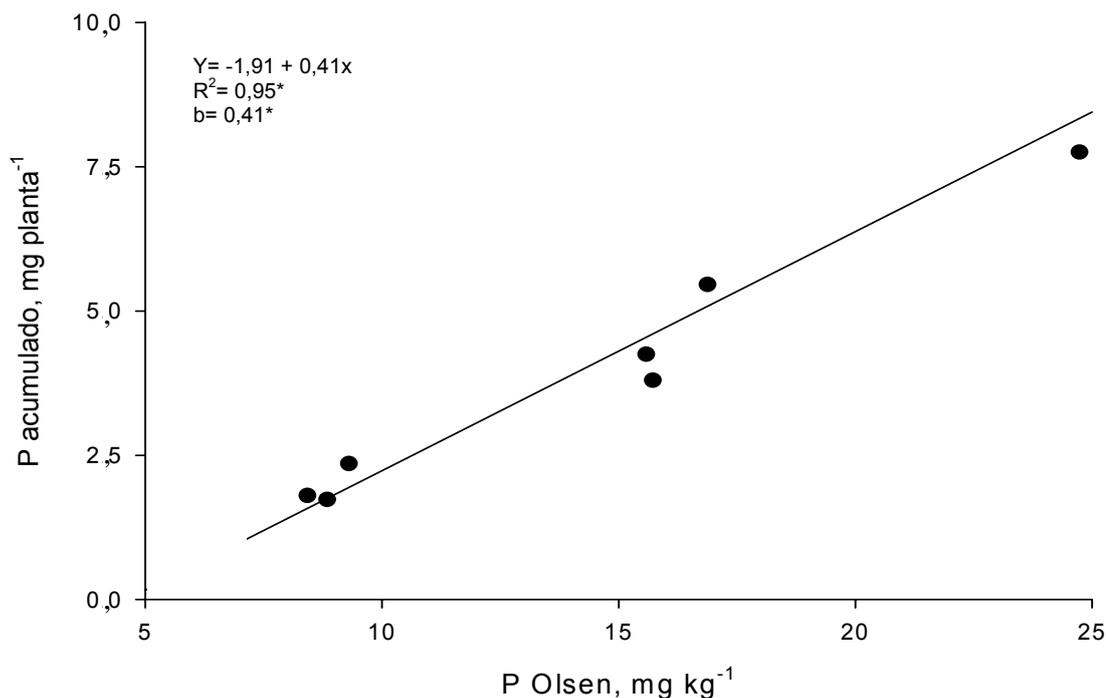
APÊNDICE 12. Relação entre os teores de fósforo extraídos pela Resina e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Luvissole; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg P kg⁻¹



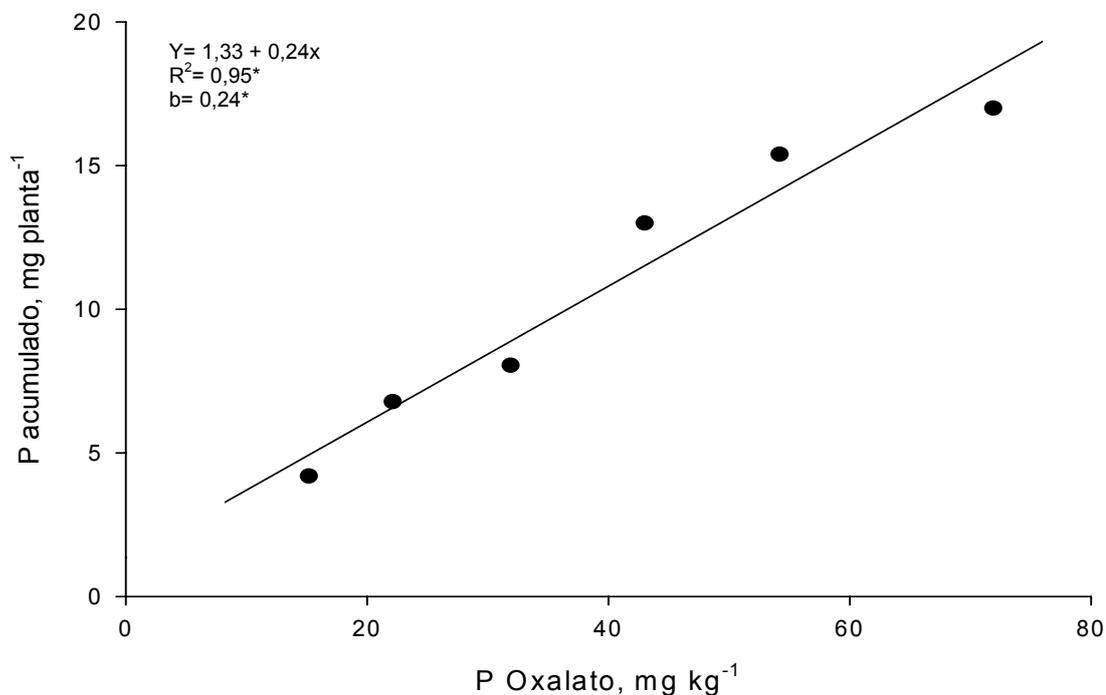
APÊNDICE 13. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Olsen e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo e Gleissolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg P kg⁻¹



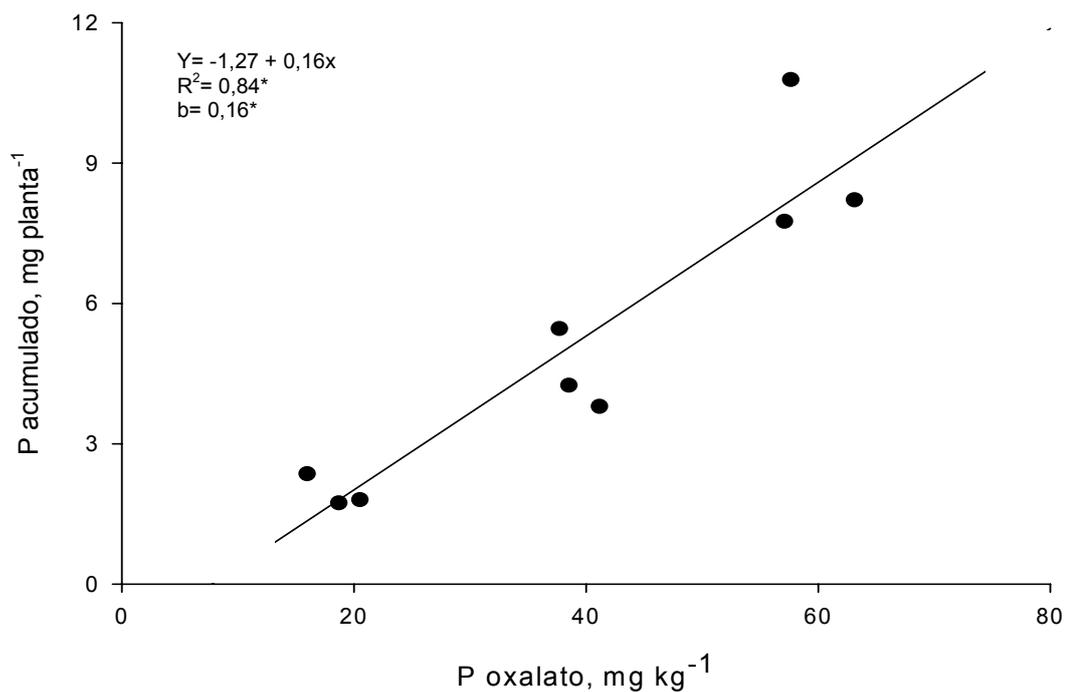
APÊNDICE 14. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo Olsen e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Luvissoilo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg P kg⁻¹



APÊNDICE 15. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo P oxalato e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Planossolo e Gleissolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg P kg⁻¹



APÊNDICE 16. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelo P oxalato e as quantidades de fósforo acumulado pelo arroz nas amostras dos solos: Luvisolo; Vertissolo e Chernossolo, submetidas às doses de fósforo: 0; 19,65 e 39,30 mg P kg⁻¹



APÊNDICE 17. Valores médios de Eh na solução em diferentes períodos de alagamento em função dos solos utilizados

Solos	Períodos de alagamento	
	14	28
	----- mV -----	
Planossolo – SGe 3	177	162
Planossolo – SGe 1	177	165
Luvissole	220	161
Vertissolo	247	184
Chernossolo	259	178

APÊNDICE 18. Valores de pH na solução do solo no primeiro dia de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo SGe 3	4,88	4,95	4,89
Planossolo SGe 1	5,06	5,04	5,03
Luvissole	5,00	5,04	4,93
Vertissolo	4,78	4,74	4,76
Chernossolo	4,62	4,64	4,68

APÊNDICE 19. Valores de pH na solução do solo aos 7 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo SGe 3	5,31	5,18	5,09
Planossolo SGe 1	5,36	5,22	5,15
Luvissole	5,28	5,08	4,97
Vertissolo	4,99	4,87	4,79
Chernossolo	4,86	4,83	4,76

APÊNDICE 20. Valores de pH na solução do solo aos 14 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
	----- mg L ⁻¹ -----		
Planossolo – SGe 3	5,66	5,48	5,32
Planossolo – SGe 1	5,63	5,45	5,34
Luvissolo	5,55	5,25	5,07
Vertissolo	5,23	5,04	4,85
Chernossolo	5,04	4,93	4,79

APÊNDICE 21. Valores de pH na solução do solo aos 21 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
	----- mg L ⁻¹ -----		
Planossolo – SGe 3	6,28	6,08	5,80
Planossolo – SGe 1	6,17	5,99	5,75
Luvissolo	5,93	5,60	5,35
Vertissolo	5,53	5,25	5,01
Chernossolo	5,29	5,20	5,05

APÊNDICE 22. Valores de pH na solução do solo aos 28 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
	----- mg L ⁻¹ -----		
Planossolo – SGe 3	6,31	6,13	5,94
Planossolo – SGe 1	6,16	6,01	5,76
Luvissolo	6,26	5,96	5,74
Vertissolo	5,88	5,52	5,22
Chernossolo	5,76	5,53	5,35

APÊNDICE 23. Valores de pH na solução do solo aos 35 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	6,29	6,10	5,95
Planossolo - SGe 1	6,17	5,98	5,72
Luvissolo	6,27	6,06	5,78
Vertissolo	6,06	5,70	5,49
Chernossolo	6,13	5,88	5,63

APÊNDICE 24. Concentração de manganês na solução do solo no primeiro dia de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	0,80	0,88	0,74
Planossolo - SGe 1	0,76	0,84	0,63
Luvissolo	1,94	1,85	1,97
Vertissolo	2,56	2,45	2,12
Chernossolo	3,11	2,32	2,26

APÊNDICE 25. Concentração de manganês na solução do solo aos 7 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	2,80	2,63	2,59
Planossolo - SGe 1	2,24	2,11	1,94
Luvissolo	3,63	3,20	3,89
Vertissolo	5,80	4,72	3,03
Chernossolo	7,85	5,76	4,60

APÊNDICE 26. Concentração de manganês na solução do solo aos 14 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	2,40	2,17	1,87
Planossolo- SGe 1	2,20	1,80	1,63
Luvissolo	6,54	5,90	5,37
Vertissolo	7,47	6,30	5,90
Chernossolo	9,87	7,10	5,40

APÊNDICE 27. Concentração de manganês na solução do solo aos 21 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	2,37	2,20	2,20
Planossolo - SGe 1	2,03	1,60	1,60
Luvissolo	9,53	8,90	8,37
Vertissolo	9,80	8,13	7,10
Chernossolo	10,87	9,33	8,17

APÊNDICE 28. Concentração de manganês na solução do solo aos 28 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	2,13	2,04	1,94
Planossolo - SGe 1	2,05	1,73	1,65
Luvissolo	8,86	8,50	7,97
Vertissolo	12,65	11,57	10,42
Chernossolo	12,92	12,08	10,98

APÊNDICE 29. Concentração de manganês na solução do solo aos 35 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	2,15	2,09	2,00
Planossolo - SGe 1	1,98	1,77	1,70
Luvissolo	8,56	8,34	7,40
Vertissolo	13,17	12,14	11,41
Chernossolo	12,60	12,08	11,12

APÊNDICE 30. Concentração de ferro na solução do solo no primeiro dia alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	13,89	13,89	10,07
Planossolo - SGe 1	9,26	8,96	6,50
Luvissolo	2,54	2,11	2,95
Vertissolo	0,80	0,69	0,68
Chernossolo	0,42	0,42	0,41

APÊNDICE 31. Concentração de ferro na solução do solo aos 7 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	41,67	40,27	28,20
Planossolo - SGe 1	27,78	26,00	18,19
Luvissolo	20,00	14,47	13,27
Vertissolo	3,02	2,62	2,42
Chernossolo	1,23	1,19	1,10

APÊNDICE 32. Concentração de ferro na solução do solo aos 14 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	78,17	73,59	70,74
Planossolo - SGe 1	62,98	52,24	46,14
Luvissole	40,06	31,52	28,85
Vertissolo	9,03	7,08	5,07
Chernossolo	6,95	5,17	4,72

APÊNDICE 33. Concentração de ferro na solução do solo aos 21 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	86,55	75,30	72,28
Planossolo - SGe 1	74,27	62,11	57,62
Luvissole	59,65	53,51	46,41
Vertissolo	15,62	12,32	9,03
Chernossolo	20,59	17,68	15,37

APÊNDICE 34. Concentração de ferro na solução do solo aos 28 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	Sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	84,25	68,25	62,10
Planossolo - SGe 1	72,50	63,04	53,81
Luvissole	88,76	75,24	63,80
Vertissolo	29,07	24,98	18,34
Chernossolo	38,08	32,48	28,89

APÊNDICE 35. Concentração de ferro na solução do solo aos 35 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	78,24	65,50	55,52
Planossolo - SGe 1	67,70	57,93	52,48
Luvissole	87,10	74,55	62,38
Vertissolo	48,02	40,63	29,35
Chernossolo	59,44	50,03	37,13

APÊNDICE 36. Concentração de cálcio na solução do solo no primeiro dia alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	21,92	20,20	42,53
Planossolo - SGe 1	18,27	16,03	34,07
Luvissole	21,10	19,49	36,07
Vertissolo	17,75	17,66	32,77
Chernossolo	16,78	15,85	30,50

APÊNDICE 37. Concentração de cálcio na solução do solo aos 7 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	26,10	23,30	47,10
Planossolo - SGe 1	21,77	17,30	37,40
Luvissole	21,10	19,60	35,90
Vertissolo	18,40	17,00	34,30
Chernossolo	13,40	22,55	38,60

APÊNDICE 38. Concentração de cálcio na solução do solo aos 14 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	29,23	25,17	44,27
Planossolo - SGe 1	24,17	19,67	37,77
Luvissolo	27,13	24,03	42,43
Vertissolo	25,80	22,00	38,97
Chernossolo	22,93	18,93	35,33

APÊNDICE 39. Concentração de cálcio na solução do solo aos 21 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	37,47	32,80	56,77
Planossolo - SGe 1	28,83	24,30	44,63
Luvissolo	32,10	27,13	46,73
Vertissolo	28,10	23,87	40,90
Chernossolo	24,90	20,37	38,60

APÊNDICE 40. Concentração de cálcio na solução do solo aos 28 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	35,87	32,00	54,30
Planossolo - SGe 1	27,70	23,70	42,77
Luvissolo	36,37	29,93	56,30
Vertissolo	30,27	27,00	44,57
Chernossolo	27,59	24,47	41,23

APÊNDICE 41. Concentração de cálcio na solução do solo aos 35 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	35,00	29,53	55,30
Planossolo - SGe 1	26,93	21,87	42,30
Luvisso	34,77	28,10	57,00
Vertissolo	34,57	31,00	51,03
Chernossolo	30,80	25,03	44,63

APÊNDICE 42. Concentração de fósforo na solução do solo no primeiro dia alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	0,08	0,08	0,18
Planossolo - SGe 1	0,12	0,11	0,25
Luvisso	0,02	0,03	0,10
Vertissolo	0,02	0,02	0,08
Chernossolo	0,02	0,02	0,06

APÊNDICE 43. Concentração de fósforo na solução do solo aos 7 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	0,09	0,07	0,20
Planossolo - SGe 1	0,12	0,10	0,29
Luvisso	0,04	0,03	0,10
Vertissolo	0,02	0,02	0,09
Chernossolo	0,02	0,02	0,05

APÊNDICE 44. Concentração de fósforo na solução do solo aos 14 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	0,15	0,13	0,35
Planossolo - SGe 1	0,22	0,20	0,57
Luvisso	0,08	0,06	0,22
Vertissolo	0,04	0,03	0,16
Chernossolo	0,04	0,03	0,14

APÊNDICE 45. Concentração de fósforo na solução do solo aos 21 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	0,20	0,16	0,42
Planossolo - SGe 1	0,24	0,19	0,71
Luvisso	0,11	0,09	0,33
Vertissolo	0,06	0,04	0,22
Chernossolo	0,07	0,05	0,25

APÊNDICE 46. Concentração de fósforo na solução do solo aos 28 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	0,16	0,10	0,41
Planossolo - SGe 1	0,23	0,17	0,61
Luvisso	0,15	0,11	0,36
Vertissolo	0,07	0,05	0,28
Chernossolo	0,08	0,06	0,32

APÊNDICE 47. Concentração de fósforo na solução do solo aos 35 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	Com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	0,13	0,09	0,38
Planossolo - SGe 1	0,20	0,15	0,58
Luvissolo	0,13	0,09	0,37
Vertissolo	0,10	0,06	0,32
Chernossolo	0,11	0,08	0,35

APÊNDICE 48. Concentração de magnésio na solução do solo no primeiro dia de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	9,68	8,79	8,23
Planossolo - SGe 1	8,79	5,60	5,96
Luvissolo	5,57	4,67	4,70
Vertissolo	9,63	8,66	8,80
Chernossolo	7,62	7,12	7,17

APÊNDICE 49. Concentração de magnésio na solução do solo aos 7 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	11,22	8,90	8,66
Planossolo - SGe 1	9,43	6,85	6,28
Luvissolo	6,84	5,85	5,62
Vertissolo	11,89	10,29	9,96
Chernossolo	8,67	8,20	8,06

APÊNDICE 50. Concentração de magnésio na solução do solo aos 14 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	13,63	10,50	9,88
Planossolo - SGe 1	12,10	9,80	8,25
Luvissole	8,02	6,50	6,13
Vertissolo	13,30	12,20	11,78
Chernossolo	11,18	10,00	9,13

APÊNDICE 51. Concentração de magnésio na solução do solo aos 21 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	16,25	13,62	11,90
Planossolo - SGe 1	14,77	11,16	8,62
Luvissole	9,57	7,91	7,00
Vertissolo	15,21	13,79	13,21
Chernossolo	12,50	11,80	11,00

APÊNDICE 52. Concentração de magnésio na solução do solo aos 28 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	16,00	11,40	10,00
Planossolo - SGe 1	13,63	9,50	7,25
Luvissole	12,03	10,25	9,26
Vertissolo	16,20	15,10	14,78
Chernossolo	14,00	13,20	12,61

APÊNDICE 53. Concentração de magnésio na solução do solo aos 35 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	14,10	11,20	10,20
Planossolo - SGe 1	13,50	10,18	7,39
Luvissole	11,63	9,93	9,15
Vertissolo	18,30	17,28	16,34
Chernossolo	15,80	14,20	13,55

APÊNDICE 54. Concentração de potássio na solução do solo no primeiro dia de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	1,20	1,20	1,00
Planossolo - SGe 1	2,45	1,94	1,35
Luvissole	2,67	1,82	1,72
Vertissolo	4,00	3,42	3,25
Chernossolo	4,64	3,62	2,96

APÊNDICE 55. Concentração de potássio na solução do solo aos 7 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	1,57	1,13	0,95
Planossolo - SGe 1	2,78	1,94	1,64
Luvissole	2,67	2,05	1,72
Vertissolo	4,44	3,63	3,25
Chernossolo	4,64	3,80	2,96

APÊNDICE 56. Concentração de potássio na solução do solo aos 14 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	2,90	2,19	1,81
Planossolo - SGe 1	4,47	3,19	2,62
Luvisso	3,90	2,81	2,52
Vertissolo	5,73	4,40	3,76
Chernossolo	6,00	4,61	4,09

APÊNDICE 57. Concentração de potássio na solução do solo aos 21 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	3,24	2,48	2,21
Planossolo- SGe 1	4,65	3,62	2,75
Luvisso	4,11	3,13	2,70
Vertissolo	6,00	5,05	4,72
Chernossolo	6,21	5,02	4,65

APÊNDICE 58. Concentração de potássio na solução do solo aos 28 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/	com planta/
		sem SFT	com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	3,63	2,91	2,42
Planossolo - SGe 1	4,84	3,90	3,00
Luvisso	4,35	3,27	2,83
Vertissolo	6,35	5,67	5,20
Chernossolo	6,64	5,16	4,84

APÊNDICE 59. Concentração de potássio na solução do solo aos 35 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	3,98	3,05	2,67
Planossolo - SGe 1	5,03	3,93	3,09
Luvisolo	4,57	3,43	3,00
Vertissolo	6,69	5,81	5,29
Chernossolo	6,98	5,20	4,78

APÊNDICE 60. Concentração de carbono orgânico dissolvido (COD) na solução do solo aos 14 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	29,66	32,20	51,57
Luvisolo	25,05	35,50	40,60
Vertissolo	26,80	33,19	38,11
Chernossolo	22,10	27,29	32,10

APÊNDICE 61. Concentração de carbono orgânico dissolvido (COD) na solução do solo aos 28 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	36,38	77,36	91,62
Luvisolo	26,55	39,47	44,95
Vertissolo	27,91	35,50	45,17
Chernossolo	25,02	32,06	36,53

APÊNDICE 62. Concentração de sulfato na solução do solo aos 14 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	0,90	0,90	1,05
Luvissole	0,80	0,80	0,75
Vertissolo	1,70	1,70	1,85
Chernossolo	1,54	1,54	1,63

APÊNDICE 63. Concentração de sulfato na solução do solo aos 28 dias de alagamento em função dos tratamentos utilizados

Solos	sem planta	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
		----- mg L ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	0,75	0,80	1,05
Luvissole	0,70	0,74	0,77
Vertissolo	1,65	1,65	1,78
Chernossolo	1,46	1,46	1,60

APÊNDICE 64. Concentração relativas das espécies de fósforo, enxofre, cálcio, carbono orgânico dissolvido, ferro, potássio, magnésio e manganês na solução do Planossolo SGe 3 aos 14 dias de alagamento

Espécies	sem plantas	com plantas/sem SFT	com plantas/com SFT
	----- % -----		
H ₂ PO ₄	59,42	61,85	64,64
HPO ₄	2,19	1,70	1,09
FeH ₂ PO ₄	30,31	30,35	29,69
FeHPO ₄	6,44	4,92	2,88
MgHPO ₄	0,41	0,25	0,15
CaH ₂ PO ₄	0,70	0,57	1,17
CaHPO ₄	0,38	0,24	0,30
MnHPO ₄	0,13	0,10	0,05
SO ₄	75,30	77,15	74,69
HSO ₄	0,01	0,02	0,03
FeSO ₄	13,69	13,78	12,17
MnSO ₄	0,31	0,30	0,24
Mg SO ₄	4,054	3,31	2,86
CaSO ₄	6,605	5,42	10,01
KSO ₄	0,029	0,02	0,02
Ca	96,79	88,35	88,81
CaCOD	3,13	11,57	11,10
CaSO ₄	0,08	0,08	0,09
COD	62,12	63,69	58,50
HCOD	1,60	2,48	2,57
CaCOD	33,68	31,42	37,59
MgCOD	2,60	2,41	1,35
Fe	99,85	99,85	99,79
FeOH	0,01	0,01	-
FeSO ₄	0,09	0,10	0,11
FeH ₂ PO ₄	0,03	0,03	0,09
K	100	100	100
Mg	99,61	98,63	98,69
MgCOD	0,32	1,29	1,23
MgSO ₄	0,07	0,07	0,08
Mn	99,93	99,92	99,92
MnSO ₄	0,07	0,07	0,08

APÊNDICE 65. Concentração relativas das espécies de fósforo, enxofre, cálcio, carbono orgânico dissolvido, ferro, potássio, magnésio e manganês na solução do Luvissole aos 14 dias de alagamento

Espécies	sem plantas	com plantas/sem SFT	com plantas/com SFT
	----- % -----		
H ₂ PO ₄	72,79	78,69	80,60
HPO ₄	1,99	1,06	0,73
FeH ₂ PO ₄	20,12	17,55	16,00
FeHPO ₄	3,37	1,48	0,89
MgHPO ₄	0,24	0,10	0,07
CaH ₂ PO ₄	0,77	0,71	1,32
CaHPO ₄	0,33	0,15	0,19
MnHPO ₄	0,34	0,19	0,11
SO ₄	80,91	83,39	80,58
HSO ₄	0,02	0,04	0,06
FeSO ₄	8,43	7,19	6,01
MnSO ₄	0,94	0,99	0,83
Mg SO ₄	2,85	2,30	2,15
CaSO ₄	6,76	6,06	10,36
KSO ₄	0,04	0,03	0,03
Ca	90,94	86,45	89,92
CaCOD	8,98	13,46	10,00
CaSO ₄	0,08	0,09	0,08
COD	62,20	62,64	58,05
HCOD	2,22	4,74	4,68
CaCOD	33,79	31,14	36,32
MgCOD	1,79	1,49	0,95
Fe	99,77	99,87	99,83
FeOH	0,01	-	-
FeSO ₄	0,10	0,11	0,09
FeH ₂ PO ₄	0,03	0,02	0,07
K	100	100	100
Mg	98,51	98,39	98,83
MgCOD	0,98	1,53	1,10
MgSO ₄	0,07	0,08	0,70
Mn	99,92	99,92	99,93
MnSO ₄	0,07	0,08	0,07

APÊNDICE 66. Concentração relativas das espécies de fósforo, enxofre, cálcio, carbono orgânico dissolvido, ferro, potássio, magnésio e manganês na solução do Vertissolo aos 14 dias de alagamento

Espécies	sem plantas	com plantas/sem SFT	com plantas/com SFT
	----- % -----		
H ₂ PO ₄	90,84	92,94	94,12
HPO ₄	1,16	0,76	0,51
FeH ₂ PO ₄	5,82	4,72	3,34
FeHPO ₄	0,47	0,25	0,11
MgHPO ₄	0,33	0,21	0,10
CaH ₂ PO ₄	0,93	0,85	1,42
CaHPO ₄	0,19	0,11	0,12
MnHPO ₄	0,26	0,15	0,09
SO ₄	84,94	86,05	83,28
HSO ₄	0,04	0,07	0,10
FeSO ₄	2,11	1,72	1,13
MnSO ₄	1,29	1,13	0,97
Mg SO ₄	4,46	4,96	4,42
CaSO ₄	7,08	6,03	10,06
KSO ₄	0,07	0,56	0,04
Ca	89,90	86,75	88,77
CaCOD	9,9	13,05	11,03
CaSO ₄	0,20	0,19	0,20
COD	61,25	61,74	57,52
HCOD	4,42	7,24	7,58
CaCOD	31,80	28,11	33,07
MgCOD	2,52	2,91	1,83
Fe	99,74	99,74	99,69
FeSO ₄	0,24	0,24	0,24
FeH ₂ PO ₄	0,02	0,01	0,06
K	100	100	100
Mg	98,74	98,35	98,60
MgCOD	1,09	1,48	1,23
MgSO ₄	0,18	0,18	0,18
Mn	99,82	99,83	99,83
MnSO ₄	0,18	0,11	0,17

APÊNDICE 67. Concentração relativas das espécies de fósforo, enxofre, cálcio, carbono orgânico dissolvido, ferro, potássio, magnésio e manganês na solução do Chernossolo aos 14 dias de alagamento

Espécies	sem plantas	com plantas/sem SFT	com plantas/com SFT
	----- % -----		
H ₂ PO ₄	92,88	94,50	94,43
HPO ₄	0,77	0,60	0,44
FeH ₂ PO ₄	4,62	3,56	3,15
FeHPO ₄	0,24	0,15	0,09
MgHPO ₄	0,14	0,10	0,06
CaH ₂ PO ₄	0,87	0,72	1,42
CaHPO ₄	0,12	0,08	0,11
MnHPO ₄	0,23	0,14	0,07
SO ₄	85,44	87,40	84,06
HSO ₄	0,06	0,09	0,11
FeSO ₄	1,66	1,31	1,08
MnSO ₄	1,73	1,32	0,91
Mg SO ₄	4,50	4,26	3,54
CaSO ₄	6,53	5,56	10,24
KSO ₄	0,07	0,06	0,05
Ca	91,87	89,00	91,70
CaCOD	8,13	10,81	8,11
CaSO ₄	-	0,18	0,19
COD	61,26	61,86	57,22
HCOD	6,90	9,57	8,58
CaCOD	29,30	26,06	32,77
MgCOD	2,54	2,52	1,43
Fe	99,98	99,76	99,72
FeSO ₄	-	0,22	0,22
FeH ₂ PO ₄	0,02	0,01	0,06
K	100	100	100
Mg	99,12	98,64	98,96
MgCOD	0,88	1,20	0,88
MgSO ₄	-	0,16	0,16
Mn	100	99,84	99,84
MnSO ₄	-	0,16	0,16

APÊNDICE 68. Concentração relativas das espécies de fósforo, enxofre, cálcio, carbono orgânico dissolvido, ferro, potássio, magnésio e manganês na solução do Planossolo SGe 3 aos 28 dias de alagamento

Espécies	sem plantas	com plantas/sem SFT	com plantas/ com SFT
	----- % -----		
H ₂ PO ₄	43,32	52,67	59,14
HPO ₄	7,19	5,62	4,13
FeH ₂ PO ₄	23,47	23,98	24,04
FeHPO ₄	22,18	15,11	9,74
MgHPO ₄	1,52	0,89	0,56
CaH ₂ PO ₄	0,56	0,54	1,06
CaHPO ₄	1,36	0,87	1,11
MnHPO ₄	0,38	0,31	0,21
SO ₄	74,07	77,33	75,62
FeSO ₄	14,10	12,82	11,00
MnSO ₄	0,26	0,28	0,25
Mg SO ₄	4,51	3,54	2,95
CaSO ₄	7,02	6,00	10,15
KSO ₄	0,04	0,03	0,04
Ca	89,71	76,58	80,94
CaCOD	10,22	23,36	18,98
CaSO ₄	0,07	0,06	0,08
COD	61,81	63,31	58,85
HCOD	0,34	0,62	0,64
CaCOD	35,01	33,58	39,08
MgCOD	2,84	2,50	1,43
Fe	99,81	99,84	99,73
FeOH	0,06	0,04	0,03
FeSO ₄	0,08	0,09	0,11
FeH ₂ PO ₄	0,03	0,02	0,09
FeHPO ₄	0,03	0,01	0,04
K	100	100	100
Mg	98,81	96,98	97,63
MgCOD	1,13	2,96	2,29
MgSO ₄	0,06	0,06	0,08
Mn	99,92	99,92	99,89
MnSO ₄	0,06	0,06	0,08
MnHPO ₄	0,02	0,02	0,03

APÊNDICE 69. Concentração relativas das espécies de fósforo, enxofre, cálcio, carbono orgânico dissolvido, ferro, potássio, magnésio e manganês na solução do Luvissole aos 28 dias de alagamento

Espécies	sem plantas	com plantas/sem SFT	com plantas/ com SFT
	----- % -----		
H ₂ PO ₄	43,59	54,72	61,15
HPO ₄	6,46	3,99	2,56
FeH ₂ PO ₄	24,79	27,10	27,01
FeHPO ₄	20,85	11,51	6,41
MgHPO ₄	1,02	0,56	0,34
CaH ₂ PO ₄	0,59	0,59	1,25
CaHPO ₄	1,27	0,64	0,76
MnHPO ₄	1,42	0,88	0,50
SO ₄	73,65	76,09	73,71
HSO ₄	-	-	0,01
FeSO ₄	14,65	13,54	11,40
MnSO ₄	1,08	1,13	0,97
MgSO ₄	3,36	3,10	2,86
CaSO ₄	7,23	6,11	11,02
KSO ₄	0,04	0,03	0,03
Ca	92,41	87,09	9,13
CaCOD	7,53	12,84	0,07
CaSO ₄	0,06	0,06	0,07
COD	61,70	63,12	57,99
HCOD	0,38	0,89	0,98
CaCOD	35,83	33,83	39,73
MgCOD	2,10	2,16	1,30
Fe	99,83	99,86	99,80
FeOH	0,06	0,03	0,02
FeSO ₄	0,07	0,08	0,08
FeH ₂ PO ₄	0,03	0,02	0,09
FeHPO ₄	0,02	-	0,02
K	100	100	100
Mg	99,14	98,49	98,94
MgCOD	0,81	1,45	1,00
MgSO ₄	0,05	0,06	0,06
Mn	99,93	99,94	99,93
MnSO ₄	0,05	0,06	0,06
MnHPO ₄	0,01	-	0,01

APÊNDICE 70. Concentração relativas das espécies de fósforo, enxofre, cálcio, carbono orgânico dissolvido, ferro, potássio, magnésio e manganês na solução do Vertissolo aos 28 dias de alagamento

Espécies	sem plantas	com plantas/sem SFT	
		com plantas/	com SFT
----- % -----			
H ₂ PO ₄	72,33	79,85	85,19
HPO ₄	4,30	2,05	1,11
FeH ₂ PO ₄	14,18	13,65	10,51
FeHPO ₄	5,04	2,13	0,82
MgHPO ₄	1,01	0,46	0,29
CaH ₂ PO ₄	0,84	0,81	1,40
CaHPO ₄	0,77	0,33	0,29
MnHPO ₄	1,49	0,67	0,32
SO ₄	79,77	81,20	79,49
HSO ₄	-	0,02	0,04
FeSO ₄	5,76	5,19	3,61
MnSO ₄	1,85	1,77	1,51
MgSO ₄	5,42	5,28	4,91
CaSO ₄	7,13	6,47	10,39
KSO ₄	0,07	0,06	0,05
Ca	91,16	88,47	90,84
CaCOD	8,68	11,36	8,98
CaSO ₄	0,16	0,17	0,18
COD	61,72	62,23	58,10
HCOD	0,97	2,37	3,25
CaCOD	34,05	32,11	36,48
MgCOD	3,26	3,30	2,17
Fe	99,76	99,76	99,69
FeOH	0,03	0,01	-
FeSO ₄	0,19	0,21	0,21
FeH ₂ PO ₄	0,02	0,02	0,09
K	100	100	100
Mg	98,92	98,58	98,87
MgCOD	0,94	1,27	0,98
MgSO ₄	0,14	0,15	0,15
Mn	99,86	99,85	99,85
MnSO ₄	0,14	0,15	0,15

APÊNDICE 71. Concentração relativas das espécies de fósforo, enxofre, cálcio, carbono orgânico dissolvido, ferro, potássio, magnésio e manganês na solução do Chernossolo aos 28 dias de alagamento

Espécies	sem plantas	com plantas/sem SFT	
		com plantas/	com SFT
----- % -----			
H ₂ PO ₄	70,69	76,24	79,30
HPO ₄	3,19	2,00	1,40
FeH ₂ PO ₄	18,14	16,95	15,39
FeHPO ₄	4,89	2,70	1,61
MgHPO ₄	0,65	0,39	0,25
CaH ₂ PO ₄	0,75	0,70	1,24
CaHPO ₄	0,52	0,29	0,33
MnHPO ₄	1,13	0,68	0,42
SO ₄	79,40	80,95	79,06
HSO ₄	0,01	0,02	0,03
FeSO ₄	7,50	6,73	5,63
MnSO ₄	1,88	1,84	1,58
MgSO ₄	4,65	4,60	4,15
CaSO ₄	6,49	5,81	9,50
KSO ₄	0,07	0,06	0,05
Ca	91,25	88,06	90,58
CaCOD	8,62	11,80	9,27
CaSO ₄	0,13	0,14	0,15
COD	62,47	63,14	59,05
HCOD	1,37	2,50	2,61
CaCOD	33,17	31,25	36,34
MgCOD	3,00	3,11	2,00
Fe	99,81	99,80	99,70
FeOH	0,02	0,01	-
FeSO ₄	0,16	0,17	0,18
FeH ₂ PO ₄	0,01	0,02	0,10
FeHPO ₄	-	-	0,01
K	100	100	100
Mg	98,95	98,55	98,85
MgCOD	0,94	1,32	1,01
MgSO ₄	0,11	0,13	0,13
Mn	99,89	99,87	99,86
MnSO ₄	0,11	0,12	0,13

APÊNDICE 72. Teores de fósforo orgânico obtidos pelo extrator NaOH 0,1 mol L⁻¹ em função dos tratamentos utilizados

Solos	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
	----- mg kg ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	32,20	34,55
Luvissole	33,44	36,90
Vertissolo	45,55	43,20
Chernossolo	40,20	41,55

APÊNDICE 73. Teores de fósforo orgânico obtidos pelo extrator NaOH 0,5 mol L⁻¹ em função dos tratamentos utilizados

Solos	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
	----- mg kg ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	5,25	7,40
Luvissole	5,35	7,10
Vertissolo	7,55	9,25
Chernossolo	7,10	8,30

APÊNDICE 74. Teores de fósforo inorgânico obtidos pelo extrator HCl 1 mol L⁻¹ em função dos tratamentos utilizados

Solos	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
	----- mg kg ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	5,05	7,30
Luvissole	4,90	7,60
Vertissolo	8,95	11,55
Chernossolo	8,30	10,45

APÊNDICE 75. Teores de fósforo residual obtido em função dos tratamentos utilizados

Solos	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
	----- mg kg ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	81,25	84,10
Luvissole	88,05	89,02
Vertissolo	105,75	108,10
Chernossolo	97,30	95,10

APÊNDICE 76. Fósforo extraído pelo Mehlich-1 em função dos tratamentos utilizados

Solos	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
	----- mg kg ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	3,02	11,55
Luvissole	2,75	11,30
Vertissolo	2,56	9,48
Chernossolo	2,90	7,24

APÊNDICE 77. Fósforo extraído pela Resina em função dos tratamentos utilizados

Solos	com planta/ sem SFT	com planta/ com SFT
	----- mg kg ⁻¹ -----	
Planossolo - SGe 3	1,75	6,44
Luvissole	1,83	6,22
Vertissolo	1,65	5,45
Chernossolo	1,58	5,36

12. ANEXOS

ANEXO 1. Determinação de fósforo em extratos ácidos do solo (Murphy & Riley, 1962)

Soluções:

Solução A: dissolver 15,35 g de $(\text{NH}_4)\text{MO}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ com 200 mL de água destilada em becker de 500 mL. Dissolver 0,3511 g de $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{O}_6\cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ com 100 mL de água destilada em becker de 200 mL. Colocar 300 mL de água destilada em becker de 1000 mL e adicionar lentamente 178 mL de ácido sulfúrico concentrado. Após esfriar, transferir para balão volumétrico de 1000 mL, adicionar as soluções de molibdato de amônio e antimoniato de potássio e ajustar o volume com água destilada.

Solução B: dissolver 1,356 g $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (ácido ascórbico) com 100 mL de solução A em balão volumétrico. Esta solução deve ser preparada no momento de uso.

$\text{NaOH } 10 \text{ mol L}^{-1}$: dissolver 400 g de NaOH em 600 mL de água destilada em becker de 1000 mL. Após esfriar, transferir para balão volumétrico 1000 mL e ajustar o volume com água destilada. Armazenar em frasco plástico.

p-nitrofenol 0,25%: pesar 0,25 g de p-nitrofenol e dissolver em 100 mL de água destilada em balão volumétrico. Armazenar em geladeira em frasco escuro.

Procedimento de análise:

- a) pipetar uma alíquota do extrato para copo de cafezinho;
- b) adicionar água destilada para atingir volume de 8 mL;
- c) adicionar uma gota de p-nitrofenol 0,25%;
- d) neutralizar a solução com $\text{NaOH } 10 \text{ mol L}^{-1}$;
- e) adicionar 1 mL de solução B;
- f) ler a abasorbância em 882 nm após 30 minutos.

ANEXO 2. Determinação de fósforo inorgânicos em extratos alcalinos do solo (Dick & Tabatabai, 1977)

Soluções:

Solução A: dissolver 8,80 g de $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (ácido ascórbico) e 41 g de ácido tricloroacético com 400 mL de água destilada em becker de 500 mL. Transferir para balão volumétrico de 500 mL e ajustar o volume com água destilada. Esta solução deve ser preparada no momento de uso.

Solução B: dissolver 6,20 g de $(\text{NH}_4)\text{MO}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ com 400 mL de água destilada em becker de 500 mL. Transferir para balão volumétrico de 500 mL e ajustar o volume com água destilada.

Solução C: dissolver 29,40 g de citrato de sódio e 26 g de arsenito de sódio com 800 mL de água destilada em becker de 1000 mL. Adicionar 50 mL de ácido acético glacial (99%). Transferir para balão volumétrico de 1000 mL e ajustar o volume com água destilada.

Procedimento de análise:

- a) adicionar 10 mL de solução A em copo de cafezinho;
- b) adicionar uma alíquota de 5 mL do extrato alcalino;
- c) adicionar 2 mL de solução B;
- d) adicionar 5 mL de solução C;
- e) completar o volume até 25 mL;
- f) ler a absorbância no colorímetro em 700 nm após 15 minutos

ANEXO 3. Fósforo disponível por Mehlich-1

Solução extratora: Adicionar 8,10 mL de HCl concentrado e 1,40 mL de H₂SO₄ concentrado em becker de 1000 mL contendo 800 ml de água destilada. Transferir para balão volumétrico de 2000 mL e completar o volume.

Procedimento de análise:

- a) Pesar 3 g de solo para tubo de centrífuga;
- b) Adicionar 30 mL de solução extratora;
- c) Agitar por 5 minutos em agitador horizontal;
- d) Deixar em repouso por 16 horas;
- e) Centrifugar à 2500 rpm por 4 minutos;
- f) Determinar fósforo conforme Anexo 1.

ANEXO 4. Fósforo disponível por Mehlich-3 (adaptado de Mehlich, 1984)

Solução extratora: (CH₃COOH 0,2 mol L⁻¹; NH₄NO₃ 0,25 mol L⁻¹; NH₄F 0,015 mol L⁻¹; HNO₃ 0,013 mol L⁻¹; EDTA 0,001 mol L⁻¹): Em um becker de 2000 ml, adicionar 1000 mL de água destilada, 24,1 mL de CH₃COOH, 40,02 g de NH₄NO₃, 1,11 g e NH₄F, 2,37 mL de HNO₃ e 0,58 g de EDTA. Passar para um balão de 2000 mL e completar o volume.

- a) Pesar 3 g de solo para tubo de centrífuga;
- b) Adicionar 30 mL de solução extratora;
- c) Agitar por 5 minutos em agitador horizontal;
- d) Deixar em repouso por 16 horas;
- e) Centrifugar à 2500 rpm por 4 minutos;
- f) Determinar fósforo conforme Anexo 1.

ANEXO 5. Fósforo disponível pela Resina

Procedimento de análise:

- a) Pesar 2,5 gramas de solo em frasco snap-cap de 50 mL;
- b) Adicionar 40 mL de água destilada;
- c) Adicionar 1 lâmina de RTA saturada com NaHCO₃, de acordo com Tedesco (1995);
- d) Agitar por 16 horas no end-over-end;
- e) Retirar a Resina do tubo com auxílio de uma pinça;
- f) Lavar o excesso de solo da Resina com água através da pisceta;

- g) Colocar a Resina em frasco snap-cap de 50 mL, contendo 40 mL de HCl 0,5 mol L⁻¹;
- h) Deixar em repouso por 90 minutos (com a tampa aberta);
- i) Agitar por 30 minutos em agitador horizontal;
- j) Retirar a RTA com auxílio de pinça;
- k) Pipetar 3 mL do extrato de eluição, em copo plástico;
- l) Adicionar 3 mL do molibdato de amônio;
- m) Adicionar 3 gotas da solução P-C;
- n) Determinar a absorvância em 660 nm, após 15 minutos.

ANEXO 6. Fósforo por Olsen (adaptado de Tran et al., 1990).

Solução extratora: NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ a pH 8,5: pesar 42 g de NaHCO₃ e diluir a 1 L com água destilada. Medir o pH e ajusta-lo com NaOH ou HCl. Preparar no dia de uso e manter frasco fechado (para evitar CO₂).

Procedimento de análise:

- a) Pesar 1 g de solo para tubo de centrifuga;
- b) Adicionar 20 mL de solução extratora;
- c) Agitar por 30 minutos em agitador horizontal;
- d) Deixar em repouso por 16 horas;
- e) Centrifugar a 5000 rpm por 5 minutos;
- f) Determinar fósforo conforme Anexo 2..

ANEXO 7. Fósforo disponível por oxalato de amônio (adaptado de Shahandeh et al., 1994)

Solução extratora: (NH₄)₂C₂O₄.H₂O 0,2 mol L⁻¹ + H₂C₂O₄ 0,2 mol L⁻¹

Procedimento de análise:

- a) Pesar 0,50 g de solo para tubo de centrifuga envolvido com papel alumínio com tampa;
- b) Adicionar 20 mL da solução extratora;
- c) Agitar por 4 horas em agitador end-over-end;
- d) Centrifugar a 2500 rpm durante 5 minutos;
- e) Incinerar o extrato (sobrenadante) na mufla a 500°C durante 1 h;
- f) Dissolver as cinzas com HCl 1 mol L⁻¹;
- g) Determinar fósforo conforme Anexo 01

ANEXO 8. Fracionamento do fósforo do solo (Hedley et al., 1982 com modificações de Condon et al., 1985)

Soluções utilizadas:

NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹: Pesar 42 g de NaHCO₃ para becker de 1000 mL e adicionar 900 mL de água destilada. Ajustar o pH a 8,5 com o uso de NaOH ou HCl. Transferir para balão de 1000 mL e completar o volume. Preparar a solução imediatamente antes do uso.

NaCl 0,5 mol L⁻¹: Pesar 29,25 g de NaCl para becker de 1000 mL e adicionar 900 ml de água destilada. Transferir para balão de 1000 mL e completar o volume.

NaOH 0,1 mol L⁻¹: Pesar 4 g de NaOH para becker de 1000 mL e adicionar 900 ml de água destilada. Transferir para balão de 1000 mL e completar o volume.

HCl 1 mol L⁻¹: Adicionar 84 mL de HCl concentrado em becker de 1000 mL contendo 700 mL de água destilada. Transferir para balão de 1000 mL e completar o volume.

NaOH 0,5 mol L⁻¹ : Adicionar 84 ml de HCl concentrado em becker de 1000 mL contendo 700 mL de água destilada. Transferir para balão de 1000 mL e completar o volume.

Procedimento de análise:

Etapa 1: Extração com Resina

- a) Pesar 1,8 gramas de solo para tubo de centrífuga;
- b) Adicionar 30 mL de água destilada;
- c) Adicionar 1 lâmina de RTA saturada com NaHCO₃, de acordo com Tedesco (1995);
- d) Agitar por 16 horas no end-over-end;
- e) Retira a RTA do tubo com auxílio de uma pinça;
- f) Lavar o excesso de solo da Resina com água através de uma pisceta;
- g) Colocar a resina em snap-cap contendo 30 mL de HCl 0,5 mol L⁻¹;
- h) Deixar em repouso por 90 minutos com a tampa aberta;
- i) Agitar por 30 minutos em agitador horizontal;
- j) Retirar a Resina com auxílio de uma pinça;
- k) Determinar fósforo inorgânico no extrato de HCl mol L⁻¹ a partir do passo k conforme o anexo 5.

Etapa 2: Extração com NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹

- a) Adicionar 30 ml de NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹;
- b) Agitar manualmente para soltar o solo do fundo do tubo;
- c) Agitar por 16 horas no end-over-end;
- d) Centrifugar à 6000 rpm por 15 minutos;
- e) Reservar o sobrenadante para análise de fósforo inorgânico conforme Anexo 2 e para análise de fósforo total conforme Anexo 9 e Anexo 1;
- f) Adicionar 30 mL de NaCl 0,5 mol L⁻¹ com cuidado para não mexer o solo;
- g) Centrifugar à 6000 rpm por 5 minutos e adicionar o sobrenadante ao extrato anterior.

Etapa 3: Extração com NaOH 0,1 mol L⁻¹

- a) Adicionar 30 ml de NaOH 0,1 mol L⁻¹;
- b) Agitar manualmente para soltar o solo do fundo do tubo;
- c) Agitar por 16 horas no end-over-end;
- d) Centrifugar à 6000 rpm por 15 minutos;
- e) Reservar o sobrenadante para análise de fósforo inorgânico conforme Anexo 2 e para análise de fósforo total conforme Anexo 10 e Anexo 1;
- f) Adicionar 30 mL de NaCl 0,5 mol L⁻¹ com cuidado para não mexer o solo;

- g) Centrifugar à 6000 rpm por 5 minutos e adicionar o sobrenadante ao extrato anterior.

Etapa 4: Extração com HCl 0,1 mol L⁻¹

- Adicionar 30 mL de HCl 0,1 mol L⁻¹;
- Agitar manualmente para soltar o solo do fundo do tubo;
- Agitar por 16 horas no end-over-end;
- Reservar o sobrenadante para análise de fósforo inorgânico conforme Anexo 1;
- Adicionar 30 ml de NaCl 0,5 mol L⁻¹ com cuidado para não mexer o solo;
- Centrifugar à 6000 rpm por 5 minutos e adicionar o sobrenadante ao extrato anterior.

Etapa 5: Extração com NaOH 0,5 mol L⁻¹

- Adicionar 30 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹;
- Agitar manualmente para soltar o solo do fundo do tubo;
- Agitar por 16 horas no end-over-end;
- Reservar o sobrenadante para análise de fósforo inorgânico conforme Anexo 2 e para análise de fósforo total conforme Anexo 9 e Anexo 1;
- Adicionar 30 mL de NaCl 0,5 mol L⁻¹ com cuidado para não mexer o solo;
- Centrifugar à 6000 rpm por 5 minutos e adicionar o sobrenadante ao extrato anterior.

Etapa 6: Extração do fósforo residual

- Secar o solo em estufa a 50°C e digerir o solo conforme Anexo 10 e Anexo 1.

ANEXO 9. Digestão dos extratos alcalinos do solo (extraídos com NaOH e NaHCO₃) para análise do fósforo total (USEPA, 1971)

Soluções:

H₂SO₄ 1:1: Adicionar, vagorosamente, 500 mL de H₂SO₄ concentrado em 500 ml de água destilada. Esperar esfriar, transferir para balão volumétrico de 1000 ml e completar o volume com água destilada.

Persulfato de amônio 7,5%: Dissolver 75 g de persulfato de amônio em 800 mL de água destilada. Transferir para balão volumétrico de 1000 mL e completar o volume com água destilada.

Procedimento de análise:

- Pipetar uma alíquota de 4 mL do extrato alcalino em tubo de digestão;
- Adicionar 10 ml de persulfato de amônio 7,5%;
- Adicionar 1 mL de H₂SO₄ 1:1;
- Cobrir o tubo com papel alumínio;
- Colocar os tubos em recipiente maior e cobri-lo com papel alumínio;
- Autoclavar a 121° C e 103 kPA por 2 horas;
- Deixar esfriar e completar o volume a 20 mL;
- Determinar fósforo conforme Anexo 1.

ANEXO 10. Digestão do resíduo do solo para análise do fósforo total (Brokes & Powlson, 1982)

Soluções:

Solução $MgCl_2$ saturado: adicionar $MgCl_2$ em água destilada até a saturação da solução.

H_2SO_4 concentrado.

H_2O_2 concentrado.

Procedimento de análise:

- a) pesar 0,10 g de solo em tubo de digestão;
- b) adicionar 1 mL de $MgCl_2$ saturado;
- c) adicionar 1 mL de H_2SO_4 concentrado;
- d) colocar funil de refluxo no tubo de digestão;
- e) aquecer por 1 hora no bloco digestor à $200^\circ C$;
- f) deixar esfriar e adicionar 2 mL de H_2O_2 concentrado;
- g) aquecer por 1 hora no bloco digestor a $100^\circ C$;
- h) deixar esfriar e completar o volume a 50 mL;
- i) determinar conforme Anexo 1.

13. RESUMO BIOGRÁFICO

Gustavo Krüger Gonçalves, filho de Altair Gonçalves e Nara Maria Krüger Gonçalves, nasceu em 24 de junho de 1975, em São Bernardo do Campo (SP). Na cidade de Pelotas (RS) realizou seus estudos de 1º e 2º graus nos Colégios Fernando Treptow, São José, Santa Margarida e Pelotense. Em 1995, ingressou na Faculdade de Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, graduando-se em 2001. De março de 2001 a fevereiro de 2003, realizou o Curso de Mestrado em Ciência do Solo, na área de Química do solo, sob orientação do Professor Rogério Oliveira de Sousa, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Pelotas – UFPel. Em março de 2003, iniciou o curso de Doutorado, no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, na área de Química e Fertilidade do solo, sob orientação do Professor Egon José Meurer.

