

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

**USO DO ÍNDICE P-REMANESCENTE COMO INDICADOR DO PODER
TAMPÃO DE FÓSFORO EM SOLOS**

DOUGLAS ANTONIO ROGERI
(TESE)

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

**USO DO ÍNDICE P-REMANESCENTE COMO INDICADOR DO PODER
TAMPÃO DE FÓSFORO EM SOLOS**

DOUGLAS ANTONIO ROGERI

Engenheiro-Agrônomo (UDESC)

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

Porto Alegre (RS) Brasil

Dezembro de 2013

CIP - Catalogação na Publicação

ANTONIO ROGERI, DOUGLAS
USO DO ÍNDICE P-REMANESCENTE COMO INDICADOR DO
PODER TAMPÃO DE FÓSFORO EM SOLOS / DOUGLAS ANTONIO
ROGERI. -- 2013.
156 f.

Orientador: CLESIO GIANELLO.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,
2013.

1. ADSORÇÃO DE FÓSFORO. 2. TEOR CRÍTICO DE FÓSFORO.
3. MEHLICH-1. 4. MEHLICH-3. 5. ADUBAÇÃO FOSFATADA.
I. GIANELLO, CLESIO, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

DOUGLAS ANTONIO ROGERI
Engenheiro Agrônomo - UFRGS
Mestre em Manejo do Solo - UDESC


DEFESA DE TESE


Submetida como parte dos requisitos
para 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

Aprovado em: 20.12.2013
Pela Banca Examinadora

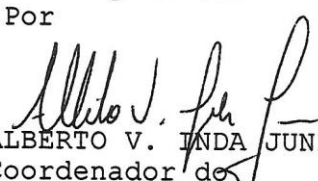

CLÉSIO GIANELLO
Orientador-PPG Ciência do Solo



CARLOS ALBERTO BISSANI
Departamento de Solos/UFRGS


MARINO JOSÉ TEDESCO
Departamento de Solos/UFRGS


MARGARETE NICOLODI

Homologado em: 06.02.2014
Por


ALBERTO V. INDA JUNIOR
Coordenador de
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo


PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade
de Agronomia

“O dilema é: alimentar uma população fértil com solos inférteis em um mundo frágil”.

(Norman Ernest Borlaug – Prêmio Nobel da Paz, 1970)

OFEREÇO aos meus pais, pela
educação e apoio.

Dedico este trabalho à minha querida
nona Oliva Rogeri "*in memoriam*", pelos
exemplos de trabalho e princípios morais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Luiz e Marlene, pelo exemplo de honestidade, trabalho, ética e apoio incondicional à minha formação. Aos meus irmãos Cristiane e Jardel, pela amizade, apoio e incentivo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Prof. Clesio Gianello, pela orientação, apoio, amizade, confiança e por poder desfrutar de sua vasta sabedoria científica e de vida. Ao Prof. Clesio meu grande apreço e gratidão.

Aos professores do Departamento de Solos da UFRGS, pelo convívio e ensinamentos. Em especial ao Prof. Marino Tedesco, pelo auxílio imediato sempre que solicitado.

Ao professor Carlos Alberto Bissani, pela amizade e exemplo profissional. Pela oportunidade de convivência e parceria durante o período que ministramos conjuntamente a disciplina de química do solo. Ao Prof. Bissani meu grande apreço.

Aos bolsistas de iniciação científica Sergio Souza, Talisson Gonzatto e Fernando Berlitz, pela amizade e auxílio nos trabalhos.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao LAS-UFRGS, pelo apoio financeiro.

Aos colegas de curso Patricia Giovanella, Daiana Althaus, Jovana Bavaresco, Filipe Selau, Cassio Boechat, Leonardo Capeleto e Michel Mazzamura, pela amizade e convivência. Em especial ao colega e amigo Magno Amorim, pelo auxílio na coleta de solos e condução dos experimentos.

Aos funcionários do LAS-UFRGS Lisandra, Elisangela, Elio, Taís, Daniel, Bernardete, Valéria, Letícia, Daniela, Tauana, David, Sidinei, Sinval e Stefano, pelo auxílio e amizade.

À nação brasileira, cujos impostos pagos custearam meus estudos.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o meu engrandecimento profissional e pessoal.

USO DO ÍNDICE P-REMANESCENTE COMO INDICADOR DO PODER TAMPÃO DE FÓSFORO EM SOLOS^{1/}

Autor: Douglas Antonio Rogeri

Orientador: Prof. Clesio Gianello

RESUMO

O extrator Mehlich utilizado nos estados do RS e de SC para avaliar a disponibilidade de fósforo às plantas apresenta sensibilidade ao poder tampão do solo. Essa limitação é contornada, em parte, pela separação dos solos em classes de tamponamento, sendo utilizado para este fim o teor de argila. Entretanto, essa medida textural apresenta algumas limitações de ordem técnica e operacional. O objetivo do presente estudo foi avaliar a técnica do P-remanescente comparativamente à argila como índice do poder tampão em solos do estado do RS. A relação entre P-remanescente e argila foi obtida com a seleção de 200 amostras provenientes de diferentes localidades do Estado. Em 20 tipos de solos representativos foram determinados o P-remanescente, os teores de argila pelos métodos da pipeta e do hidrômetro, a capacidade máxima de adsorção de P, o Fe total e o de origem pedogênica, a dose de P_2O_5 necessária para aumentar 1 mg kg^{-1} no solo pelos métodos Mehlich-1 e 3 e o fator capacidade de fósforo. Nestes solos foram conduzidos três cultivos de milho, em que foi determinado o teor de P pelos métodos de Mehlich-1 e 3 na máxima eficiência técnica e as relações entre o P predito pelos métodos e o absorvido pelas plantas. Foram feitas análises de correlação entre P-rem e argila, e estes com atributos de solos relacionados ao poder tampão de P. A relação entre P-rem e argila foi descrita por uma função exponencial decrescente, porém o ajuste foi inadequado para se propor teores críticos para o P-rem. O índice do P-rem foi superior à argila em praticamente todas as relações feitas com os atributos relacionados ao poder tampão dos solos. Em alguns cenários, houve igualdade entre os índices, porém, em nenhum deles o P-remanescente foi inferior à argila. Com isso, ficou evidente que o P-rem é um índice mais fidedigno do poder tampão dos solos do que o teor de argila e que poderia ser usado se há a intenção de se continuar utilizando tanto o Mehlich-1 como o Mehlich-3 para estimar a disponibilidade de P do solo para as plantas nos estados RS e de SC.

^{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. (140 p.) Dezembro, 2013. Trabalho realizado com apoio financeiro da FAURGS e da CAPES.

USE OF REMAINING PHOSPHORUS AS BUFFER PHOSPHORUS INDEX IN SOILS^{1/}

Author: Douglas Antonio Rogeri

Adviser: Prof. Clesio Gianello

ABSTRACT

The Mehlich soil extractant used in the states of Rio Grande do Sul(RS) and Santa Catarina(SC) to evaluate the availability of phosphorus for the plants is sensitive to the soil buffering power. This limitation is avoided partly by separating the soils into buffering classes, and the criterion used for this purpose is the clay content. However, this textural measure has some technical and operational limitations. The purpose of the present study was to evaluate the technique of the remaining phosphorus (P-rem) compared to clay as an index of the buffering power of the soils in RS. The P-rem and clay ratio was obtained by selecting 200 samples from different places in the state. Were determined in 20 types of representative soils the P-rem, the clay content by the pipette and hydrometer method, the maximum capacity of P adsorption, the total and pedogenic Fe contents, the dose of P_2O_5 needed to increase 1 mg kg^{-1} in the soil using the Mehlich-1 and 3 methods and the phosphorus capacity factor. In these soils in which three corn crops were grown, the P content was determined by Mehlich-1 and 3 methods at maximum technical efficiency, as well as the relations between the P predicted by the methods and that absorbed by the plants. Correlation analyses were performed between P-rem and clay, and these with the attributes of soils involving the P buffering power. The relation between P-rem and clay was described by a decreasing exponential function, but the adjustment was inadequate to propose critical contents for P-rem. The P-rem index was superior than the clay index in practically all relations done with the attributes related to the buffering power of the soils. In some scenarios, the indexes were equal, but P-rem was not lower than clay in any of them. The results showed that P-rem is an index more reliable of the soil buffering power than the clay content and could be used for establish classes of soils for Mehlich-1 and Mehlich-3 determinations of soil phosphorus.

^{1/} Doctorate Thesis in Soil Science – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (140 p.) December, 2013. Research supported by FAURGS and CAPES.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Fósforo: aspectos gerais.....	3
2.2 Fósforo no solo e disponibilidade às plantas	6
2.3 Estimativa da disponibilidade de fósforo às plantas.....	13
2.4 Limitações do uso do teor de argila na interpretação do teor de P extraível pelo método Mehlich.	19
2.5 P-remanescente como índice do poder tampão dos solos	22
3. OBJETO DE ESTUDO E HIPÓTESES	24
4. MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 Seleção dos Solos	26
4.2 Análises químicas e físicas	27
4.3 Experimento em vasos	30
4.4 Análises estatísticas	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 Descrição geral dos solos.....	35
5.2 Relações entre P-remanescente e argila.....	40
5.3 Relações do P-remanescente e argila com medidas associadas ao poder tampão dos solos.....	43
5.3.1 Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP)	43
5.3.2 Matéria orgânica	44
5.3.3 Óxidos de Fe e Al	46
5.3.4 Constante relacionada à energia de ligação (k).....	48
5.3.5 Fator capacidade do solo.....	49
5.3.6 Quantidade de P ₂ O ₅ necessária para aumentar P em 1 mg kg ⁻¹ de solo	52
5.4 Relações do poder tampão do solo com medidas relacionadas ao desenvolvimento das plantas.....	59
5.4.1 Cultivo I.....	61
5.4.2 Comparação entre métodos Mehlich-1 e Mehlich-3 em relação às quantidades de fósforo extraído antes primeiro cultivo.....	72
5.4.3 Cultivo II.....	74
5.4.4 Cultivo III.....	83
5.5 Avaliações de diferentes concentrações de P na solução de determinação do P-remanescente	90

5.6 Métodos de determinação de argila e as relações com o poder tampão do solo	91
5.7 Relações entre fósforo absorvido pelas plantas e fósforo predito pelos métodos	95
5.8 Proposta de classificação dos teores de P extraídos pela solução de Mehlich de acordo com os valores de P-remanescente.	108
5.9 Implicações práticas do uso do P-remanescente como índice do poder tampão do solo	109
5.10 Possíveis limitações do uso do P-remanescente como índice do poder tampão do solo.	114
6. CONCLUSÕES	118
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
8. ANEXOS	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Doses de fósforo aplicadas aos solos nos cultivos conduzidos	33
Tabela 2. Caracterização física e química dos solos utilizados nos estudos	36
Tabela 3. Atributos químicos e medidas relacionadas ao poder tampão de fósforo dos solos utilizados nos estudos.....	38
Tabela 4. Distribuição dos solos utilizados nos estudos conforme a classe de argila e interpretação do fósforo disponível pelo método Mehlich-1	39
Tabela 5. Coeficientes de correlação (r) simples de Pearson entre P-remanescente e argila contra atributos dos solos relacionados ao poder tampão.....	45
Tabela 6. Quantidade necessária (P_2O_5) para aumentar 1 mg kg^{-1} de P na análise pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3, decorridos 30 e 80 dias da aplicação do fertilizante fosfatado	54
Tabela 7. Quantidade média de fósforo (P_2O_5) necessária para aumentar 1 mg kg^{-1} de P na análise pelos métodos Mehlich-1(M1) e Mehlich-3 (M3), decorridos 30 e 80 dias da aplicação do fertilizante fosfatado, separados de acordo com classes de argila e de P-remanescente	55
Tabela 8. Coeficientes de correlação (r) simples de Pearson entre as doses necessárias para aumentar o teor de P na análise em 1 mg kg^{-1} P pelos métodos Mehlich-1(M1) e Mehlich-3 (M3) com amostragens feitas 30 e 80 dias após a aplicação do fertilizante fosfatado, contra atributos dos solos relacionados ao poder tampão	57
Tabela 9. Correlação da taxa de incremento na produção de MSPA por unidade de P_2O_5 aplicado com atributos dos solos relacionados ao poder tampão do solo ¹	67
Tabela 10. Equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação (R^2) e teor de fósforo para a máxima eficiência técnica (MET) extraído pelos métodos Mehlich-1 (MET-M1) e Mehlich-3 (MET-M3) no primeiro cultivo.....	69
Tabela 11. Coeficientes de correlação (r) simples de Pearson entre o teor de fósforo extraído para a máxima eficiência técnica pelos métodos Mehlich-1 (MET-M1) e Mehlich-3 (MET-M3) e alguns atributos de solo relacionados ao poder tampão no primeiro cultivo.....	71
Tabela 12. Equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação (R^2) e teor de fósforo na máxima eficiência técnica (MET) extraído pelos métodos Mehlich-1 (MET-M1) e Mehlich-3 (MET-M3) no segundo cultivo	81
Tabela 13. Coeficientes de correlação (r) simples de Pearson entre o teor de fósforo extraído na máxima eficiência técnica (MET) pelos	

métodos Mehlich-1 (MET-M1) e Mehlich-3 (MET-M3) atributos dos solos relacionados ao poder tampão no segundo cultivo.....	81
Tabela 14. Equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação (R^2) e teor de fósforo extraído na máxima eficiência técnica (MET) pelos métodos Mehlich-1 (MET-M1) e Mehlich-3 (MET-M3) no terceiro cultivo.....	88
Tabela 15. Coeficientes de correlação (r) simples de Pearson entre o teor de fósforo extraído na máxima eficiência técnica (MET) pelos métodos Mehlich-1 (MET-M1) e Mehlich-3 (MET-M3) e atributos dos solos relacionados ao poder tampão no terceiro cultivo.....	88
Tabela 16. Correlação de entre diferentes concentrações de P remanescente e atributos dos solos relacionados ao poder tampão de fósforo ¹	94
Tabela 17. Correlação de entre os teores de argila determinado e pelo método da pipeta e pelo densímetro modificado (método do laboratório de rotina) com atributos dos solos relacionados ao poder tampão de fósforo.....	94
Tabela 18. Coeficientes de determinação de diferentes extratores de fósforo para solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina em trabalhos desenvolvidos nas últimas décadas.....	105
Tabela 19. Coeficientes de correlação (r) do P absorvido pelas plantas de milho e o fósforo extraído por Mehlich-1 e Mehlich-3 com separação dos solos em classes de tamponamento pelo teor de argila e por P-remanescente, no primeiro e segundo cultivo.....	106
Tabela 20. Coeficientes de correlação (r) simples de Pearson entre o teor de fósforo extraído por Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3) em que ocorreu a maior absorção de P pelas plantas, no primeiro (C1) e segundo (C2) cultivo com atributos dos solos relacionados ao poder tampão.....	107
Tabela 21. Interpretação do teor de fósforo no solo extraído pelo método Mehlich-1, conforme classes de P-remanescente.....	109
Tabela 22. Interpretação do teor de fósforo no solo extraído pelo método Mehlich-3, conforme classes de P-remanescente.....	109
Tabela 23. Simulação de classificação, interpretação e recomendação de adubação fosfatada para os solos utilizados nos estudos em um hipotético uso do P-remanescente em substituição à argila como índice do poder tampão. Na simulação foi considerado para P-remanescente o mesmo número de classes de tamponamento utilizadas para argila e, também, os mesmos teores críticos atribuídos a cada classe, conforme a CQFS- RS/SC (2004).....	114

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Posição geográfica e município correspondente aos locais de coleta das amostras de solo utilizadas nos estudos27
- Figura 2. P-remanescente (60 mg L^{-1}) de acordo com o teor de argila em solos utilizados na seleção de unidades (A-34 amostras) e solos selecionados (B-20 amostras) para desenvolvimento dos estudos. ...29
- Figura 3. Valores de P-remanescente (60 mg L^{-1}) de acordo com o teor de argila de solos provenientes de diferentes regiões do Rio Grande do Sul (200 amostras)..... 41
- Figura 4. Regressão entre o fator capacidade de fósforo (FCP) com os teores de argila (A) e valores de P-remanescente (B). Os solos circulados foram excluídos do cálculo da regressão e ambos são classificados como Cambissolo Húmico aluminico (CHA), coletados nos municípios de Vacaria e São Francisco de Paula..... 51
- Figura 5. Dose de fósforo (P_2O_5) necessária para aumentar 1 mg kg^{-1} de P na análise pelo método Mehlich-1 decorridos 30 dias da aplicação do fertilizante fosfatado, em função do teor de argila (A) e de valores de P-remanescente (B)..... 58
- Figura 6. Dose de fósforo (P_2O_5) necessária para aumentar 1 mg kg^{-1} de P na análise pelo método Mehlich-3 decorridos 30 dias da aplicação do fertilizante fosfatado, em função do teor de argila (A) e de valores de P-remanescnte (B)..... 58
- Figura 7. Regressão entre a massa seca de parte aérea (MSPA) de milho em (g vaso^{-1}) colhidos 20 dias após germinação e doses de P_2O_5 (kg ha^{-1}) aplicadas incorporadas ao solo utilizando-se como fonte o super fosfato triplo no primeiro cultivo..... 64
- Figura 8. Regressões entre o incremento na produção (mg) de massa seca da parte aérea (MSPA) por unidade de P_2O_5 aplicado em função dos teores de argila (A) e P-remanescente (B)..... 66
- Figura 9. Regressão entre o teor de P na máxima eficiência técnica (MET) extraídos pelos métodos Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3) em função dos teores de argila e valores de P-remanescente. 70
- Figura 10. Regressão entre os teores de fósforo extraídos por Mehlich-1 e Mehlich-3 antes do primeiro cultivo, com todos os valores (A) com valores até 21 mg kg^{-1} . A linha vermelha projetada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos). ICa e ICb -intervalo de confiança (95%) do coeficiente linear (a) e angular (b); t- teste t-Student para médias pareadas; ns, **não significativo e significativo ($p < 0,05$). 74

- Figura 11. Regressão entre a massa seca de parte aérea (MSPA) de milho em (g vaso^{-1}) colhidos 20 dias após germinação e doses de P_2O_5 (kg ha^{-1}) aplicadas incorporadas ao solo utilizando-se como fonte o super fosfato triplo no segundo cultivo..... 77
- Figura 12. Rendimento máximo de massa seca da parte aérea de milho (MSPA), obtidas nos cultivos I e II. A reta (45°) projetada faz referência à relação idêntica entre os rendimentos. A linha projetada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os cultivos); t- teste t-Student para médias pareadas; *significativo ($p < 0,05$)..... 80
- Figura 13. Relação entre os teores de fósforo extraídos pelos métodos Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3) na máxima eficiência técnica (MET) obtidos nos cultivos I e II. A linha projetada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os cultivos); t- teste t-Student para médias pareadas; **significativo ($p < 0,01$). 80
- Figura 14. Relação entre as quantidades de P extraídos pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3 na máxima eficiência técnica no cultivo I (A) cultivo II (B). A linha vermelha projetada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos). ICa e ICb -intervalo de confiança (95%) do coeficiente linear (a) e angular (b); t- teste t-Student para médias pareadas; ^{ns}não significativo. 82
- Figura 15. Regressão entre a massa seca de parte aérea (MSPA) de milho em (g vaso^{-1}) colhidos 20 dias após germinação e doses de P_2O_5 (kg ha^{-1}) aplicadas incorporadas ao solo utilizando-se como fonte o superfosfato triplo no terceiro cultivo..... 85
- Figura 16. Teores de fósforo na máxima eficiência técnica (MET) extraídos pelos métodos Mehlich-1 (A) e Mehlich-3 (B) nos três cultivos desenvolvidos. 89
- Figura 17. Variação da temperatura máxima e mínima (A), da temperatura média compensada e horas diárias de insolação (B) nos dias decorrentes após a germinação das plantas, para os cultivos I, II e III. Fonte: INMET (<http://www.inmet.gov.br>) estação 83967, Porto Alegre-RS 89
- Figura 18. Relação entre os teores de argila determinado pelo método da pipeta e pelo método usual do laboratório de rotina (hidrômetro modificado). A linha vermelha projetada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos). ICa e ICb -intervalo de confiança (95%) do coeficiente linear (a) e angular (b); t- teste t-Student para médias pareadas; ^{ns}não significativo ($p < 0,05$)..... 95

- Figura 19. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvido pelas plantas de milho e as quantidades extraídas por Mehlich-1(M1) e Mehlich-3 (M3) nos cultivos desenvolvidos, sem separação dos solos por classes de tamponamento..... 98
- Figura 20. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvida pelas plantas de milho e as quantidades extraídas por Mehlich-1 no primeiro cultivo, com separação dos solos de acordo com as classes de argila adotadas pela CQFS-RS/SC. A - 0 a 20%; B - 21 a 40%; C - 41 a 60% e D - >60% de argila. 100
- Figura 21. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvida pelas plantas de milho e as quantidades extraída pelo método Mehlich-1 no cultivo I, com separação dos solos de acordo com as classes de P-remanescente. A - 0 a 7 mg L⁻¹; B - 7,1 a 15 mg L⁻¹; C - 15,1 a 30 mg L⁻¹ e D - 30,1 a 60 mg L⁻¹. 100
- Figura 22. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvida pelas plantas de milho e as quantidades extraída por Mehlich-3 no cultivo I, com separação dos solos de acordo com as classes de argila adotadas pela CQFS-RS/SC. A - 0 a 20%; B - 21 a 40%; C - 41 a 60% e D - >60% de argila. 99
- Figura 23. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvida pelas plantas de milho e as quantidades extraída por Mehlich-3 no cultivo I, com separação dos solos de acordo com as classes de P-remanescente. A - 0 a 7 mg L⁻¹; B - 7,1 a 15 mg L⁻¹; C - 15,1 a 30 mg L⁻¹ e D - 30,1 a 60 mg L⁻¹. 101
- Figura 24. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvida pelas plantas de milho e as quantidades extraída por Mehlich-1 no cultivo II, com a separação dos solos de acordo com as classes de argila adotadas pela CQFS-RS/SC (2004). A - 0 a 20%; B - 21 a 40%; C - 41 a 60% e D - >60% de argila. 102
- Figura 25. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvida pelas plantas de milho e as quantidades extraída por Mehlich-1 no cultivo II, com separação dos solos de acordo com as classes de P-remanescente. A - 0 a 7 mg L⁻¹; B - 7,1 a 15 mg L⁻¹; C - 15,1 a 30 mg L⁻¹ e D - 30,1 a 60 mg L⁻¹. 102
- Figura 26. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvida pelas plantas de milho e as quantidades extraída por Mehlich-3 no cultivo II, com a separação dos solos de acordo com as classes de argila adotadas pela CQFS-RS/SC. A - 0 a 20%; B - 21 a 40%; C - 41 a 60% e D - >60% de argila. 103
- Figura 27. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvida pelas plantas de milho e as quantidades extraída por Mehlich-3 no cultivo II, com separação dos solos de acordo com as classes de P-remanescente. A - 0 a 7 mg L⁻¹; B - 7,1 a 15 mg L⁻¹; C - 15,1 a 30 mg L⁻¹ e D - 30,1 a 60 mg L⁻¹. 103

Figura 28. Representação gráfica da relação entre os coeficientes de correlação (r) obtidos entre o fósforo extraído por Mehlich-1 e Mehlich-3 e fósforo absorvido pelas plantas, com separação dos solos por classes de argila (classe I= >60%; classe II=60 a 41%; classe III= 40 a 21%; classe IV=<20%) ou por valores de P-remanescente (classe I= 0 a 7 mg L⁻¹; classe II=7,1 a 15 mg L⁻¹; classe III= 15,1 a 30 mg L⁻¹; classe IV= 30,1 a 60 mg L⁻¹). A plotagem foi feita de acordo com classes correspondentes. A linha projetada indica a relação 1:1, ou seja, onde deveriam estar os pontos caso os coeficientes fossem iguais. 107

Figura 29. Frequência de amostras (%) em cada classe, de acordo com o índice utilizado para classificar os solos (200 amostras). A - Classificação com base no teor de argila: classe I (>60%), classe II (41 a 60%), classe III (21 a 40%) e classe IV (0 a 20 %). B - Classificação dos solos com base no P-remanescente (60 mg L⁻¹): Classe I (0 a 7 mg L⁻¹), classe II (7,1 a 15 mg L⁻¹), classe III (15,1 a 30 mg L⁻¹) e classe IV (30,1 a 60 mg L⁻¹). 110

1. INTRODUÇÃO

O fósforo é um elemento muito reativo no solo e forma compostos de alta energia de ligação com os coloides, o que lhe confere alta estabilidade à fase sólida do solo. Com isso, sua disponibilidade às plantas depende da energia da ligação. A existência de várias soluções extratoras que objetivam prever a disponibilidade do fósforo às plantas é um indicativo de que não há um consenso no meio científico de método padrão, que possa avaliar satisfatoriamente a disponibilidade do nutriente nos diversos sistemas edáficos.

Os laboratórios de análise de solos dos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina utilizam o método Mehlich-1 para estimar o fósforo disponível às plantas. Recentemente, o método Mehlich-3 vem sendo proposto como substituto ao Mehlich-1, por ser um extrator multielementar, e por não superestimar a disponibilidade de P em solos adubados com fosfatos naturais. Porém, ambos extratores apresentam sensibilidade à capacidade tampão do solo. Em vista disso, para interpretar o teor extraído é necessária a separação dos solos em classes de tamponamento, cujo critério utilizado para este fim nos estados do RS e SC é o teor de argila. Entretanto, a análise textural apresenta algumas limitações, por ser demorada, onerosa e sujeita a muitas variações. Além disso, por ser uma medida de diâmetro de partículas (no caso, menores que 2 μ) não fornece qualquer informação sobre a qualidade da fração argila, o que pode levar a classificações incorretas dos solos, e por consequência, interpretação equivocadas da disponibilidade de P nos solos.

Devido às limitações da medida textural, é pertinente avaliar outros índices do poder tampão dos solos a fim de estabelecer classes de tamponamento. O método do P-remanescente é uma técnica que está sendo utilizada em alguns estados brasileiros como medida do poder tampão, sendo utilizado concomitantemente com a argila para classificação dos solos. O P-remanescente apresenta as vantagens de ser mais rápido e simples do que

determinação textural, além de ser potencialmente mais exato, pois avalia diretamente o potencial de imobilização de P, enquanto o teor de argila avalia indiretamente esta informação.

A análise do solo é umas das poucas formas que os produtores possuem para acessar informações geradas pela pesquisa em ciência do solo. As recomendações de quantidades de fertilizantes a aplicar dependem, em grande parte, da qualidade da diagnose do elemento no solo pelo método de análise. Neste sentido, pesquisas para o aumento da qualidade da determinação analítica e da interpretação dos resultados, com objetivo final de aumentar a exatidão das recomendações dos fertilizantes são de grande relevância.

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o método da determinação do P-remanescente como um critério auxiliar, ou mesmo um substitutivo à medida textural, como índice do poder tampão para interpretação dos teores de fósforo extraído pela solução de Mehlich em solos do Rio Grande do Sul.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fósforo: aspectos gerais

O fósforo é um macronutriente exigido em quantidades relativamente pequenas pelas culturas. O P constitui aproximadamente $0,2 \text{ dag kg}^{-1}$ da massa de matéria seca das plantas e faz parte de grande número de compostos essenciais. As plantas absorvem o nutriente da solução do solo nas formas de íons H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} . Após absorvido, o P permanece na forma de fosfato, sem modificar seu estado de oxidação. O radical fosfato no interior da planta pode estar como íon livre em solução, ligado a cátions metálicos formando compostos solúveis ou complexos insolúveis. O P é componente estrutural de macromoléculas, como ácidos nucleicos e fosfolípidios e também da adenosina trifosfato (ATP), sendo um elemento fundamental para várias vias metabólicas e reações bioquímicas, tais como os ciclos de Calvin e da glicólise (Taiz & Zeiger, 2004). Por fazer parte da constituição de compostos orgânicos, ele é essencial para a divisão celular, a reprodução e o metabolismo vegetal (fotossíntese, respiração e síntese de substâncias orgânicas). Estes processos metabólicos são mais intensos nos tecidos novos, assim; o P de modo geral, é encontrado em maiores concentrações nos tecidos em desenvolvimento, comparativamente aos tecidos velhos. O P é muito móvel na planta sendo translocado, quando necessário, de tecidos mais velhos para tecidos mais jovens (Raven et al, 2007).

O fósforo, diferentemente dos outros grandes ciclos biogeoquímicos, não apresenta uma fase gasosa, porém é um elemento extremamente reativo no ambiente. Não é encontrado em estado puro na natureza, somente em combinações químicas com outros elementos, e faz parte de aproximadamente 170 diferentes minerais na natureza. Os principais reservatórios deste nutriente são as rochas fosfáticas e depósitos de excrementos marinhos (guanós), e a

quase totalidade dos fertilizantes fosfatados é oriunda de rochas fosfáticas, principalmente de origem sedimentar. As reservas de P são recursos finitos e não renováveis, e a longevidade deste recurso é um tema controverso, uma vez que muitas informações consoantes a este são confidenciais e estratégicas dos países detentores (Fixen, 2010; Cordell & White, 2013). Entretanto, é consensual entre os autores que as reservas facilmente extraíveis e economicamente atraentes vão se esgotar num médio espaço de tempo, restando, posteriormente, fontes de difícil extração e menor qualidade (Van Kauwenbergh, 2010). Segundo Cordell et al. (2009), o pico de consumo de fósforo está previsto para ocorrer aproximadamente em 2040, quando a demanda por fertilizantes fosfatados vai superar a oferta. As reservas de fosfato são debatidas em torno de 30 a 300 anos, pois são dependentes de alguns pressupostos como qualidade, facilidade de extração e presença de metais pesados. Porém, uma certeza de todo este contexto é de que os preços dos fertilizantes fosfatados só tendem a aumentar. Além disso, a maior parte das reservas mundiais pertence a poucos países (Marrocos, China, Argélia e Estados Unidos). As reservas medidas de fosfato de rocha no Brasil (em termos de P_2O_5) são da ordem de 130 milhões de toneladas, o que representa de 2 a 3% das reservas mundiais. No entanto, os fosfatos naturais brasileiros são predominantemente de origem magmática e apresentam baixa eficiência agrônômica quando usados sem tratamento químico (Novais & Smith, 1999).

O consumo de fósforo para a produção de alimentos tem sido incrementado significativamente nas últimas décadas. O aumento da demanda por fertilizantes fosfatados se dá basicamente por três fatores: aumento da população, que necessita maior quantidade de alimentos; mudança nos sistemas de produção, que incluem maiores doses de fertilizante para aumentar os rendimentos; e mudanças na dieta das pessoas (Cordell et al 2009; Godfray et al. 2010). O aumento da população aliado a mudanças na dieta resultou num incremento de 198% no consumo de fósforo no mundo entre 1961 e 2007, que passou de 5,9 para 17,6 Tg de P. A demanda de P no Brasil que era de 1 a 3 kg per capita em 1961 passou para 4,5 a 6 kg per capita em 2007 (Metson et al., 2012). Este acréscimo está relacionado a melhorias no índice de desenvolvimento humano dos brasileiros (IDH), que passaram a consumir mais produtos de origem animal em detrimento a vegetais. O

processo de conversão de vegetais em proteína animal, principalmente carne, é pouco eficiente, o que resulta no aumento da demanda de fósforo por kg de alimento consumido. Com a expectativa de aumento da população mundial, concomitantemente com melhorias na qualidade de vida, é de se esperar um aumento do consumo de P para as próximas décadas. Com isso, práticas de manejo que visam o uso eficiente do fósforo são de extrema importância para o uso racional deste nutriente numa perspectiva holística. Cordell et al. (2009) em consideração sobre a possibilidade escassez de P num futuro próximo, sugerem a utilização de ações integradas que vise explorar práticas sinérgicas que reduzem as perdas e aumentem a reutilização de P aplicado.

Hodiernamente, além da preocupação com o uso eficiente dos fertilizantes fosfatados, a problemática ambiental associada a perdas de fósforo para ambientes aquáticos tem tido destaque no meio científico (Sharpley et al., 2003; Ramos, 2009; Oliveira et al., 2010). O nitrogênio juntamente com o fósforo são os principais elementos responsáveis pela eutrofização de águas naturais, como lagos, rios e estuários. O fósforo, de modo geral, é o elemento mais limitante ao desenvolvimento da flora aquática, mesmo que exigido em pequenas quantidades. Isto se deve, dentre outros motivos, à impossibilidade do mesmo ser fixado da atmosfera, como ocorre em relação ao carbono e nitrogênio para alguns organismos. Deste modo, pequenas quantidades perdidas podem resultar em sérias consequências ambientais, visto que sua presença nas águas naturais, mesmo que em quantidades modestas, pode impulsionar o processo de eutrofização (Hart et al., 2004). Do ponto de vista agrônomo, essas perdas nem sempre apresentam importância econômica, porém podem promover impactos econômicos indiretos negativos a quilômetros de distância da fonte. O meio científico tem proposto índices para alertar sobre a possibilidade de perdas de fósforo por escoamento superficial e lixiviação, como “phosphorus index” (PI) (Lemunyon & Gilbert, 1993), “degree of phosphorus saturation” (DPS) (Allen & Mallarino, 2006) e grau de saturação de fósforo (GSP) (Breeuwsna & Silva, 1992). Estes índices são elaborados relacionando-se as frações suscetíveis à perdas com algum parâmetro relacionado à capacidade de suporte de fósforo dos solos. Estas medidas podem servir de parâmetro na decisão de se aplicar fertilizantes fosfatados ao solo com objetivo de diminuir os riscos de perdas desse elemento.

O fósforo é o décimo segundo elemento químico mais abundante na crosta terrestre (Schulze, 1989), no entanto, é o segundo elemento mais limitante da produtividade das culturas nos solos tropicais. Embora pouco exigido pelas plantas, o fósforo é um dos nutrientes mais utilizados nas adubações dos solos brasileiros. A deficiência deste nutriente é um dos fatores que mais restringem a produção agrícola no Brasil (Souza & Lobato, 2004). Isso em decorrência à facilidade do P em formar compostos de alta energia de ligação com os coloides, conferindo-lhe alta estabilidade na fase sólida dos solos. Desse modo, mesmo que o teor total do elemento no solo seja alto em relação à necessidade das plantas, apenas uma pequena fração desse tem baixa energia de ligação e pode ser desorvido para ser tornar disponível às plantas (Gatiboni, 2003).

2.2 Fósforo no solo e disponibilidade às plantas

A limitação produtiva de muitos solos brasileiros se deve principalmente aos baixos teores de fósforo biodisponível às plantas. Embora os teores totais de P nestes solos possam ser elevados em alguns casos, a maior parte do P está na fase sólida, em formas inorgânicas. Nesta fase, o P pode estar fortemente adsorvido, por ligações covalentes, aos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio em solos com reação ácida, ou ao cálcio em solos com reação neutra e alcalina ou ainda em formas orgânicas que precisam ser mineralizadas para que o fósforo seja disponibilizado (Sanchez & Uehara, 1980; Novais & Smyth, 1999). O solo pode atuar como fonte ou dreno de P. Como dreno, diminui a disponibilidade do nutriente para as culturas, sendo sua intensidade influenciada pela constituição mineralógica. Solos jovens e moderadamente intemperizados, como os Vertissolos, Chernossolos e Neossolos que ainda possuem quantidades expressivas de minerais primários, podem ser fonte de P para as culturas, pelo intemperismo dos minerais e pela mineralização da matéria orgânica. Por outro lado, solos velhos e intemperizados que possuem predominância na fração argila de óxidos e hidróxidos de Fe e Al e argilominerías 1:1, podem ser dreno de P, competindo com as plantas por esse elemento (Novais et al., 2007).

A adsorção é um termo genérico que indica uma variedade de reações químicas e mesmo físicas que ocorrem na interface da fase sólida-solução adjacente do solo. Adsorção também pode ser conceituada como a

união estável entre íons ou moléculas presentes na solução do solo (adsorvato) com entidades químicas reativas existentes na superfície dos compostos sólidos do solo (adsorvato), envolvendo forças químicas e físicas (Novais et al., 2007; Ernani, 2008; Meurer, 2010). A superfície é, muitas vezes, porosa, permitindo o adsorvato penetrar no interior da partícula, tornando-se parte integrante da estrutura do mineral. A esse fenômeno dá-se o nome de absorção. Esse processo de penetração para o interior do mineral, segundo alguns autores, seria mais adequadamente denominado retenção ou fixação. O termo sorção é utilizado para se referir aos diversos mecanismos de retenção de íons e moléculas pela fase sólida do solo, incluindo diversos tipos de reações, dentre elas a precipitação, a polimerização, a adsorção e a absorção. Essa classificação é dependente da natureza e da energia de ligação, as quais juntas compõem o complexo sortivo do solo, visto que quantificá-las separadamente é praticamente impossível. Alguns trabalhos utilizam o termo adsorção de forma indiscriminada (Novais et al, 2007). As diferentes terminologias utilizadas na literatura para descrever os processos de adsorção de fósforo ao solo tais como complexo de superfície de esfera interna, adsorção específica, quimiosorção e adsorção covalente, podem ser um complicador no entendimento do processo, quando na verdade são representações do mesmo fenômeno.

O fósforo do solo pode ser dividido em dois grandes grupos: fósforo inorgânico e fósforo orgânico, dependendo da natureza do composto a que está ligado. O grupo do fósforo inorgânico pode ser separado em duas partes, o fósforo dos minerais primários e o fósforo adsorvido. O P adsorvido é composto por um complexo grupo de fosfatos inorgânicos, formando diferentes compostos e com diferentes graus de estabilidade química. Pode ser encontrado ligado aos grupos funcionais silanol e aluminol das arestas das argilas silicatadas e nos radicais R-OH dos oxihidróxidos de ferro e alumínio e, inclusive, adsorvido à matéria orgânica do solo por pontes de cátions. No solo, quando em solução, o P inorgânico pode estar nas seguintes formas iônicas: a) ácido ortofosfórico ($\text{H}_3\text{PO}_4^{3-}$), em pH menor que 2,1; b) dihidrogenofosfato (H_2PO_4^-), com predomínio no pH entre 2,1 e 7,2, em que compreende a faixa de pH indicado aos vegetais; c) hidrogenofosfato (HPO_4^{2-}), que predomina em pH básico entre 7,2 e 12; e d) fosfato (PO_4^{3-}), em pH acima de 12 (Raij, 2011).

A adsorção do fosfato aos oxihidróxidos de ferro e alumínio ocorre, principalmente, nas formas de baixa cristalinidade e com alto desbalanço de cargas (Sanyal & Datta, 1991). Segundo Parfitt (1978), a adsorção de fósforo ocorre em três estágios. No primeiro estágio há a neutralização das cargas positivas, que são saturadas quando os grupos $R-OH^+$ são compartilhados com os íons fosfatos; no segundo, ocorrem trocas de ligantes e, no terceiro, interações de caráter físico entre o fosfato e a superfície dos coloides inorgânicos. Desse modo, a reversibilidade dessas reações, denominada dessorção, é dependente da proporção de ocupação dos sítios de adsorção e de fatores que modificam a força de ligação desse elemento com a fase sólida do solo. O fosfato pode ligar-se de modo monodentado, em que um oxigênio do fosfato é ligado ao metal, bidentado, em que dois oxigênios são ligados ao metal, e binucleado, em que dois oxigênios do fosfato são ligados a dois átomos do metal (Goldberg & Sposito, 1985). A energia de ligação é crescente para os compostos monodentado, bidentado e binucleado, e a possibilidade de dessorção do fosfato aumenta na ordem inversa. Com o passar do tempo pode ocorrer o "envelhecimento" da ligação do fósforo aos oxihidróxidos de ferro e alumínio cujo grau de especificidade pode chegar a um estágio em que fosfato migra para o interior do cristal (Barrow, 1999; Novais & Smyth, 1999). A adsorção do fósforo ocorre primeiramente nos sítios mais sortivos e, posteriormente, o fósforo que remanesce é redistribuído em frações retidas com menor energia e de maior disponibilidade às plantas (Rheinheimer, 2000).

O P orgânico pode representar de 30 a 70% do total presente nos solos tropicais e pode ser uma importante fonte deste nutriente para as culturas. O fósforo orgânico é proveniente dos resíduos vegetais adicionados ao solo, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição. As formas de P orgânico presentes no solo englobam ortofosfatos de monoésteres ($RO-PO_3$), representados pelos fosfatos de inositol; ortofosfatos de diésteres, que são os ácidos nucleicos e fosfolipídios e os fosfonatos, que são moléculas contendo radicais de fosfato associados a compostos orgânicos (Novais & Smyth, 1999). Para que o P contido na matéria orgânica do solo seja aproveitado pelas culturas, é necessário que haja a conversão do P orgânico a inorgânico, através do processo de mineralização, cujas reações em solo são conduzidas por enzimas denominadas fitases e fosfatases (Stevenson, 1986).

Outra fração importante do fósforo orgânico do solo, por sua rápida dinâmica, é aquela contida na biomassa microbiana. Rheinheimer et al. (2000) obtiveram valores de 14,2 a 23,3% do P orgânico total na forma P microbiano em solos do Rio Grande do Sul. Segundo Gatiboni (2003), a imobilização de P pela biomassa microbiana é importante do ponto de vista da disponibilidade às plantas. Uma vez imobilizado, o P não fica susceptível à adsorção específica pelos colóides do solo. A imobilização é um fenômeno temporário, e o P pode voltar a estar disponível às culturas num curto período de tempo com a morte dos microrganismos. Desse modo, a imobilização pode atuar como um amortecedor dos processos de adsorção do P ao solo.

O papel da matéria em relação à adsorção de fósforo é ambíguo e depende de características intrínsecas de cada composto orgânico. Existem afirmações que os compostos orgânicos do solo podem adsorver o fosfato inorgânico, formando complexos ternários, intermediados por pontes de cátions com o ferro e alumínio (Beldrock et al., 1997). A matéria orgânica também pode aumentar a adsorção do fósforo pelo bloqueio da cristalização dos óxidos, aumentando a relação Fe_{OX}/Fe_{DCB} , o que acarreta em maior superfície de adsorção (Schwertmann et al., 1986). Por outro lado, ácidos orgânicos de baixo peso molecular como malato, oxalato e citrato podem bloquear os sítios de adsorção e competir com P pelos mesmos (Andrade et al., 2003; Pavinato et al., 2008; Tirloni et al., 2009). A decomposição da matéria orgânica é a principal fonte de ácidos orgânicos no solo, mas a produção de exsudados radiculares e microbianos também são outras importantes fontes desses ácidos. Guppy et al. (2005) constataram uma diminuição na adsorção de P pela adição de ácidos húmicos e fúlvicos de 27 a 63% em Oxisolos, quando avaliada logo após a aplicação dos ácidos ao solo. No entanto, após 10 dias, a eficiência de competição foi reduzida, possivelmente pela degradação desses ácidos pelos microrganismos. Outros trabalhos, como de Afif et al. (1995); Bayer & Amaral (2003), também constataram a pequena persistência destas substâncias no solo. Sendo assim, a efetividade destas substâncias na redução da adsorção de P pelo solo dependerá da disponibilidade de resíduos ou plantas que disponibilizam permanentemente as mesmas ao solo.

Os solos brasileiros são, em sua maioria, altamente intemperizados, com predomínio na fração argila de minerais de argila 1:1 (caulinita) e óxidos

de Fe e Al (Kämpf & Curi, 2000; Schaefer et al., 2008). As concentrações desses minerais nos solos, assim como características relacionadas à cristalinidade, área superficial específica e concentração de radicais OH protonados, variam de acordo com o material de origem, intensidade de intemperismo, composição da solução do solo e condições de drenagem (Inda Junior & Kämpf, 2005).

Os óxidos de ferro goethita (FeOOH), hematita (Fe_2O_3), ferrihidrita ($\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) e maghemita (Fe_3O_4) e de alumínio gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) exercem marcante influência nos atributos eletroquímicos de solos altamente intemperizados dos trópicos devido à sua alta reatividade, grande área superficial específica e variabilidade de suas cargas de acordo com o pH do solo. Nos solos, os óxidos ocorrem em partículas muito pequenas, submicroscópicas, e devido à sua natureza química, atuam de forma pronunciada na adsorção de fósforo, além de auxiliar na formação de agregados (Costa & Bigham, 2009). A goethita e a hematita são os óxidos de origem pedogênica mais abundantes nos solos tropicais. A goethita impregna cor amarelada dos solos (Almeida et al., 2003), já a hematita colore os solos de vermelho e tem um grande efeito pigmentante mesmo em baixa concentração, e este efeito é tanto maior quanto mais finamente estiver dispersa hematita (Tremocoldi, 2003). Entretanto, estes óxidos podem encontrar-se associados nos solos. Segundo Kämpf (1981) altas temperaturas favorecem a formação da hematita, enquanto baixo pH, umidade alta e altos teores de carbono orgânico favorecem a formação da goethita.

Há muitos estudos que mostram que além da quantidade de argila, sua constituição mineralógica é de suma importância na adsorção de fósforo pelos solos. Os óxidos e oxihidróxidos de Fe e Al são os principais constituintes da fração argila responsáveis pela adsorção de P (Gama, 2002; Moreira et al., 2008, Novais & Smyth, 1999; Cessa et al, 2009). Isto porque, nos pHs de solo normalmente utilizados para o cultivo de plantas, estes minerais apresentam cargas elétricas predominantemente positivas, uma vez que o ponto de carga zero (PCZ) está situada na faixa de pH de 8 a 9 (Schwertmann & Taylor, 1989). Por outro lado, a caulinita que é o argilomineral mais abundante em solos tropicais, apresenta PCZ em torno de 4,6 (Stumm & Morgan, 1981). Deste modo, nos pHs usuais (>5,5) a caulinita apresenta carga líquida negativa.

Segundo Fontes et al. (2001), para um mesmo mineral, adsorverá mais fosfato aquele que apresentar maior PCZ. Essa inferência se baseia no fato de que o mineral de maior PCZ tem na sua constituição faces nas quais existe maior número de hidroxilas de coordenação simples, que é a mais reativa, em detrimento as de coordenação dupla ou tripla. Neste contexto, o papel da caulinita na adsorção de P parece secundário em comparação aos componentes oxídicos. Ker (1995) observou que o aumento do caráter caulínítico em diversos Latossolos do Brasil reduziu a capacidade de adsorção de P. Motta (1999) constatou que à medida que os Latossolos tornam-se mais oxídicos, aumenta a adsorção de fósforo, o teor total e as formas ligadas fortemente a Al e Fe, em comparação àqueles solos com mineralogia mais caulínítica. De acordo com Fox & Searle (1978) o processo de adsorção pode seguir uma ordem preferencial de predomínio dos seguintes minerais: argilominerais 2:1 < argilominerais 1:1 < óxidos cristalinos de Fe e Al < óxidos de baixa cristalinidade de Fe e Al.

A extensão da superfície reativa do mineral e a morfologia dos cristais dos óxidos também podem influenciar a adsorção de P. O grau de cristalinidade dos coloides afeta diretamente o poder de adsorção de fósforo, sendo atribuído aos óxidos de baixa cristalinidade maior poder sortivo em solos intemperizados, por possuírem uma maior superfície específica e, por conseguinte, uma maior quantidade de sítios de adsorção (Moreira et al., 2008). Peña & Torrent (1984) encontraram relação linear com alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,70$) entre a área superficial específica (ASE) e a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) em solos mediterrâneos. A ferrihidrita e goethita por possuírem maior ASE comparativamente à hematita, normalmente adsorvem maiores quantidades de fósforo (Curi & Franzmeier, 1984; Fontes & Weed, 1996, Vilar et al., 2010), embora alguns estudos afirmem que a capacidade média de adsorção de P por área é semelhante entre goethitas e hematitas (Torrent et al., 1994). Óxidos de Fe de baixa cristalinidade, como a ferrihidrita, mesmo em concentrações reduzidas nos solos bem drenados, podem apresentar contribuições expressivas no montante de fósforo adsorvido (Ranno, 2004). Alguns estudos têm demonstrado que solos submetidos à inundação com posterior drenagem tiveram aumento na capacidade máxima de adsorção de P (Guilherme et al., 2000; Willett &

Higgins, 1980). Segundo esses autores, os óxidos de menor grau de cristalinidade neoformados após a drenagem foram os responsáveis pela maior adsorção de P. Hernández & Meurer (1998) estudaram solos do Uruguai e verificaram que a adsorção de P apresentou correlação positiva com as formas de ferro de baixa cristalinidade, sugerindo que tal variável pode ser utilizada para estimar a adsorção de P.

A elevação do pH do solo em solos tropicais, geralmente, aumenta a biodisponibilidade de fósforo às plantas e diminui a adsorção deste elemento à fase sólida. O aumento do pH promove a precipitação de Fe e de Al trocáveis e reduz a precipitação de P com estes metais, além de gerar cargas negativas pela desprotonação de hidroxilas expostas nas argilas e matéria orgânica. Com isso, ocorre diminuição no potencial eletrostático do plano de adsorção e aumenta a repulsão entre o fosfato e a superfície adsorvente pelas cargas negativas criadas (McBride, 1994). Porém, Haynes & Swift (1989) afirmam que a retenção de P ao solo mantém valores estequiométricos semelhantes, quando se substitui a precipitação do P pelo Al^{3+} do solo ácido, por sua adsorção pelo hidróxido de Al recém-formado pela calagem. Por outro lado, com o aumento do pH ocorre a diminuição da forma $H_2PO_4^-$, em relação à HPO_4^{2-} , esta (bivalente) preferencialmente adsorvida, contrabalançando o decréscimo do potencial eletrostático (Novais & Smyth, 1999). Algumas pesquisas têm mostrado diminuição da adsorção de P pelo aumento do pH (Souza et al., 2006; Ernani, 2008), e outras não encontraram diferenças (Arias & Fernandez, 2001). Sato & Comerford (2005) verificaram diminuição na adsorção de P na ordem de 21% e 34% com o aumento do pH de 4,7 para 5,9 e 7,0, respectivamente, em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico.

O fósforo adsorvido à fase sólida do solo está retido por ligações com diferentes graus de energia, e a possibilidade de dessorção é inversamente proporcional à energia envolvida. Do ponto de vista da fertilidade do solo, o fósforo é dividido de acordo com a facilidade com que é dessorvido para repor a solução do solo. O P é separado em formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis, que se referem respectivamente às frações facilmente, moderadamente e não disponível às plantas. Mesmo que essa divisão seja subjetiva, ajuda no entendimento da dinâmica da disponibilidade deste elemento (Rheinheimer et al., 2008).

O processo de adsorção e dessorção de fósforo do solo consideram dois compartimentos interligados, a solução do solo também denominada fator intensidade (I), e a fase sólida, que armazena o nutriente que abastece a solução, como fator quantidade (Q). O fator Q também é chamado de P disponível ou P-lábil. A cinética de como a fase sólida do solo (fator Q) abastece a solução do solo (fator I) é chamada fator capacidade (C), e representa o poder tampão do solo, o qual é controlado, entre outros fatores, pela energia de ligação do nutriente em Q. No processo de adsorção, o nutriente adicionado em I é adsorvido por Q; a velocidade de adsorção e a quantidade total adsorvida dependem das características químicas e mineralógicas do material sorvente (Novais et al., 2007). Para o fosfato, quanto maior a quantidade na fração Q, menor será a energia de ligação do nutriente aos coloides inorgânicos, devido aos sítios de ligação de maior avidéz já estarem saturados. Desta forma, a avaliação do P disponível está relacionada com valores que variam entre os compartimentos Q e I. Porém, o fator Q é o mais importante índice da fração de P disponível no solo, uma vez que a quantidade de fósforo presente na fração I é muito menor que a fração Q (Novais & Smith, 1999).

2.3 Estimativa da disponibilidade de fósforo às plantas

O desenvolvimento de métodos analíticos com o objetivo de estimar a disponibilidade de nutrientes às plantas foi iniciado há mais de um século e tem continuado até os dias atuais. A análise de solo é usada como instrumento básico de diagnóstico da fertilidade do solo e como suporte técnico para os programas de uso de corretivos e de fertilizantes na agricultura (Bortolon, 2005) e se baseia na relação existente entre o teor de nutriente no solo, determinado por um método analítico, com o rendimento das culturas (Sousa & Lobato, 2002; Silva & Raij, 1999). O método adequado é aquele que apresenta alto grau de correlação entre a quantidade do nutriente extraído e a quantidade absorvida de nutriente ou rendimento das culturas.

A quantidade de fósforo passível de ser absorvido pelas plantas, chamado P biodisponível, está associada à fração sólida do solo. Para a avaliação do fósforo disponível no solo devem-se dimensionar os fatores que descrevem a dinâmica do nutriente, as quais são: quantidade (Q), intensidade

(I) e capacidade (C). Em solos muito intemperizados, o fósforo da fase sólida (geralmente mais de 99%) está em equilíbrio com o fósforo da solução do solo (geralmente menos de 1%), de onde é absorvido pelas plantas (Vargas et al., 1983). Deste modo, o fósforo presente na solução do solo pode ser considerado desprezível no ponto de vista da disponibilidade às plantas, no médio espaço de tempo, visto as quantidades ínfimas presentes nesta fração. Entretanto, o P na solução do solo está em equilíbrio com o P adsorvido à fase sólida, de tal modo que qualquer alteração na fração I irá resultar em modificações na fração Q para manter o equilíbrio existente. Assim, a fração Q é o principal compartimento do solo a ser acessado pelo método analítico visando prever a disponibilidade às plantas. Os métodos para avaliação da disponibilidade de fósforo não necessitam extrair todo o fator quantidade do solo, desde que seja mantida a proporcionalidade da fração extraída em diferentes tipos de solo e os estoques de fósforo (Novais & Smyth, 1999). A análise de solo só tem fundamentação se apoiada em um programa de calibração dos valores obtidos pelos extratores químicos com o rendimento das culturas a campo (Schlindwein & Gianello, 2008).

A determinação e a quantificação das formas de fósforo que passam da fase sólida à solução do solo, e desta até a superfície da raiz, são difíceis. Os teores de P na solução são sempre muito baixos, e à medida que ocorre a depleção pelas raízes das plantas, ocorre também à reposição através do P de formas sólidas, que se encontram em equilíbrio com aquele da fase líquida. O P adsorvido que está em equilíbrio com o P na solução é também denominado "fósforo lábil". Uma das dificuldades da escolha de um método para fósforo é que não há uma transição clara entre o fósforo lábil e o não lábil dos solos, e ambas as frações podem ser acessadas pelos métodos analíticos (Raij et al., 1984). Assim, um extrator que recupera mais ou menos P não significa, necessariamente, que é melhor ou pior que outro. Em virtude disso, existe uma grande dificuldade na escolha do método analítico a ser utilizado para determinar com exatidão as formas de P que são disponibilizadas às plantas, resultando em muitos casos, em baixos coeficientes de correlação entre os valores determinados pelo método e a quantidade absorvida pelas mesmas (Anghinoni & Volkweiss, 1984; Fixen & Grove, 1990; Bortolon, 2010).

Os extratores utilizados para prever a disponibilidade de fósforo são normalmente baseados em soluções de reagentes químicos, que segundo Fixen & Grove (1990) podem ser classificados em quatro grandes grupos, conforme seus modos de ação, os quais são: dissolução ácida, troca iônica, complexação de cátions e hidrólise de cátions. Os extratores que agem por dissolução ácida promovem a dissolução parcial dos coloides inorgânicos, sendo extraídas, em ordem decrescente de efetividade, as formas ligadas ao Ca, Al e Fe. Os que agem por troca iônica atuam na substituição do fósforo dos sítios de adsorção pelos ânions da solução extratora. Neste grupo de extratores não há extração preferencial de fósforo de acordo com os tipos de coloides, pois são baseados na troca iônica. Os extratores que atuam por complexação de cátions possuem em sua composição substâncias capazes de complexar coloides. Assim, soluções que contêm fluoreto ou alguns ânions orgânicos (citrato e lactato) podem complexar alumínio e disponibilizar o P na solução. Do mesmo modo, bicarbonato pode complexar cálcio, liberando fósforo de compostos com este elemento. E por último, o grupo que age por hidrólise de cátions atua na liberação de fósforo dos compostos pela elevação do pH, em que ocorre a dissolução de compostos ligados ao Fe e Al na superfície dos coloides. Também, existem extratores que possuem agentes adsorventes, como o papel impregnado com óxidos de ferro. O princípio deste método tem por base o forte caráter drenante do papel com óxidos, que força a saída do P ligado à fase sólida por diferença de concentração (Miola, 2005).

A existência de vários princípios de ação e, por conseguinte, vários extratores para estimar o fósforo disponível no solo é um indicativo de que não há consenso no meio científico de método padrão, que possa avaliar satisfatoriamente a disponibilidade do nutriente às plantas nos diversos sistemas edáficos (Gatiboni, 2003; Novais et al., 2007). A seleção de um extrator se dá por meio do desenvolvimento de experimentos de correlação, que visam relacionar a quantidade de nutriente extraída pelos métodos em avaliação, com as quantidades absorvidas pelas plantas. A seleção de um método em detrimento a outro é feita por meio do coeficiente de correlação ajustado entre as variáveis, optando-se por aquele de maior grau. Não somente o coeficiente de correlação é considerado na seleção do método, mas também algumas premissas como facilidade de execução e baixo custo por análise

(Schlindwein, 2003). Essa etapa, por conveniência e economicidade, é conduzida em casa de vegetação, utilizando-se um grande número de solos representativos da região em que o método será utilizado (Sims & Johnson, 1991). A vantagem desses experimentos em casa de vegetação, em relação àqueles conduzidos a campo, é o maior controle das variáveis ambientais, dos efeitos do subsolo, do clima, das moléstias, etc. Entretanto, os resultados obtidos nestes experimentos não podem ser extrapolados diretamente para as condições de campo. As informações obtidas nos experimentos de correlação são inadequadas para estimar a necessidade de fertilizantes, pois as respostas das plantas cultivadas em vasos são normalmente menores do que aquelas cultivadas a campo, em função da competição das raízes pelos nutrientes e efeitos do sistema radicular sobre a disponibilidade de nutrientes (Corey, 1987). Desse modo, os experimentos de correlação são utilizados exclusivamente para selecionar um extrator dentre os diversos existentes, para posterior emprego em uma região de interesse.

A etapa subsequente ao processo de seleção do método consiste na calibração deste a campo. Nessa fase relacionam-se os valores obtidos pelo método com um ou mais parâmetros de plantas cultivadas a campo (índice de crescimento, teor e/ou produção de uma cultura), em condições naturais de produção (Anghinoni & Volkweiss, 1984; Black, 1993; Schlindwein, 2003). Este é um processo demorado, oneroso e demanda a participação de várias instituições de pesquisa. Nestes experimentos é obtido o teor crítico do nutriente no solo. Este teor é definido como o valor extraído pelo método selecionado, a partir do qual a probabilidade de resposta das culturas às adubações com o nutriente é muito pequena ou inexistente. Abaixo desse teor a probabilidade de resposta à adição do nutriente aumenta na proporção inversa do decréscimo do mesmo.

Dentre os vários extratores de fósforo existentes, a maioria dos laboratórios de análises de solo do Brasil utiliza o método Mehlich-1, à exceção do estado de São Paulo em que a resina trocadora de ânions é utilizada para prever a disponibilidade de P às plantas (Silva & Raij, 1999). O extrator Mehlich-1 (Mehlich, 1953) é composto de uma mistura de ácidos fortes em baixas concentrações (H_2SO_4 0,0125 mol L⁻¹ e HCl 0,05 mol L⁻¹) com pH entre 2 e 3. Seu princípio de ação é por dissolução ácida dos compostos fosfatados

de fraca energia, sendo maior para fosfatos de cálcio, seguido daqueles ligados ao alumínio e, por último, aqueles ligados ao ferro. Além deste efeito, o mesmo possui outro modo de ação, porém secundário, que consiste na troca iônica nos sítios de adsorção do fosfato pelo sulfato. O Mehlich-1 é o método oficial adotado pelos laboratórios de análise dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina desde 1968. A escolha deste método em detrimento aos outros, se deu em virtude da parceria desenvolvida na década de 1960/70 com a Universidade da Carolina do Norte (EUA) que propagou este método no Brasil. Por esta razão é também conhecido como Carolina do Norte ou duplo ácido. As principais vantagens consistem na facilidade de execução, baixo custo por determinação e obtenção de extratos límpidos.

O método Mehlich-1 apresenta algumas conhecidas desvantagens como a extração preferencial de compostos de cálcio. Com isso, o método superestima os teores disponíveis em solos com presença de fosfatos de cálcio como mineral primário e, também, naqueles que receberam adubação com fosfatos naturais (Kaminski & Peruzzo, 1997; Gatiboni, 2003; Oliveira, 2010). Além desta limitação, em solos argilosos o método Mehlich-1 tem menos força e a quantidade de fósforo extraído é menor. Com o aumento do teor de argila (poder tampão), a capacidade extrativa diminui devido ao consumo de íons hidrogênio e sulfato do extrator pelos grupos funcionais não ocupados pelo fósforo nos coloides inorgânicos e, também, pela possível readsorção de fósforo aos coloides durante a extração (Cajuste & Kussow, 1974). Como este extrator apresenta sensibilidade ao poder tampão do solo, para se efetuar a recomendação de adubação fosfatada é necessário relacionar a concentração de P obtida na análise com a capacidade tampão de fosfatos no solo (Alvarez et al., 2000; Sousa & Lobato, 2002; CQFS-RS/SC, 2004).

Em função da superestimação de fósforo em solos calcários ou naqueles em que houve a adição de fosfatos naturais e da baixa capacidade de extração em solos argilosos, o método Mehlich-1 foi modificado por Mehlich (1978), dando origem ao método Mehlich-2, composto por NH_4Cl $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ + CH_3COOH $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ + NH_4F $0,015 \text{ mol L}^{-1}$ + HCl $0,012 \text{ mol L}^{-1}$ com pH aproximado de 2,5. Porém, este método não teve sucesso, em decorrência da alta concentração de compostos clorados na solução extratora, que resultava em corrosão excessiva do aparato laboratorial. Em 1984, houve outra

modificação que deu origem à solução de Mehlich-3 (CH_3COOH $0,02 \text{ mol L}^{-1}$, NH_4NO_3 $0,25 \text{ mol L}^{-1}$, NH_4F $0,015 \text{ mol L}^{-1}$, HNO_3 $0,013 \text{ mol L}^{-1}$ e EDTA $0,001 \text{ mol L}^{-1}$). O objetivo da mudança foi possibilitar a determinação de micronutrientes na mesma solução utilizada para fósforo e potássio em solos do sudeste dos Estados Unidos (Mehlich et al., 1984). Com a inclusão do fluoreto de amônio na solução extratora, a capacidade de estimação de fósforo melhorou em solos com pH próximo à neutralidade e em solos alcalinos devido, em parte, à menor acidez dessa solução se comparada a de Mehlich-1.

O Mehlich-3 é conhecido como método de extração multielementar e tem sido usado por muitos laboratórios americanos, sendo o método preferencial em laboratórios que utilizam o espectrofotômetro de emissão óptica de plasma induzido (ICP-OAS) para determinação dos elementos. O princípio do método baseia-se na dissolução ácida e na presença de agentes complexantes. O fluoreto de amônio tem finalidade de evitar a precipitação do cálcio solúvel com o flúor, extraindo assim, o fosfato de cálcio mais solúvel sem dissolução excessiva em função do pH tamponado com ácido acético a pH 2,5 e do pK do fluoreto de cálcio (Bortolon, et al., 2009). O fluoreto também atua na complexação de fosfatos de ferro e alumínio, sendo mais efetivo em pH abaixo de 2,9. O ácido acético objetiva tamponar o pH da solução em valores próximos a 2,5 e impedir a precipitação do cálcio como fluoreto de cálcio. O nitrato de amônio facilita a extração de cátions básicos como o cálcio, magnésio, sódio e potássio, além de reagir com o ácido acético para formar acetato de amônio. O ácido nítrico extrai uma porção de fosfatos de ferro e alumínio e é o componente ácido que extrai cátions básicos e micronutrientes. O EDTA tem ação quelatizante e previne a precipitação de fluoreto de cálcio (Beegle, 2005).

Os métodos Mehlich-1 e Mehlich-3 apresentam sensibilidade ao poder tampão dos solos e extraem menos fósforo, à medida que esse aumenta (Anghinoni & Bohnen, 1974; Bortolon & Gianello, 2008; Alcântara et al., 2008; Oliveira, 2010). Por outro lado, a sensibilidade identificada pelos métodos não é compatível com aquela percebida pelas plantas, que produzem satisfatoriamente bem em solos tamponados (argilosos) com baixos teores de P extraído, comparativamente a solos pouco tamponados (arenosos) com teores semelhantes. Em função desta limitação, a correlação do P absorvido

com o quantificado pelo extrator é fraca, quando solos de diferentes tamponamentos são incluídos na análise de regressão. Entretanto, quando os solos são separados por um critério de tamponamento, os coeficientes de correlação aumentam significativamente. Nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, essa deficiência do método é contornada pela separação dos solos em classes de teor de argila, em que são atribuídos menores teores críticos quanto mais altos forem os teores de argila dos solos (CQFS-RS/SC, 2004).

A sensibilidade do Mehlich-1 em relação ao poder tampão dos solos foi percebida nos primeiros estudos voltados à calibração do método nos solos do Rio Grande do Sul no final da década de 1960 (Mielniczuk et al., 1969). Por essa razão, inicialmente, os solos foram separados subjetivamente em duas classes de argila (arenosos e argilosos) em que foi estabelecido um teor crítico para cada classe. Nessa época, a classificação dos solos era feita levando-se em consideração perfis clássicos como referência. A proposta de classificação dos solos de acordo com o teor de argila para interpretação dos teores de P extraído pela solução de Mehlich-1, em solos do Rio Grande do Sul, foi feita por Anghinoni & Bohnen (1974). A partir de 1976 foram definidos critérios quantitativos de argila para a separação dos solos, e passou-se a adotar três classes (>40, 40-20 e <20%). Em 1986 com a publicação das “Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina” as três classes de argila até então usadas, foram substituídas por cinco novas classes de argila >55, 55-41, 40-26, 25-11 e ≤10% com teores críticos de 6, 9, 14, 18 e 24 mg kg⁻¹ de fósforo, respectivamente. Estas classes perduraram até 2004 quando foi publicado o “Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina” em se passou a adotar apenas 4 classes de argila >60, 41-60, 21-40 e ≤ 20%, com teores críticos de 6, 9, 12 e 21 mg dm⁻³ de fósforo, respectivamente (CQFS-2004).

2.4 Limitações do uso do teor de argila na interpretação do teor de P extraível pelo método Mehlich.

A determinação da argila nos laboratórios de rotina, além de ser muito trabalhosa e demorada, também pode apresentar muitas variações nos

resultados. A determinação textural encarece a análise, aumenta o tempo necessário para a entrega dos resultados aos interessados e possibilita erros de interpretação da real disponibilidade de fósforo, especialmente nos solos argilosos com teores de fósforo nas faixas “Muito baixo” e “Baixo”, em que os intervalos entre as classes de fertilidade são muito estreitos (Schlindwein, 2003). Além disso, muitos solos apresentam agregação primária na forma de pequenos grânulos muito estáveis e resistentes em estado natural, principalmente os que possuem quantidades significativas de óxidos de Fe (Taveres Filho & Magalhães, 2008). Esses grupamentos, nem sempre são totalmente quebrados pela dispersão química e mecânica, contribuindo, pelo seu tamanho, para superestimar a proporção de silte do solo analisado (Netto, 1996, Donagemma, 2003, Miyazawa & Barbosa, 2011). A matéria orgânica, também atua na agregação do solo e forma microagregados muito estáveis, que não são dispersos pelos procedimentos analíticos usados em laboratórios de rotina (Broggi et al., 2010). Isso porque a estabilidade e o tamanho dos agregados são proporcionais às concentrações de substâncias orgânicas, principalmente ácidos húmicos, fúlvicos e polissacalídeos (Corá et al., 2009). Assim, para uma determinação exata dos teores de argila é necessário uso de pré-tratamentos que visam remover estas substâncias agregantes (Taveres Filho & Magalhães, 2008). Porém, esse procedimento é praticamente inexequível em laboratório de rotina. Além disso, a presença em grandes quantidades de íons flocculantes (Ca, Mg e Al) pode dificultar a dispersão dos agregados do solo, principalmente em solos alto teor de Ca quando se utiliza o dispersante contendo NaOH. A indicação feita por EMBRAPA (1997) de se substituir o NaOH pelo hexametáfostato de sódio nem sempre resulta em resultados satisfatórios.

A determinação textural em laboratórios de rotina é efetuada de um modo indireto pelo método do hidrômetro (densímetro de Bouyoucos). Este método, por sua vez, foi calibrado para determinação textural utilizando-se o método da pipeta, que é considerado referência, e mede diretamente o teor de argila por pesagem. Embora mais preciso que o método hidrômetro, o método da pipeta é impraticável em escala de rotina, por ser demorado e de difícil execução. Desse modo, já existe uma primeira fonte de erro (erro de predição) no processo de calibração, em que se relacionam valores de leitura da escala

do densímetro com teores de argila. Outros erros podem estar associados a pressupostos dos métodos que utilizam o princípio da sedimentação, que na prática, nem sempre são verdadeiros, como por exemplo: a) a velocidade de sedimentação é constante; b) as partículas são esféricas, sólidas e lisas; c) a densidades das partículas são iguais a do quartzo ($2,65 \text{ g cm}^{-3}$); d) não ocorrem interações entre as partículas ou entre elas e a parede do recipiente de sedimentação (Konert & Vandenberg, 1997). Além disto, o uso do densímetro pode acumular erros operacionais, como dificuldade de leitura da sua escala e o uso de fator de correção de temperatura da suspensão.

Atualmente, com a consolidação e evolução do sistema plantio direto, tem se constatado aumentos significativos de matéria orgânica na superfície dos solos cultivados nesse sistema. Com isso, é frequente a obtenção de teor baixo de argila em solos de regiões em que predominam solos muito argilosos. Porém, quando é feita uma simples conferência pelo tato, verifica-se que os solos são de fato argilosos, e o problema está relacionado a não dispersão dos agregados pelo método usual de determinação. Esta subestimação está associada ao forte poder agregante da matéria orgânica que condiciona a formação de microagregados muito estáveis, de difícil separação. Nesse caso, ocorre superestimação da fração silte dos solos sem que, necessariamente, o solo tenha diminuído seu poder tampão de P (Donagemma et al., 2008), o que resulta no enquadramento incorreto dos solos nas classes de tamponamento.

O uso do teor de argila como índice do poder tampão do solo, embora utilizado há muitos anos pelos laboratórios do RS e SC, pode apresentar algumas limitações na classificação do tamponamento dos solos. Questionamentos sobre esta medida do poder tampão incorrem por mesma ser quantitativa, e por não fornecer qualquer informação sobre a qualidade desta fração. No Rio Grande do Sul e Santa Catarina, a combinação da diversidade geológica, climática e de relevo originou uma grande variedade de tipos de solos (Streck et al., 2008). Assim, num exemplo hipotético, solos com o mesmo teor de argila provenientes da região da campanha, de um vale da serra ou do planalto, não necessariamente apresentam a mesma composição mineralógica na fração argila. Porém, pelo atual sistema de classificação, eles recebem o mesmo tratamento, pois a premissa adotada é de que existe semelhança

quanto ao poder tampão de P, mesmo existindo diferenças contrastantes na mineralogia dos solos. Entretanto, são muitos os trabalhos na literatura que demonstram a influência da mineralogia na capacidade de adsorção de fósforo ao solo (Gonçalves et al., 2011; Vilar et al., 2010; Fink, 2012), pois a magnitude da adsorção depende da quantidade e da composição dos constituintes com capacidade de adsorver moléculas neutras ou carregadas eletricamente.

2.5 P-remanescente como índice do poder tampão dos solos

Em 1999 foi introduzida pela Comissão de Fertilidade do Solo do estado de Minas Gerais-CFSEMG a determinação do fósforo remanescente (P-rem), como critério auxiliar para classificação do tamponamento dos solos e interpretação da disponibilidade de P. Esta técnica possibilita a avaliação direta da capacidade de sorção de P no solo, bem como pode substituir à análise textural desse na recomendação da adubação fosfatada (Alvarez et al., 1999; Lisboa et al. 2010). Na região do Cerrado (Sousa & Lobato, 2002) e no estado de Minas Gerais (Alvarez et al., 1999) é possível classificar os solos por duas formas; pelo teor de argila ou por valores de P-remanescente, e cabe ao responsável técnico a escolha do índice a ser utilizado para classificar os solos. Obviamente, para evitar incongruências na classificação quando se opta por um índice em detrimento a outro, deve existir correlação significativa entre os mesmos para os solos representativos da região de interesse. Para os solos de Minas Gerais, Freire (2001) obteve uma relação negativa dos teores de argila com valores de P-remanescente, embora o coeficiente de determinação não fosse muito elevado (0,74).

O P-remanescente é a concentração de P na solução de equilíbrio após agitar durante uma hora a terra fina seca ao ar (TFSA) com solução de CaCl_2 10 mmol L^{-1} , contendo uma quantidade conhecida de fósforo. Esta determinação baseia-se na análise do resíduo de uma determinada dose de P aplicada a uma solução com solo, depois de um período de agitação, avaliando-se assim a capacidade de sorção de P. Essa técnica foi proposta inicialmente por Bache & Williams (1971) como índice de adsorção de fósforo ao solo, embora fosse quantificado, por diferença, o fósforo adsorvido, contrariamente ao P-remanescente em que é considerado o P que permanece em solução. Esta técnica não foi desenvolvida com objetivo de classificar os

solos para avaliar a disponibilidade de P às plantas, e sim como índice de adsorção, uma vez que não se utilizam critérios de tamponamento para solos americanos, mesmo nas regiões que utilizam o Mehlich-1 e 3 como extratores de P. O P-remanescente também é conhecido como isoterma de adsorção de ponto único, pois consiste em um dentre os vários pontos utilizados para se determinar a capacidade máxima de adsorção de fósforo. Além do uso no Brasil para classificar os solos em classes quanto ao poder tampão, o P-remanescente é utilizado em alguns países para definição de índices ambientais a fim de avaliar a susceptibilidade do fósforo a perdas por escoamento superficial e lixiviação (Amarawansa & Indraratne, 2010; Xue et al., 2013).

O P-remanescente apresenta estreita correlação com o fator capacidade e com a capacidade máxima de adsorção de fosfatos (Alvarez et al., 2000), o que permite melhorar substancialmente a interpretação das análises de fósforo no solo para o estabelecimento das classes de disponibilidade desse nutriente. Quanto menor o teor de P remanescente (mg L^{-1}), maior a capacidade tampão e, conseqüentemente, maior a adsorção de P. O inverso é verdadeiro, quanto maior o teor de P-remanescente, menor a capacidade tampão e menor a capacidade de adsorver fosfatos (Alvarez & Fonseca, 1990). Gonçalves et al. (1985), em estudo sobre a cinética de adsorção de P em dez solos com diferentes características mineralógicas, texturais e químicas, observaram que 90% do fósforo adsorvido em oito dias, ocorreu na primeira hora de contato do solo com a solução CaCl_2 10 mmol L^{-1} , contendo 60 mg L^{-1} de P.

A técnica do P-remanescente apresenta as vantagens de ser mais rápido e simples do que a determinação do teor de argila e potencialmente mais precisa, pois avalia diretamente o potencial de imobilização de P, enquanto o teor de argila fornece indiretamente essa informação (Freire, 2001; Bonfim et al., 2004). Solos com mesmo teor de argila podem apresentar diferentes capacidades de adsorção de P, pois as principais características do solo que influenciam a adsorção de fósforo são: o tipo de argila, o conteúdo de coloides de baixa cristalinidade e quantidade e qualidade da matéria orgânica (Tirloni et al., 2009; Pereira et al., 2010).

3. OBJETO DE ESTUDO E HIPÓTESES

Com base no contexto exposto, em que são constantes os inconvenientes relacionados à análise textural dos solos, pelos diversos motivos supracitados, torna-se pertinente testar outros índices do poder tampão do solo, se é que se deseja continuar utilizando o extrator Mehlich para prever a disponibilidade de P às plantas. O P-remanescente por ser uma medida simples, barata, de fácil execução e potencialmente mais exata, surge como interessante alternativa ao uso da argila para classificar solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. No entanto, há um entrave para a utilização de outro índice do poder tampão do solo em substituição à análise textural. Como definir os teores críticos para as novas classes criadas, caso opte-se pelo uso de um novo índice? Os atuais teores críticos de fósforo utilizados nos estados do RS e SC foram determinados com base no teor de argila como índice do poder tampão de P. Estes teores foram obtidos por meio dos experimentos de calibração desenvolvidos ao longo das últimas décadas. A execução de novos experimentos de calibração é muito difícil, tendo em vista a onerosidade e o tempo demandado para a execução, além de serem pouco atrativos ao meio científico no panorama atual. Sendo assim, a primeira alternativa é efetuar regressões entre os teores de argila e valores P-remanescente e, em caso de elevado coeficiente de determinação, pode-se utilizar a equação ajustada entre as variáveis para serem estabelecidas as novas classes. Se isso ocorrer é possível à utilização de ambos os índices para interpretação, como é usual em Minas Gerais e na região dos Cerrados.

Entretanto, o uso de dois índices não traz benefício algum para os laboratórios de rotina; ao contrário, acrescenta uma análise ao processo. A utilização de apenas um índice é mais conveniente, além de evitar possíveis ruídos. Isso porque, um determinado solo não apresentará, necessariamente, o

mesmo teor crítico na classificação pela argila ou P-remanescente, tendo em vista a existência de grande diversidade de solos. Em situações dúbias restará ao responsável técnico a definição de qual índice usar, uma vez que as interpretações podem ser discrepantes. Por outro lado, a opção por apenas um índice incorre em outra dúvida. Qual é o melhor índice para classificar os solos quanto a seu poder tampão: argila ou P-remanescente? O índice ideal é aquele que melhor se correlaciona com atributos do solo relacionados ao poder tampão de uma região de interesse, porém essas informações inexistem para solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Com base no contexto discorrido são formuladas para este estudo as seguintes hipóteses:

- a) Existe relação estatística significativa entre os teores de argila e os valores de P-remanescente para os solos do Rio Grande do Sul, porém com a presença de unidades discrepantes em função da diversidade mineralógica dos solos do Estado.
- b) Os atributos dos solos relacionados ao poder tampão de P são mais bem correlacionados com o P-remanescente do que com a argila.
- c) O P-remanescente é um índice mais adequado que a análise textural para dividir os solos do RS e SC em classes de tamponamento.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Seleção dos Solos

Para os estudos foram selecionados solos das principais classes que ocorrem no estado do Rio Grande do Sul. Foram coletadas amostras de trinta e cinco solos de várias regiões, para obter uma grande amplitude de valores de P-remanescente e de teores de argila (Figura 1). Algumas amostras foram coletadas em local próximo a perfis anteriormente classificados. Para as demais, a coleta foi feita com base no mapa de solos do estado do Rio Grande do Sul (Streck et al., 2008). A amostragem foi feita em locais que apresentavam solos com características semelhantes daqueles descritos no levantamento. Foram priorizados solos com maior ocorrência em cada região, conforme a aptidão agrícola e relevância econômica. As amostras foram coletadas na camada zero a 20 cm de profundidade, preferencialmente em áreas sob vegetação natural que nunca haviam recebido adubações fosfatadas. Após a coleta, os solos foram secos ao ar, peneirados em tamis com malhas de 2,0 mm e posteriormente homogeneizados com utilização de betoneira. Sub-amostras de cada solo foram coletadas para a caracterização físico-química dos mesmos, constituídas de terra fina seca ao ar.

Foram também selecionadas 200 amostras de solos provenientes de diferentes locais do estado do RS, obtidas dentre os enviados por produtores ao Laboratório de Análises de Solos do Depto de Solos-UFRGS. Nessas amostras foram determinados o teor de argila e o P-remanescente, para estabelecer o grau de associação entre estas medidas em um maior número de amostras.

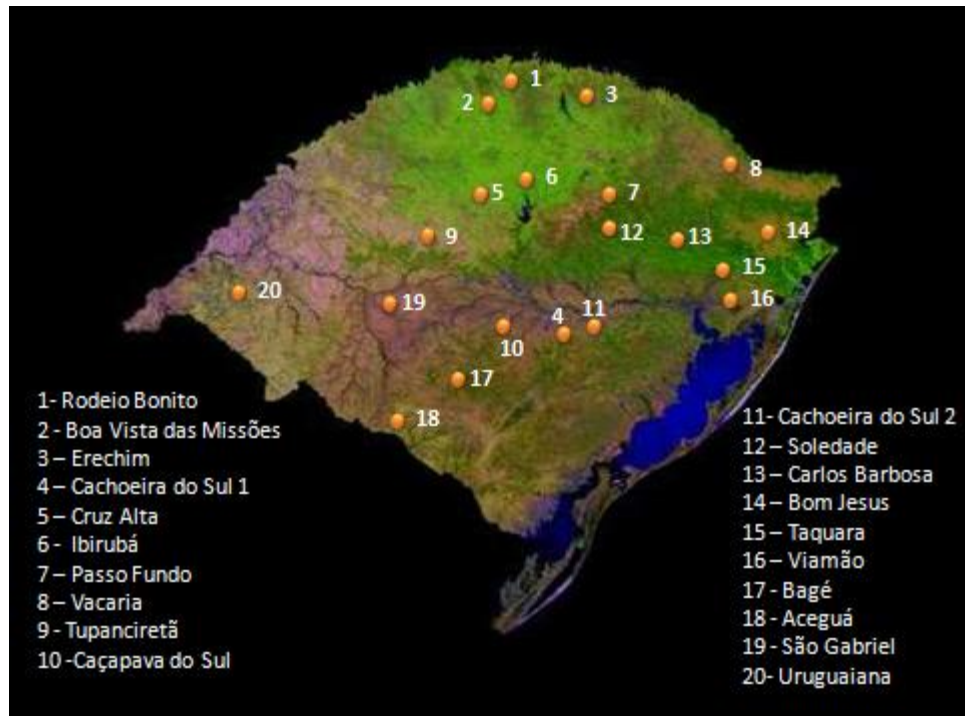


Figura 1. Posição geográfica e município em que foram coletados os solos utilizados nos estudos.

4.2 Análises químicas e físicas

Na caracterização dos solos foram determinados: pH em água na relação 1:1; índice SMP; fósforo e potássio extraídos pela solução de Mehlich-1; cálcio, magnésio e alumínio trocáveis, extraídos por KCl 1 mol L^{-1} e matéria orgânica por oxidação com solução sulfocrômica. O enxofre foi determinado após extração com CaHPO_4 500 mg L^{-1} , o B extraído por água quente, Cu e Zn extraídos pela solução de Mehlich-1. A acidez titulável (H+Al) foi determinada indiretamente pelo valor do índice SMP, utilizando-se a equação ajustada entre a acidez titulável determinada pela solução tamponada de acetato de cálcio $1,0 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$ e o índice SMP para solos dos estados RS e de SC. Foram utilizados para estas determinações os procedimentos analíticos descritos em Tedesco et al.(1995). Os teores de argila foram determinados por três métodos: pipeta (EMBRAPA, 2006), hidrômetro (Gee & Bauder, 1986) e hidrômetro modificado (método descrito por Tedesco et al.,1995), em todos utilizando o hidróxido de sódio com dispersante.

A determinação do P-remanescente foi feita pela adição a $5,0 \text{ cm}^3$ de TFSA (em erlenmayer com capacidade de 100 mL) de 50 mL de uma solução de CaCl_2 10 mmol L^{-1} contendo concentrações conhecidas de fósforo. Foram avaliadas três concentrações de P na solução (60, 80 e 100 mg L^{-1}).

Após agitação por 5 minutos, a solução foi mantida em repouso por uma noite (16 h), conforme a metodologia descrita por Alvarez et al. (2000). A determinação do P no extrato foi feita por duas metodologias: colorimétrica (Tedesco et al., 1995) e por espectrometria de emissão óptica de plasma induzido - ICP-OES (Sikora et al., 2005).

Dentre os solos coletados, foram selecionados 20 para condução do experimento com plantas. Foram escolhidos solos pertencentes a todas as quatro classes de argila adotadas pela CQFS (2004); porém, dentro de cada classe, optou-se por aqueles que apresentavam teores semelhantes de argila e valores de P-remanescente diferentes (Figura 2). Esse critério de escolha objetivou avaliar se solos, que recebem o mesmo tratamento pelo sistema atual de recomendação, podem ser melhor classificados quanto ao seu tamponamento, caso se adote o P-remanescente com índice do poder tampão de P. Nessas amostras, além da caracterização físico-química, também foram determinados a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) e os teores de Fe e de Al associados a óxidos de baixa cristalinidade e aos de origem pedogenética. Os teores de Fe e de Al de baixa cristalinidade foram extraídos por oxalato de amônio $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 3,0 na ausência de luz (Schwertmann, 1964). O Fe atribuído à totalidade dos óxidos pedogênicos (Fe_{DCB}) foi extraído com ditionito-citrato bicarbonato de sódio a 80°C , em duas extrações sucessivas (Mehra & Jackson, 1960). Os teores totais de Fe, Al, Si, Ti, P e Mn foram determinados por ataque sulfúrico, conforme procedimento descrito em EMBRAPA (1997). Os teores dos elementos no extrato foram quantificados por ICP-OES (Sikora, et al. 2005).

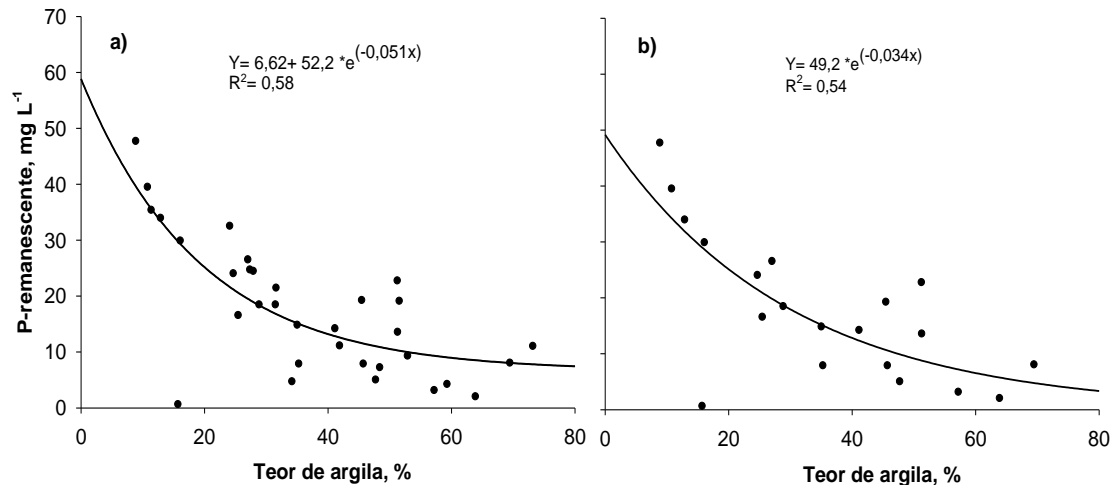


Figura 2. P-remanescente (60 mg L^{-1}) em função do teor de argila dos solos utilizados na seleção de unidades de mapeamento (a- 34 amostras) e solos selecionados (b- 20 amostras) para os estudos com plantas.

A capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) dos solos foi determinada pela utilização de isotermas de adsorção. As isotermas foram elaboradas adicionando-se $5,0 \text{ cm}^3$ de solo (em erlenmeyers) com capacidade de 150 mL , aos quais foram transferidos 50 mL de solução de CaCl_2 10 mmol L^{-1} contendo diferentes concentrações de P ($0, 10, 20, 40, 100, 200, 400$ e 500 mg L^{-1} de P). A seguir, as amostras foram agitadas por uma hora em agitador de movimento helicoidal e deixadas em repouso por 16 horas. Após este período, foi retirada uma alíquota do sobrenadante e o P-remanescente em solução foi determinado por ICP-OES. As quantidades de P adsorvido foram calculadas por diferença entre as concentrações iniciais e as concentrações na solução após o equilíbrio. As concentrações após o equilíbrio e os respectivos valores de P adsorvido foram ajustadas pela isoterma de Langmuir : $P\text{-sor} = (K \cdot \text{CMAP} \cdot P\text{-sol}) / (1 + K \cdot P\text{-sol})$, em que $P\text{-sor} = P$ sorvido; K = constante relacionada à energia de ligação; CMAP = capacidade de adsorção de P e $P\text{-sol} = P$ na solução de equilíbrio, conforme descrito por Novais & Smith (1999). O ajuste do modelo de Langmuir foi efetuado utilizando-se o programa SigmaPlot versão 10.0.

O fator capacidade de fósforo (FCP) foi determinado utilizando-se os valores dos coeficientes b_1 das equações de 2º grau entre o P-dessorvido e o P-sorvido nas diferentes concentrações de fósforo adicionado aos solos (Fox & Kamprath, 1970). O P sorvido foi determinado adicionando-se 30 mL de solução de CaCl_2 (10 mmol L^{-1}), com diferentes concentrações de P ($0, 10, 25,$

50 e 100 mg L⁻¹) em 1,0 g de solo. Foi utilizado o reagente KH₂PO₄ para o preparo dessas soluções, e o CaCl₂ (10 mmol L⁻¹) como base para as diluições. As soluções foram mantidas 72 h em contato com o solo, com um ciclo alternado de agitação (agitador “end to end”) e repouso. Na sequência, os tubos foram centrifugados para sedimentação do solo, com posterior retirada da solução sobrenadante, na qual foi determinado o teor de P. O P dessorvido foi determinado adicionando-se 30 mL da solução de CaCl₂ (10 mmol L⁻¹) a cada tubo utilizado na sorção. Os tubos foram agitados por 72 h pelo mesmo procedimento utilizado para avaliar a sorção. Após a agitação, os tubos foram deixados em repouso por 16 horas para decantação do solo. O teor de P dessorvido foi determinado na solução sobrenadante (Sikora et al., 2005).

4.3 Experimento em vasos

O experimento em vasos foi conduzido de janeiro a abril de 2013, a céu aberto, na área experimental do Departamento de Solos da UFRGS, situada na longitude 51° 13' 19" W, latitude 30° 01' 53" S, altitude de 10 m e clima Cfa (classificação de Koeppen), tendo sido feitos três cultivos de milho.

Os solos cujo pH em água (pH-H₂O) foi inferior a 6,0 foram corrigidos com uma mistura de CaO e MgO na relação estequiométrica 3:1 com o objetivo de elevar pH a valores próximos a 6,0. Foi aplicada aos solos uma solução contendo micronutrientes, cuja concentração foi equivalente a 8 kg ha⁻¹ de Cu e de Zn; 2 kg ha⁻¹ de B e 0,2 kg ha⁻¹ de Mo. Foram também adicionados o equivalente a 90 e 85 kg ha⁻¹ de S e Mg, respectivamente, para todos os solos que apresentaram teores destes elementos abaixo da faixa “Muito alto” (CQFS-2004). As doses foram calculadas considerando a massa de 2 x 10⁶ kg ha⁻¹ de solo. Para suprir os elementos Cu, Zn, B, Mo, S e Mg foram utilizados respectivamente os fertilizantes sulfato de cobre (CuSO₄.5H₂O), sulfato de zinco (ZnSO₄.7H₂O), ácido bórico (H₃BO₃), molibdato de amônio ((NH₄)₆Mo₇O₂₄.4 H₂O), sulfato de cálcio (CaSO₄) e sulfato de magnésio (MgSO₄.7H₂O). Os solos com teores de potássio abaixo de 250 mg dm⁻³ foram adubados com KCl para atingir esse valor. As doses foram calculadas individualmente para cada solo, considerando-se que a aplicação de 2,0 kg ha⁻¹ de potássio aumenta 1,0 mg kg⁻¹ de K na extração por Mehlich-1.

Os tratamentos foram selecionados com o objetivo de atingir o teor de P no solo, extraído pelas soluções de Mehlich-1 e Mehlich-3, a partir do qual as plantas não mais respondem à adubação fosfatada. Esse ponto foi denominado teor de P no solo para a máxima eficiência técnica (MET). Os tratamentos foram constituídos por 20 solos, cinco doses de fósforo e três repetições, totalizando 300 unidades experimentais, em delineamento inteiramente casualizado. Entretanto, somente em duas repetições foram cultivadas plantas, sendo a outra utilizada para avaliar as quantidades de P extraídas pelas soluções de Mehlich-1 e 3 na ausência de plantas. No primeiro cultivo, foram adicionadas doses crescentes de P_2O_5 (0, 100, 200, 400 e 800 $kg\ ha^{-1}$) utilizando-se o superfosfato triplo (STF), aplicado ao solo na forma de pó. As doses foram calculadas considerando a massa de $2 \times 10^6\ kg\ ha^{-1}$ de solo. Desse modo, as doses utilizadas são equivalentes a 0, 50, 100, 200 e 400 $mg\ kg^{-1}$ de P_2O_5 , no entanto, neste estudo optou-se por expressá-las na unidade $kg\ ha^{-1}$.

Foi observado no primeiro cultivo que as doses utilizadas, em alguns solos com maior tamponamento de P, foram insuficientes para atingir o objetivo esperado. Nestes solos, o rendimento de massa seca em função das doses aplicadas de P_2O_5 foi linear nas quantidades de P_2O_5 aplicadas. Em decorrência disso, foi conduzido outro cultivo (cultivo II), adicionando-se mais 1.100 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 ao tratamento em que tinham sido aplicados inicialmente 100 $kg\ ha^{-1}$, totalizando uma dose de 1.200 $kg\ ha^{-1}$, nestes solos. Entretanto, os rendimentos de massa seca no segundo cultivo, em alguns solos, ainda foram lineares até a maior dose de P_2O_5 aplicada, forçando assim a condução de outro cultivo (Cultivo III). Neste cultivo, nos tratamentos em que haviam sido aplicadas inicialmente (cultivo I) 200 e 400 $kg\ ha^{-1}$ foram adicionadas mais 1.600 e 2.000 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 , totalizando 1.800 e 2.400 $kg\ ha^{-1}$, respectivamente (Tabela 1). Além disso, nos solos em que não foi aplicado a dose extra de P_2O_5 no segundo cultivo, foi aplicado mais P para o terceiro. A estes solos foram adicionados 1.100 e 1.600 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 nos tratamentos que haviam recebido as doses 100 e 200 $kg\ ha^{-1}$ no primeiro cultivo, perfazendo doses totais de 1200 e 1800 kg^{-1} , respectivamente.

As datas de semeadura do milho foram: 10/01/13; 20/02/2013 e 25/03/13 para os cultivos I, II e III, respectivamente.

As unidades experimentais foram constituídas por vasos de polietileno com capacidade de 8L. O solo das três repetições de cada tratamento (18 kg de solo seco) foi colocado em betoneira juntamente com a dose de P_2O_5 correspondente. A seguir foi vedada a boca da maquina com lona plástica para evitar perdas de solo e homogeneizado por 3 minutos. Cada solo foi subdividido em três partes iguais (6 kg vaso^{-1}) por pesagem em balança com sensibilidade de 50,0 g e acondicionado em vasos a céu aberto. Os solos foram umedecidos e os vasos distribuídos ao acaso, em área aberta, ficando expostos ao tempo e conseqüentemente a precipitações naturais. A semeadura das plantas no primeiro cultivo foi feita 10 dias após aplicação dos tratamentos.

Oito sementes de milho do híbrido Pionner 30F53 foram semeadas em todos os cultivos. Após a germinação, foi efetuado o desbaste, deixando-se três plântulas por vaso, sendo as mesmas cultivadas por vinte dias após a emergência (DAE). A adubação nitrogenada foi feita com solução de ureia aplicada (250 kg ha^{-1}) na superfície do solo, parcelada em duas aplicações: 1/3 na semeadura e 2/3 aos 10 dias após a emergência. Quando foi observado ataque de lagartas ou pulgões nas plantas durante os cultivos, foi efetuada a aplicação de deltametrina. Em períodos de baixa precipitação pluviométrica foi feita irrigação para repor a quantidade de água perdida, mantendo-se a umidade do solo próxima à capacidade de campo.

Ao final do período de cultivo as plantas foram cortadas rente ao solo, secas em estufa com circulação forçada de ar a $65 \text{ }^\circ\text{C}$, pesadas para determinação da massa seca da parte aérea (MSPA) e moídas em moinho de martelo para análise química do tecido. A determinação dos nutrientes na parte aérea das plantas foi feita no extrato nítrico-perclórico, conforme o método descrito por Tedesco et al. (1995) sendo os mesmo determinados em ICP-OES.

Em cada cultivo, antes da semeadura do milho, foram coletadas amostras de solo para avaliação do P “disponível”. As amostras foram retiradas com trado calador, coletando-se três sub-amostras em cada vaso, sendo, na seqüência, misturadas e secas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de $65 \text{ }^\circ\text{C}$. As amostras secas foram moídas em gral de porcelana e determinado o P extraído pelas soluções de Mehlich-1 (Tedesco et al. 1995) e Mehlich-3 (Schlindwein, 2003). As análises de P foram feitas por volume

(cachimbagem), no entanto, a densidade dos solos foi utilizada para calcular os resultados em unidade de peso. Todas as determinações foram feitas em duplicata, sendo utilizados os dados médios na apresentação dos resultados.

Tabela 1. Doses de fósforo aplicadas aos solos nos cultivos conduzidos

Cultivo	Doses de P ₂ O ₅				
	D0	D1	D2	D3	D4
kg ha ⁻¹				
I	0	100	200	400	800
II	0	200	400	800	1200
III	0	800	1200	1800	2400

*As doses foram aplicadas com base no peso do solo; assim, a divisão por dois do valor em kg ha⁻¹ corresponde a dose em mg kg⁻¹. Somente receberam a dose de 1200 kg ha⁻¹ no cultivo II os solos onde a produção de massa seca da parte aérea (MSPA) foi linear até a maior dose de P₂O₅ aplicada no cultivo I. No cultivo III, somente foi aplicada a dose de 2400 kg ha⁻¹ nos solos que já haviam recebido a dose de 1200 kg ha⁻¹ no cultivo II, para os demais a maior dose aplicada foi de 1800 kg ha⁻¹.

4.4 Análises estatísticas

Os resultados foram estudados pela análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$); e quando os efeitos foram significativos, foi feito o ajuste dos dados por análise de regressão. O ajuste foi feito para a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) e para a quantidade de P absorvido (P-abs) de acordo com o teor de fósforo no solo extraído pelas soluções de Mehlich-1(M1) e Mehlich-3(M3). Foram utilizadas como variável dependente, a produção de massa seca ou P absorvido e como variável independente, o P extraído do solo. Sempre que possível foi ajustada a função polinomial de segundo grau entre as variáveis. Assim, quando o ajuste foi quadrático, o teor de P no solo para a máxima eficiência técnica (MET) foi obtido igualando-se a zero a primeira derivada da função. Para os solos em que apenas funções lineares foram significativas, adotou-se o maior valor de P do intervalo como representativo da máxima produção.

A taxa de incremento de MSPA por unidade de P₂O₅ aplicado foi obtida pelo coeficiente angular (b) da equação polinomial, ajustada entre as quantidades de aplicadas de P₂O₅ e a produção de massa seca.

A quantidade necessária de P₂O₅ para aumentar 1 mg kg⁻¹ na análise foi quantificada por meio do inverso do coeficiente angular (1/b) da equação linear ajustada entre as doses de fósforo aplicado (variável

independente) e teores de P extraídos pelas soluções de Mehlich-1 e Mehlich-3 (variável dependente). Esta informação foi obtida individualmente para cada solo, e foram consideradas apenas as doses utilizadas no primeiro cultivo, com amostragens feitas 35 dias após a aplicação dos tratamentos.

Foram feitas análises de correlação linear simples de Pearson entre os atributos dos solos que refletem o poder tampão de P, com as medidas do P-remanescente e os teores de argila. As correlações entre o P absorvido e o fósforo extraído por Mehlich-1 e Mehlich-3 foram feitas separando os solos em quatro classes de argila conforme CQFS-RS/SC (2004), quando a textura do solo foi utilizada como índice do poder tampão do solo. Por outro lado, quando utilizado o P-remanescente como índice, a separação foi feita por tentativa, optando-se pelas faixas que apresentaram os maiores coeficientes de correlação.

A comparação entre métodos e, entre cultivos, foi feita pelo teste t-Student para médias pareadas. Além disso, os métodos também foram comparados pelo teste de linhas de regressão linear, sendo os valores dos parâmetros “a” (intersecção) e “b” (declividade) comparados com os valores ideais de 0 (zero) e 1, respectivamente, pelo teste do limite de confiança a 95% (Miller & Miller, 2005).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Descrição geral dos solos

Os solos selecionados apresentaram grande variação em seus atributos químicos e físicos, e atenderam à premissa de ampla variabilidade, incluindo os principais tipos encontrados no Rio Grande do Sul (Tabela 2 e 3). Todos os atributos avaliados apresentaram alto coeficiente de variação entre os solos (>45%), o que evidencia uma grande amplitude de valores, que também pode ser constatada pelos valores extremos (máximo e mínimo) determinados. Para seleção ou mudança de extrator químico, cuja finalidade é prever a disponibilidade de nutriente às plantas, ou de um índice para separação dos solos em classes para fins de recomendação de adubação, é necessária a utilização de um grande número de solos (Silva & Raij, 1999; Bortolon, 2005; Silva et al., 2008). Os solos selecionados devem contemplar, principalmente, os tipos mais abrangentes e os de maior relevância agrônoma de uma região de interesse, em que se pretende implantar ou modificar o sistema de recomendação de adubação.

A utilização de amplo número de solos é necessária para se avaliar, dentre os métodos em teste, o que melhor se ajusta aos solos de uma determinada região. O uso de solos com ampla variabilidade aumenta a probabilidade de identificação de solos que se comportam de modo discrepante dos demais (*outliers*) num processo de seleção de um método ou índice. Também, existe a possibilidade de ocorrência de solos que são classificados como semelhantes para um determinado parâmetro por um método ou índice, quando na prática são diferentes. Essas inconsistências podem ser identificadas nos experimentos de correlação, os quais fornecem informações para escolha dos métodos ou índices mais adequados aos solos da região de abrangência do sistema de recomendação (Sims & Johnson, 1991).

Tabela 2. Caracterização física e química dos solos utilizados nos estudos⁽¹⁾

Nº	Legenda	Solo Classificação ⁽²⁾	Local de coleta	pH	MOS	H+Al	CTC	Argila	Silte	Areia	P
					g dm ⁻³	... cmol _c dm ⁻³ g kg ⁻¹				mg dm ⁻³
1	PVA-1	Argissolo Vermelho- Amarelo	Cachoeira do Sul	5,5	35	3,5	23,1	256	454	290	13,7
2	PVA-2	Argissolo Vermelho- Amarelo Distrófico	Tupanciretã	4,8	12	4,1	5,6	162	44	794	11,2
3	PVA-3	Argissolo Vermelho- Amarelo	São Gabriel	5,2	26	5,5	11,8	248	157	595	9,6
4	RR	Neossolo Regolítico	Bagé	5,2	44	5,5	17,3	271	237	492	8,2
5	MEk	Chernossolo Ebânico Carbonático	Aceguá	5,8	41	3,7	22,0	510	371	119	9,0
6	VEo2	Vertissolo Ebânico Órtico	Uruguaiana	5,9	58	2,9	29,6	460	366	174	8,0
7	MEo	Chernossolo Ebânico Órtico	Caçapava do Sul	5,5	48	6,2	20,4	289	406	305	7,0
8	SXe	Planossolo Háplico Eutrófico	Cachoeira do Sul	5,9	24	3,1	12,7	109	239	652	10,0
9	MXo	Chernossolo Háplico Órtico	Taquara	6,2	27	1,8	16,0	130	18,8	682	33,9
10	CHa1	Cambissolo Húmico Alumínico	São Francisco de Paula	4,8	100	27,4	28,0	190	672	138	4,9
11	CX	Cambissolo Háplico	Carlos Barbosa	5,2	28	5,2	10,1	351	376	273	7,6
12	LVd-1	Latossolo Vermelho distrófico	Passo Fundo	4,7	28	10,3	13,1	354	132	514	4,9
13	LVaf	Latossolo Vermelho Aluminoférrico	Erechim	4,3	46	23,1	25,2	641	311	48	5,9
14	NVdf	Nitossolo Vermelho Distroférrico	Rodeio Bonito	5,5	28	3,5	10,5	510	379	111	4,3
15	LVdf	Latossolo Vermelho Distroférrico	Boa Vista das Missões	4,8	31	4,9	9,8	690	25	60	5,1
16	PBAC	Argissolo Bruno- Acizentado	Soledade	4,8	46	14,6	20,6	478	225	297	8,0
17	PVd	Argissolo Vermelho Distrófico	Viamão	5,2	13	2,0	3,5	90	57	853	3,8
18	LVef	Latossolo Vermelho Eutrófico	Ibirubá	5,5	33	3,9	12,5	412	265	323	10,6
19	LVd-2	Latossolo Vermelho distrófico	Cruz Alta	4,8	29	5,2	8,2	458	13	412	4,4
20	CHa-2	Cambissolo Húmico Alumínico	Vacaria	4,7	56	14,6	18,4	573	249	178	5,9
	Média			5,2	38	7,6	15,9	359	250	365	8,8
	Mediana			5,2	32	5,0	14,5	352	244	301	7,8
	⁽³⁾ CV (%)			9,0	51	93	46	50	69	72	73
	⁽⁴⁾ Máx.			6,2	100	27,4	29,6	690	672	853	33,9
	⁽⁵⁾ Mín.			4,3	12	1,8	3,5	90	13	48	3,8

⁽¹⁾ MOS - matéria orgânica do solo por digestão úmida, H+Al por solução SMP; CTC a pH 7,0 e P original extraído por Mehlich-1 de acordo com (Tedesco et al., 1995); argila, silte e areia pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997);⁽²⁾ Classificação de acordo com EMBRAPA (2006); ⁽³⁾ Coeficiente de variação em torno da média; ⁽⁴⁾ valor máximo determinado; ⁽⁵⁾ valor mínimo determinado.

Os teores de argila dos solos com suas respectivas medidas de tendência central e dispersão são apresentados na Tabela 2. A distribuição de acordo com as classes de argila e as faixas de teor de fósforo disponível, conforme a CQFS-RS/SC (2004), estão descritas na Tabela 4. Os teores de argila variaram 90 a 690 g kg⁻¹, sendo estes os valores extremos determinados para o PVd-Viamão e LVdf-Boa Vista das Missões, respectivamente. Desta forma, a amplitude de valores de argila foi de 600 g kg⁻¹, tendo como mediana o valor de 352 g kg⁻¹. A distribuição dos solos em classes de tamponamento utilizando-se o teor de argila como índice foi a seguinte (Tabela 4): 2 solos na classe I (>60%); 6 solos na classe II (40 a 60%); 7 solos na classe III (21 a 40%) e 5 solos na classe IV (0 a 20%). Os teores originais de fósforo dos solos extraídos pela solução de Mehlich-1 foram separados em faixas de fertilidade, e sua distribuição foi a seguinte: “Muito baixo” (3 solos); “Baixo” (8 solos); “Médio” (7 solos) e “Alto” (1 solo). Com esta distribuição verifica-se que os solos apresentam, em sua maioria, média e alta probabilidade de resposta à aplicação de fertilizante fosfatado, pois dezenove dos vinte solos escolhidos possuem teores de P menores que o nível crítico.

Os valores de P-remanescente (P-rem) dos solos, nas três concentrações testadas (60, 80 e 100 mg L⁻¹) são apresentados na Tabela 3. Embora a magnitude dos valores seja diferente, os valores de P-rem nas diferentes concentrações tiveram alto grau de associação entre si ($r > 0,99^{***}$). Em virtude disso, na etapa inicial de discussão serão consideradas apenas as medidas obtidas na concentração de 60 mg L⁻¹, a mesma utilizada para classificação dos solos no estados de Minas Gerais (Alvarez et al., 1999), Acre (Wadt & Silva, 2011) e na região dos Cerrados (Souza & Lobato, 2002). Posteriormente, serão discutidas as relações entre as diferentes concentrações de P testadas e os atributos dos solos relacionados ao poder tampão de P, de modo a identificar a concentração que melhor se ajusta aos solos do RS.

Os solos apresentaram diferentes capacidades de adsorção de P, obtendo-se uma grande amplitude de valores de P-rem (60 mgL⁻¹) (Tabela 3). A média dos vinte solos foi de 17,6 mg L⁻¹ e o coeficiente de variação de 73,1%, com valores extremos de 0,5 mg L⁻¹ para o Cambissolo Húmico alumínico (CHa1-São Francisco de Paula) e 47,5 para o Argissolo Vermelho

Tabela 3. Atributos químicos e medidas relacionadas ao poder tampão de fósforo dos solos utilizados nos estudos⁽¹⁾

Nº	Solo	P	P	P	Fe	Fe	Fe	Al	Al	Fe _{OX} /Fe _{DCB}	Mn	CMAP	k	FCP
		rem 60	rem 80	rem 100	DCB	OX	total	DCB	total		total			
		mg L ⁻¹			g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹		L mg ⁻¹		
1	PVA-1	16,4	25,2	33,1	19,9	6,6	55,5	0,41	4,4	0,33	130,0	385,3	0,0341	9,9
2	PVA-2	29,8	45,6	59,5	3,9	0,6	11,9	0,18	2,1	0,15	20,0	132,8	0,0434	6,5
3	PVA-3	23,9	36,9	50,5	6,2	2,9	23,9	0,24	3,5	0,48	60,0	222,4	0,0373	4,1
4	RR	26,4	40,3	53,8	5,5	3,9	27,0	0,31	3,7	0,72	50,0	225,3	0,0262	3,9
5	MEk	22,6	33,4	47,5	4,1	3,4	25,3	0,25	4,7	0,84	40,0	285,6	0,0311	5,7
6	VEo2	19,2	27,8	39,4	4,7	4,7	38,7	0,19	3,6	1,00	250,0	306,0	0,0285	7,2
7	MEo	18,3	26,8	37,6	11,7	8,2	42,6	0,24	3,1	0,70	130,0	491,1	0,0146	8,4
8	SXe	39,3	57,2	74,1	1,3	1,2	6,6	0,09	1,1	0,98	30,0	63,5	0,0746	1,5
9	MXo	33,8	51,3	65,4	9,2	1,9	36,7	0,20	2,3	0,21	90,0	142,1	0,0329	3,8
10	CHa-1	0,5	0,3	0,5	14,6	11,0	41,3	1,75	6,9	0,75	20,0	1926,8	0,1283	43,1
11	CX	14,7	22,4	33,8	16,9	4,9	67,7	0,43	3,7	0,29	290,0	477,7	0,0290	5,2
12	LVd-1	7,7	13,7	25,3	11,1	2,3	33,9	0,42	5,1	0,21	30,0	511,9	0,0475	7,9
13	LVaf	1,9	4,0	7,8	42,4	4,0	133,3	1,45	10,2	0,09	90,0	893,3	0,0754	18
14	NVdf	13,4	23,2	33,0	48,6	4,7	159,4	0,72	7,3	0,10	260,0	341,1	0,0593	10,2
15	LVdf	7,9	12,8	23,5	43,0	4,5	128,3	0,74	10,1	0,11	100,0	611,3	0,0474	9,9
16	PBAC	4,9	9,4	15,7	11,3	1,9	36,2	0,52	5,8	0,18	20,0	578,6	0,0705	10,2
17	PVd	47,5	65,5	84,2	1,4	0,3	4,5	0,08	0,7	0,20	10,0	64,2	0,0117	1,3
18	LVef	14,1	18,5	32,1	34,3	5,8	142,2	0,52	6,1	0,17	230,0	427,1	0,0334	7,7
19	LVd-2	7,7	11,2	21,9	20,7	3,3	61,8	0,45	6,6	0,16	50,0	539,3	0,0517	8,8
20	CHa-2	3,0	6,7	10,0	15,3	2,4	54,4	1,10	7,8	0,16	40,0	831,5	0,0696	39,0
	Média	17,6	26,6	37,4	16,3	3,9	56,6	0,51	4,9	0,40	97,0	472,8	0,0	10,6
	Mediana	15,5	24,2	33,4	11,5	3,6	40,0	0,41	4,5	0,21	55,0	406,2	0,0403	7,8
	⁽²⁾ CV(%)	73,1	68,7	59,7	89,3	66,2	82,4	87,1	54,0	80,5	92,8	87,2	56,8	104,2
	⁽³⁾ Máx.	47,5	65,5	84,2	48,6	11	159,4	1,75	10,2	1,0	290	1926,8	0,1283	43,1
	⁽⁴⁾ Mín.	0,5	0,3	0,5	1,3	0,3	4,5	0,08	0,7	0,09	10	63,5	0,0117	1,3

⁽¹⁾P-rem - P remanescente nas concentrações de 60, 80 e 100 mg L⁻¹, Fe_{DCB} - Fe por ditionito citrato bicarbonato (Mehra & Jackson, 1960); Fe_{OX} - Fe por oxalato de amônio (Schwertmann, 1964); Fe_{OX}/Fe_{DCB} - relação Fe oxalato e Fe ditionito; Fe, Al e Mn total por ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997); CMAP- capacidade máxima de adsorção de fósforo pela isoterma de Langmuir; k- constante relacionada à energia de ligação obtida pela equação de Langmuir, FCP- fator capacidade de fosfato obtido pelo coeficiente linear (b1) da equação quadrática entre P-sorvido e P-dessorvido (Fox & Kamprath, 1970); ⁽²⁾Coeficiente de variação em torno da média; ⁽³⁾valor máximo encontrado; ⁽⁴⁾valor mínimo encontrado.

distrófico (PVd-Viamão). O coeficiente de variação entre as medidas de P-rem foi superior àquele encontrado na determinação de argila (P-rem - 73,1% e argila - 49,8%), o que demonstra maior dispersão dos dados em torno da média para essa medida, embora ambos os coeficientes tenham sido muito altos. Os valores de P-rem e argila geralmente se correlacionam de forma negativa (Alcântara et al., 2008; Bonfim et al., 2004; Broggi et al., 2010) por ser o P-rem uma medida do fósforo não adsorvido (Novais et al., 2007). Parte-se do pressuposto que quanto maior for o teor de argila, maior será o poder de adsorção de P do solo. Assim, os valores de P-rem, em geral, serão menores em solos mais argilosos. Entretanto, antes mesmo de se efetuar uma análise criteriosa dos dados, é possível verificar que essa premissa é verdadeira para o solo PVd-Viamão que apresentou o menor teor de argila (90 g kg^{-1}) e o maior valor de P-rem ($47,5 \text{ mg L}^{-1}$). Porém, o menor valor de P-rem foi determinado no solo CHa-1 ($0,48 \text{ mg L}^{-1}$), classificado como arenoso (190 g kg^{-1} - classe IV) pelo atual sistema de classificação baseado em classes de teor de argila. Entretanto, este solo quando classificado com base nos valores de P-rem é enquadrado na classe de maior tamponamento (Alvarez et al., 1999; Sousa & Lobato 2002). Esse é o primeiro indício de que pode haver incongruências na classificação dos solos do estado do Rio Grande do Sul, quando se utilizam diferentes índices do poder tampão de P.

Tabela 4. Distribuição dos solos utilizados nos estudos conforme a classe de argila e interpretação do fósforo disponível por Mehlich-1

Faixa de Interpretação	Classes de solos pelo teor de argila				Total p/ faixa
	0 a 20%	21 a 40%	40 a 60%	> 60%	
 Frequência por classe				
Muito baixo	2	1	-	-	3
Baixo	2	4	2	0	8
Médio	-	2	3	2	7
Alto	1	-	1	-	2
Muito alto	-	-	-	-	0
Total por classe	5	7	6	2	20

* Classificação de acordo com o Manual de Adubação e Calagem para RS e SC (CQFS-RS/SC, 2004).

5.2 Relações entre P-remanescente e argila

Houve correlação negativa entre P-rem e argila, tanto para o conjunto de solos utilizados na condução dos experimentos ($r = -0,70^{**}$) (Tabela 5), como também para os solos (200 amostras) selecionados dentre as amostras enviadas por produtores ao laboratório de rotina ($r = -0,67^{**}$) (Figura 3). A significância da correlação indica que existe dependência estatística no relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias independentes, sem, necessariamente, implicar em relação causa efeito. A dependência estatística entre P-remanescente e argila, embora com valor de coeficiente moderado ($0,4 < r < 0,7$), permite inferir que existe uma tendência de variação conjunta e antagônica dos dados. Pode-se dizer que, quanto maior o teor de argila, menor será o valor de P-remanescente. Se o coeficiente de correlação entre as variáveis for considerado satisfatório, é possível afirmar que há semelhança na classificação dos solos por ambos os índices. Nesse caso, o uso de um ou de outro índice é indiferente. Esse procedimento é atualmente utilizado em Minas Gerais (Alvarez et al., 1999) e na região dos Cerrados (Sousa & Lobato, 2002). Nesses Estados existe uma tabela de dupla entrada, em que é possível classificar os solos tanto pelo teor de argila como pelo valor de P-remanescente.

Os teores críticos de fósforo (Mehlich-1) para os solos dos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina foram definidos com base em experimentos de calibração, com o teor de argila como critério auxiliar para estimar o poder tampão de P dos solos (Anghinoni & Bohnen, 1974). A condução destes experimentos demandou a participação de diversas instituições de pesquisa e foi um processo oneroso e demorado (Mielniczuk et al., 1969; Siqueira et al., 1987; Comissão...1989). Em hipótese de mudança do índice do poder tampão do solo de argila para P-remanescente, deve-se pensar na forma como serão atribuídos os teores críticos para o novo índice a ser utilizado. A condução de experimentos de calibração para obtenção desses valores, nas condições atuais, é difícil, tendo em vista a dificuldade de execução. Assim, a proposição de teores críticos de P para outro índice do poder tampão do solo deverá ser feita com base em valores já existentes, determinados de acordo com o teor de argila. Desse modo, no caso de uma relação estreita entre argila e P-remanescente, as faixas de P-rem poderiam

ser estabelecidas tendo por base a equação matemática existente entre as medidas.

A relação entre P-remanescente e argila foi descrita por uma curva exponencial decrescente, tanto para as vinte unidades selecionadas para condução de experimentos (Figura 2), quanto para um número maior de solos oriundos de vários locais do Rio Grande do Sul (Figura 3), com coeficiente de determinação de 0,54 e 0,73, respectivamente. Com base na relação matemática existente entre as variáveis, os teores críticos para um hipotético uso do P-remanescente como índice do poder tampão de P poderiam ser definidos. Os teores de argila utilizados para estabelecer as atuais classes poderiam ser inseridos na equação ajustada, dando origem a valores de P-remanescente correspondentes. Esses valores possibilitariam a elaboração de uma tabela de interpretação do índice P-remanescente que utilizaria os mesmos teores críticos de P no solo definidos para as diferentes classes de argila. Entretanto, se a disposição dos pontos no gráfico for analisada mais detalhadamente, verifica-se que a equação exponencial ajustada pode ser inadequada para esse propósito, não obstante o alto coeficiente de determinação ($R^2=0,73$). Isso porque há uma elevada dispersão de pontos na faixa de 20 a 60% de argila, com um intervalo de 40% de argila e menos de 15

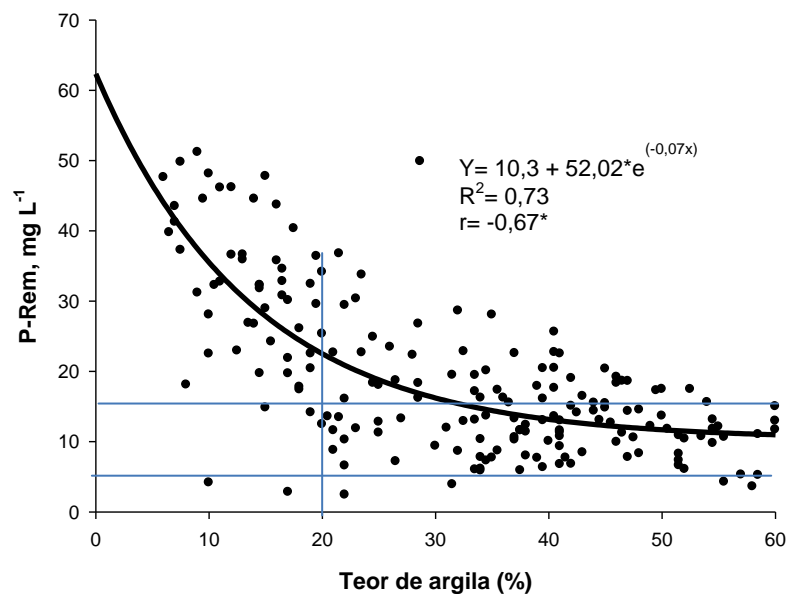


Figura 3. Valores de P-remanescente (60 mg L^{-1}) em função do teor de argila de solos provenientes de diferentes regiões do estado do Rio Grande do Sul (200 amostras).

mg L⁻¹ de P-remanescente de amplitude. Portanto, o raciocínio estatístico não se aplica nesse caso (Figura 3). Ou seja, o P-remanescente para os solos aqui estudados não se relaciona adequadamente à classe textural. Dessa forma, a tabela a ser proposta pela equação não seria adequada, pois acarretaria em erros interpretativos pela baixa sensibilidade desse ajuste. Pela curva exponencial, as classes de P-rem seriam assim ajustadas: classe I (0 a 10 mg L⁻¹); classe II (10,1 a 13 mg L⁻¹); classe III (13,1 a 23 mg L⁻¹) e classe IV (23,1 a 60 mg L⁻¹). Por esta classificação é possível constatar que uma pequena variação de apenas 3 mg L⁻¹ de P determinado no extrato poderia classificar o solo como classe I, o equivalente a > 60% de argila, ou classe III (21 a 40% de argila). Além disso, pela pequena amplitude de valores, a probabilidade de se enquadrar solos na classe II fica muito reduzida, justamente a classe de maior frequência dos solos dos estados do RS e de SC (Bissani et al., 2004).

A equação ajustada entre argila e P-remanescente partiu da premissa que os valores de P-remanescente são dependentes dos teores de argila, considerada como variável independente no ajuste da equação. Entretanto, esta pressuposição parte do princípio que o teor de argila é o melhor índice do poder tampão do solo, o que pode não ser verdadeiro. Por outro lado, se o P-remanescente fosse estreitamente relacionado à classe textural, é de se questionar qual seria a vantagem em substituir um índice pelo outro, ou mesmo o uso de ambos para classificação dos solos. O uso de ambos os índices não traria nenhuma vantagem ao laboratório de análises; ao contrário, seria inclusa uma nova medida no conjunto de análises. Por outro lado, o técnico teria dois índices de poder tampão de P para balizar-se na classificação. Porém, em casos dúbios, como o citado para o Cambissolo Húmico (CHa1-São Francisco de Paula) e, em muitos outros casos que por ventura aparecerem, o uso de dois índices poderá gerar confusão e suscitará dúvida de qual deles utilizar, uma vez que a classificação pode ser muito diferente. Além disso, em caso de estreita relação entre argila e P-remanescente, a única vantagem deste é sua operacionalidade, menos laboriosa e onerosa que a determinação da argila. Entretanto, como a relação entre as medidas não foi satisfatória, cabe definir, com base nos atributos dos solos relacionados ao poder tampão de P, qual dos índices é o melhor indicador para os solos do RS e SC.

5.3 Relações do P-remanescente e argila com medidas associadas ao poder tampão dos solos

5.3.1 Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP)

A capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), medida que reflete o potencial sortivo do solo apresentou ampla variação, tendo magnitude entre os solos extremos superior a trinta vezes (Tabela 3). Os valores de CMAP aumentaram de 63,5 a 1926,8 mg kg⁻¹, para os solos SXe-Cachoeira do Sul e CHa1-São Francisco de Paula, respectivamente, com mediana de 472,8 mg kg⁻¹. Na prática, metade dos solos selecionados apresentam CMAP superior a 950 kg ha⁻¹ ou 2.175 kg ha⁻¹ de P₂O₅, o que reflete o forte caráter drenado de P destes solos. O maior valor de CMAP encontrado equivale a uma adsorção de aproximadamente 9.000 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Este solo (CHa-1) apresentou um poder de adsorção de fósforo de 10,1 mg g⁻¹ de argila, valor que é muito superior ao solo LVaf-Erechim que apresentou o segundo maior poder de adsorção (893 mg kg⁻¹), em que a relação foi 1,39 mg g⁻¹ de argila. Um aspecto interessante do CHa1-São Francisco de Paula é que mesmo possui baixo teor de argila (190 g kg⁻¹), enquanto o LVaf apresenta 641 g kg⁻¹. Isto evidencia a importância de informações relacionadas à mineralogia da fração argila e não somente quantitativas. Solos desse tipo atuam como “buracos negros” de P, como referido por Novais et al. (2007), e a viabilização da produção agrícola dos mesmos é uma tarefa onerosa, pois há exigência de grandes investimentos em adubações fosfatadas, além de práticas de manejo que evitem a exposição demasiada do fósforo aplicado aos sítios de adsorção, ávidos por este elemento (Sousa et al., 2010).

A CMAP correlacionou-se significativamente com os valores de P-remanescente, porém não teve significância estatística com os teores de argila (Tabela 5). Houve um alto grau de associação ($r = -0,74^{**}$) entre P-rem e CMAP, o que já era esperado, uma vez que a medida do P-rem é um ponto dentre os utilizados na isoterma de adsorção para determinação da CMAP, como já demonstrado por outros estudos (Boschetti et al., 1998; Vilar, et al., 2010; Broggi et al., 2011). Esses resultados contradizem outros estudos em que correlações com alto grau de significância foram obtidas com teor de argila (Ranno et al., 2005; Corrêa et al., 2011; Pinto, 2012). Por outro lado, a falta de

significância com os teores de argila ($r=0,26^{ns}$) indica que o poder sortivo do solo pode ser reflexo, não apenas de uma simples medida da proporção relativa de partículas de pequeno tamanho existentes no solo, mas também da mineralogia das mesmas. Isso pode ser observado pela correlação significativa ($r=0,71^{**}$) existente entre a CMAP e os teores de Fe de baixa cristalinidade (Fe_{Ox}). A inexistência de correlação entre argila e a CMAP neste estudo pode ser devido ao grande número e a diversidade mineralógica dos solos utilizados. Solos com características mineralógicas semelhantes devem apresentar um alto grau de associação entre a CMAP e teor de argila. Se não há diferenças substanciais no potencial de adsorção das partículas da fração argila, o aumento do teor das mesmas vai resultar em acréscimo proporcional da superfície de adsorção (Novais et al., 2007). Entretanto, para solos desenvolvidos sobre diferentes materiais de origem, contendo argilominerais de diferentes atividades e de grau de intemperismo variados, a relação entre o teor de argila e CMAP pode não ser linear, como ocorrido em nosso estudo.

Há de se considerar que análise de correlação é muito sensível a valores extremos, como o encontrado para o solo CHa-1, o qual possui baixo teor de argila e elevada CMAP. Assim, quando este solo foi eliminado da correlação, o coeficiente entre teor de argila e CMAP foi significativo ($r=0,77^{**}$). Por outro lado, o valor do coeficiente de correlação entre P-rem e a CMAP, quando preterido o solo CHa-1, se elevou para $r=0,95^{***}$, mantendo-se, portanto, superior ao da argila.

5.3.2 Matéria orgânica

A CMAP correlacionou-se positiva e significativamente com os teores de matéria orgânica do solo (MOS) ($r=0,83^{**}$) (Tabela 5). A matéria orgânica pode ter papel ambivalente em relação à adsorção de P nos solos. Ácidos orgânicos liberados na decomposição da biomassa vegetal podem diminuir a adsorção/precipitação de fosfato por competição pelos sítios de adsorção, ou por complexação do Fe e o do Al na solução do solo pelos ácidos húmicos, reduzindo, conseqüentemente, a adsorção (Andrade et al., 2003; Cessa et al., 2010). Porém, a atuação dessas substâncias é paliativa no solo, devido a sua rápida mineralização, e necessitam ser produzidas constantemente para serem eficientes. Silva et al. (1997) encontraram

Tabela 5. Coeficientes de correlação (r) simples de Pearson entre P-remanescente e argila contra atributos dos solos relacionados ao poder tampão⁽¹⁾

	P-rem	Fe _{DCB}	Fe _{OX}	Fe _{total}	Al _{total}	Al _{DCB}	Fe _{ox} /Fe _{dcb}	CMAP	k	FCP	MOS
Argila	-0,71 ^{**}	0,66 ^{**}	0,11 ^{ns}	0,67 ^{**}	0,85 ^{**}	0,43 ^{ns}	-0,30 ^{ns}	0,26 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,19 ^{ns}
P-rem	-	-0,57 ^{**}	-0,50 ^{**}	-0,53 ^{**}	-0,86 ^{**}	-0,75 ^{**}	0,28 ^{ns}	-0,74 ^{**}	-0,54 [*]	-0,65 ^{**}	-0,57 ^{**}
Fe _{DCB}		-	0,32 ^{ns}	0,98 ^{**}	0,81 ^{**}	0,54 [*]	-0,56 [*]	0,30 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Fe-ox			-	0,33 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,52 [*]	0,28 ^{ns}	0,71 ^{**}	0,29 ^{ns}	0,48 [*]	0,72 ^{**}
Fe-total				-	0,76 ^{**}	0,47 [*]	-0,49 [*]	0,24 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Al-total					-	0,78 ^{**}	-0,41 ^{ns}	0,61 [*]	0,49 [*]	0,55 [*]	0,38 ^{ns}
Al _{DCB}						-	-0,2 ^{ns}	0,88 ^{**}	0,79 ^{**}	0,87 ^{**}	0,68 ^{**}
Fe _{OX} /Fe _{DCB}							-	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,03 ^{ns}
CMAP								-	0,78 ^{**}	0,88 ^{**}	0,83 ^{**}
k									-	0,74 ^{**}	0,60 ^{**}
FCP										-	0,78 ^{**}

^{ns}, ^{**}, ^{*}, não significativo, significativo a 1 e 5% de probabilidade de erro pelo teste t, respectivamente. P-rem = P remanescente (60 mg L⁻¹); Fe_{DCB} e Al_{DCB} = Fe e Al por ditionito citrato bicarbonato; Fe_{OX} = Fe por oxalato de amônio; Fe_{OX}/Fe_{DCB} = relação Fe oxalato e Fe ditionito; Fe e Al total = por ataque sulfúrico; CMAP = capacidade máxima de adsorção de fósforo; k = constante relacionada à energia de ligação; FCP = fator capacidade de fosfato.

correlação negativa entre a CMAP e teor de MOS ($r = -0,71^*$), porém sob um mesmo solo cultivado com diferentes adubos verdes. Por outro lado, Fink (2012) estudou solos conduzidos em sistema plantio direto por longo período e verificou aumento no teor de carbono na camada superficial, porém, em quantidade insuficiente para possibilitar a redução da adsorção de fósforo nos solos nesse sistema de manejo. Segundo o autor, a CMAP foi dependente dos teores de Fe relativo aos óxidos de Fe pedogênicos e às concentrações de goethita e ferrihidrita. A MOS pode adsorver fósforo pelos compostos ternários (Parafit, 1978) e também diminuir a cristalização dos óxidos de ferro, o que acarreta em maior superfície de adsorção (Schwertmann et al., 1986). Esta é uma possível explicação para a correlação positiva entre a MOS e CMAP, uma vez que houve correlação significativa entre a matéria orgânica e os óxidos de ferro de origem pedogênica de baixa cristalinidade (Fe_{OX}) ($r = 0,72^*$) e ausência de significância com a totalidade destes óxidos (Fe_{DCB}) ($r = 0,03^{ns}$).

O acúmulo de MOS no solo pode se dar por condições intrínsecas do ambiente, sendo muito influenciada pela umidade e temperatura local, que afetam a atividade microbiana (Silva & Mendonça, 2007). Além disso, a mineralogia do solo é importante na estabilização química e proteção física da MOS, o que impede o acesso enzimático da microbiota, facilitando o acúmulo desta fração no solo (Kleber et al., 2005). Assim, a correlação positiva observada entre a MOS e a CMAP pode ser devido à MOS estar associada à fração inorgânica do solo, que é, também, a principal responsável pela adsorção de fósforo, uma vez que a significância da correlação não indica causa e efeito, apenas expressa tendência de variação conjunta.

5.3.3 Óxidos de Fe e Al

O grau de associação entre o P-remanescente e o teor total de Fe (Fe_{DCB}) e de Al pedogênicos foi baixo, embora com coeficientes de correlação significativos ($r = -0,57^*$; $r = -0,75^*$, respectivamente), bem como entre esse e o Fe de baixa cristalinidade (Fe_{OX} ; $r = -0,50^*$). Por outro lado, os teores argila correlacionaram-se apenas com o Fe_{DCB} ($r = 0,66^{**}$) (Tabela 5). O teor de Fe pedogênico variou de 1,3 a 48,6 g kg⁻¹, respectivamente para o solo Sxe e NVdf. Já o teor de Fe de baixa cristalinidade (Fe_{OX}) variou de 0,29 a 11,0 g kg⁻¹, para o solo PVd e CHa1, respectivamente. Os elevados teores de Fe_{OX} no

solo CHa1, superior em aproximadamente três vezes a média dos demais, pode explicar sua elevada CMAP ($> 9.000 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5), embora este solo possua um teor de argila baixo. A elevada superfície específica dos óxidos de Fe mal cristalizados contribui muito para a adsorção de P (Donagemma et al., 2008). Além disso, a substituição isomórfica do Fe por Al nos oxihidróxidos provoca desarranjo estrutural pela redução do tamanho da célula unitária e contribui para o aumento da superfície específica e da adsorção de P (Rolim Neto et al., 2004; Fernández et al., 2008).

A adsorção de fósforo é fenômeno complexo e depende de muitos fatores intrínsecos a cada solo, do ambiente e do manejo atribuído ao solo. Porém, de modo geral, adsorção do fosfato se dá principalmente aos oxihidróxidos de ferro e alumínio, em formas de baixa cristalinidade (Fe_{OX} e Al_{OX}) com alto desbalanço de cargas (Hernández & Meurer, 1998, Ranno, et al., 2004; Donagemma et al., 2008; Fink, 2012), embora a totalidade de Fe e de Al de origem pedogênica (Fe_{DCB} e Al_{DCB}) e argilominerais, como a caulinita, também possam influenciar significativamente na adsorção de fósforo. Em estudos de correlação do fósforo adsorvido com atributos dos solos Villar et al. (2010) encontraram correlações significativas com os óxidos de Fe de maior cristalinidade (Fe_{DCB}), porém sem significância com os óxidos de baixa cristalinidade, enquanto Schaefer et al. (2004) encontraram significância apenas com o teor de gibsitita do solo.

Os óxidos de Fe cristalinos como a hematita, embora possuam menor potencial sortivo que os de baixa cristalinidade, são importantes pela sua abundância nos solos, podendo resultar em elevada capacidade de adsorção de fósforo. Isto se deve, principalmente, à aspectos quantitativos do que a qualitativos. A razão $\text{Fe}_{\text{OX}}/\text{Fe}_{\text{DCB}}$ que expressa o grau de cristalinidade, ou seja, a proporção de Fe de baixa cristalinidade em relação ao somatório dos óxidos de Fe pedogênicos, pode influenciar a adsorção de P. Segundo Kämpf (1988), quanto maior o valor desta relação, mais reativos são os óxidos do solo, o que resulta, conseqüentemente, em maior adsorção de P. Entretanto, a razão $\text{Fe}_{\text{OX}}/\text{Fe}_{\text{DCB}}$ foi um dos atributos dos solos que apresentou a menor correlação com a CMAP ($r=0,01$), assim como não se correlacionou com o P-remanescente ($r=0,28^{\text{ns}}$), nem tampouco com os teores de argila ($r=-0,30^{\text{ns}}$) (Figura 4). Esses dados se contrapõem aos de Gonçalves et al. (2011), que

encontraram correlação positiva ($r=0,97^{**}$) entre a relação Fe_{OX}/Fe_{DCB} e a capacidade máxima de adsorção de P em seis solos representativos do Rio Grande do Sul, dentre os mais utilizados para o cultivo de arroz.

Em análise mais detalhada evidenciou-se que a CMAP relaciona-se melhor com quantidade de Fe de baixa cristalinidade em detrimento à razão Fe_{OX}/Fe_{DCB} , quando é utilizado um grupo grande de solos heterogêneos (Tabela 5). Isto se deve, para alguns casos, ao efeito diluição do Fe_{OX} , como observado para o solo (LVef, NVdf, LVdf e LVaf) que apresentaram os menores valores da razão Fe_{OX}/Fe_{DCB} , muito embora, em valores absolutos, estes solos possuem teores de Fe_{OX} acima da média dos solos testados ($>3,9 \text{ g kg}^{-1}$). Todavia, mesmo com altos teores de Fe_{OX} , esses solos foram também os que apresentaram os maiores valores de Fe_{DCB} ($>30 \text{ g kg}^{-1}$). Como a quantidade de Fe_{DCB} é muito superior ao Fe_{OX} , o quociente retorna um número muito baixo, mesmo que esses solos tenham capacidade elevada de adsorção de fósforo.

5.3.4 Constante relacionada à energia de ligação (k)

A constante (k) relacionada à energia ligação do fósforo com a fase sólida do solo correlacionou-se com a CMAP ($r=0,78^{**}$) e com o P remanescente ($r=-0,54^*$), porém a correlação não foi significativa com os teores de argila ($r=-0,14^{ns}$). Esse parâmetro é obtido pela isoterma de Langmuir, tem caráter qualitativo e expressa a avides dos sítios de adsorção pelo fosfato. Esta medida, no entanto, pode ser sensível a pressuposições matemáticas do modelo, as quais nem sempre são verdadeiras (Novais & Smyth, 1999). As relações desse parâmetro com atributos dos diversos solos analisados conjuntamente, podem não ser significativas, uma vez que esse pode variar dentro de um mesmo solo. A energia de ligação é dependente do grau de saturação dos sítios de adsorção, diminuindo seu valor à medida que os estes são preenchidos. Assim, a utilização desse parâmetro parece ser mais adequada para estudos comparativos de tratamentos que afetam o “status” do P em solos com características semelhantes, como por exemplo, sistemas de cultivo sob diferentes manejos (Rheinheimer et al., 2003b). Oliveira (2010) construiu unidades experimentais com diferentes teores de argila, partindo da mistura de diferentes quantidades de um mesmo solo com areia, e obteve valores diferentes para o k, quando seriam esperados valores semelhantes,

caso a constante refletisse apenas a avidéz pelo fosfato. Entretanto, em nossos estudos, a medida do P-remanescente foi mais sensível a essa constante e representou melhor a avidéz dos sítios heterogêneos estudados, diferentemente da argila do solo que não apresentou sensibilidade.

5.3.5 Fator capacidade do solo

O fator capacidade de fósforo (FCP), que neste estudo foi considerado como o coeficiente angular (b_1) da equação quadrática ajustada entre o P-sorvido e P-desorvido é apresentado, para os solos utilizados, na Tabela 3. O coeficiente de variação entre os solos, para essa medida, foi elevado (104%), com valores de 1,3 a 43,1 para o solo PVd-Viamão e CHa1-São Francisco de Paula, respectivamente. O FCP é definido pela razão de equilíbrio entre o fator quantidade (Q- P lábil adsorvido) e o fator intensidade (I- P solução) e representa uma medida da capacidade do solo em manter um determinado nível de P em solução. Também pode ser compreendido como a resistência do solo a mudanças no fator intensidade (I), quando for adicionado ou retirado P do solo, comumente também denominado poder tampão de P (Novais et al., 2007). Embora calculado de diferentes modos, mantém-se a mesma nomenclatura (Muniz, et al., 1983; Shirvani et al., 2005; Marcolan, 2006; Pinto, 2012) e representa uma medida ou um índice da interdependência ($\Delta Q/\Delta I$) que existe entre a fase sólida e a solução do solo. Para solos com igual intensidade, o suprimento de fósforo às plantas é diretamente proporcional ao poder tampão do solo. Por outro lado, para solos com o mesmo Q, a disponibilidade às plantas é inversamente proporcional ao poder tampão, uma vez que menos P fica em solução pelo aumento do tamponamento.

O FCP teve um alto grau de associação com a CMAP ($r=0,88^{**}$), com a constante relacionada à energia de ligação ($r=0,74^{**}$) e com P-remanescente ($r= -0,65^{**}$). No entanto, o FCP não se correlacionou com os teores de argila ($r=0,26^{ns}$), nem tampouco com os teores de Fe (Tabela 5). A CMAP por representar o estoque máximo de fósforo (Q) que o solo pode reter (não necessariamente o disponível às plantas) possui uma estreita relação com o FCP, como demonstrado por estudos pretéritos (Muniz et al., 1983; Guilherme et al., 2000; Silva et al.; 2004; Novais et al., 2007). Solos com elevada CMAP tendem a reter o P mais fortemente aos sítios sortivos, o que pode ser

constatado pela correlação positiva com a constante de energia de ligação. Com isso, estes solos mantêm menores quantidades de P em solução, porém mais constantes. Desse modo, solos com elevada CMAP tendem a possuir relações Q/I mais elevadas, logo, são mais tamponados ou com maior fator capacidade.

A CMAP e o FCP são dependentes da quantidade e da qualidade da fração argila. A inexistência de correlação do FCP com a argila evidencia que somente uma medida quantitativa pode ser insuficiente para explicar a complexidade envolvida nos processos de adsorção e dessorção de fósforo no solo. Por outro lado, a medida do P-remanescente foi sensível à variação do FCP, muito em razão de ser a medida do P-rem uma dentre as várias utilizadas na determinação do FCP. Por mais que o FCP possa ser considerado uma medida real do poder tampão do solo, o qual é percebido pelas plantas, a sua utilização em escala de rotina é impraticável, por ser o procedimento analítico laborioso e demorado. Entretanto, o uso de medidas que se relacionem ao FCP e que sejam de fácil execução podem ser utilizadas em substituição ao mesmo na classificação dos solos. Nesse contexto, a medida do P-rem foi mais adequada que a determinação textural. Bonfim et al. (2004) estudaram seis solos do estado de Pernambuco e encontraram correlação significativa do FCP com argila e P-rem, porém os coeficientes de correlação (r) foram maiores para o P-rem, com valores de 0,67** e -0,91**, respectivamente.

O FCP aumentou e diminuiu linearmente na medida em que os teores de argila e os valores de P-rem aumentaram no solo, respectivamente (Figura 3). Entretanto, a regressão só foi significativa no ajuste do FCP com os teores de argila, quando dois solos com valores discrepantes foram eliminados. No ajuste com o P-rem, a regressão foi significativa mesmo sem excluir os solos discrepantes, porém o coeficiente de determinação foi superior quando estes foram eliminados. Com a eliminação dos solos, os coeficientes de determinação (R^2) foram 0,57 e 0,70, para o ajuste com os teores de argila e P-rem, respectivamente. Os solos excluídos foram os coletados nos campos de cima da serra, nos municípios de São Francisco de Paula e Vacaria e ambos são classificados como Cambissolo Húmico alumínico. Estes solos apresentaram valores de FCP aproximadamente quatro vezes maior que a

média dos demais, o que pode ter sido determinante para que não houvesse correlação entre argila e FCP.

Admitindo-se que a medida do FCP estima o real poder tampão do solo, a escolha do teor de argila e/ou do P-rem como índice desta medida pode resultar em classificações distintas, principalmente dos solos com valores discrepantes (*outliers*) (Figura 4). Os três solos que apresentaram os maiores valores de FCP foram o CHa1-São Francisco de Paula, CHa2 -Vacaria e LVaf-Erechim, com valores de 43,1, 39,0 e 18,0 (adimensional), respectivamente. Na classificação atual adotada pela CQFS-RS/SC (2004), que utiliza os teores de argila como índice, estes solos são classificados em três classes distintas de tamponamento, a saber: CHa-1 (Classe IV - 19% de argila), CHa-2 (Classe II - 57% de argila) e LVaf (Classe I - 64,1% de argila). Por outro lado, os três solos apresentaram os maiores valores de CMAP ($>3.500 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5) e os menores valores de P remanescente ($<3,0 \text{ mg L}^{-1}$). Portanto, caso se utilize a medida do P-rem como índice do poder tampão, os três solos estariam na classe de maior tamponamento (Classe I), o que é coerente com o elevado FCP dos mesmos. Com isso, o uso do P-rem como índice do poder tampão contornaria uma limitação do índice textural, que é a falta de sensibilidade à qualidade da fração argila do solo. O exemplo evidente é solo CHa-1 que recebeu classificação extremamente oposta quando utilizado o P-rem como índice, deslocando-se da classe IV, a de menor poder tampão pela classificação da argila, para a classe I se classificado pelo P-rem.

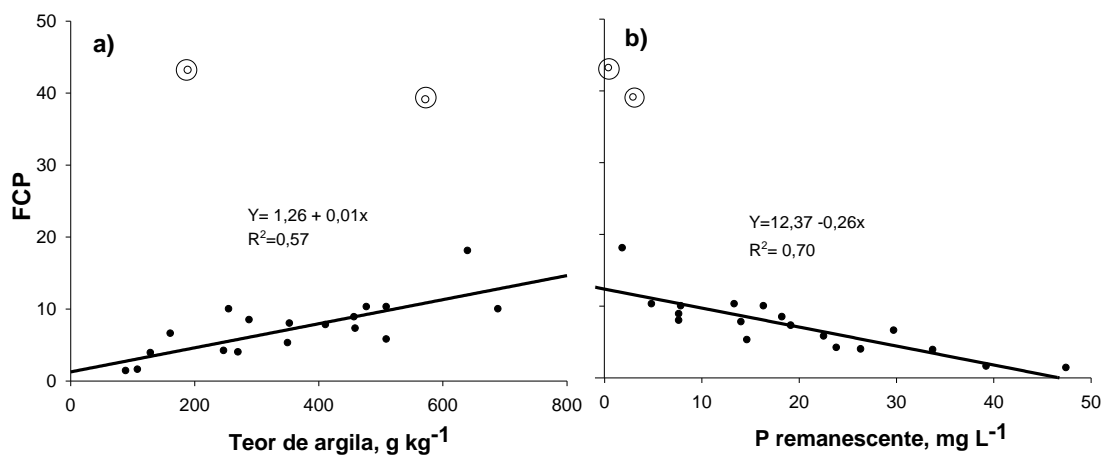


Figura 4. Regressão entre o fator capacidade de fósforo (FCP) e os teores de argila (a) ou os valores de P-remanescente (b). Os pontos circulados foram excluídos do cálculo da regressão e ambos os solos são classificados como Cambissolo Húmico aluminico (CHa-1 e CHa-2).

5.3.6 Quantidade de P_2O_5 necessária para aumentar P em 1 mg kg^{-1} de solo

As quantidades de P_2O_5 necessárias para aumentar 1 mg kg^{-1} de P nas análises pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3, decorridos 30 e 80 dias após a aplicação do fertilizante fosfatado são apresentadas na Tabela 6. Houve grande variação entre solos, com amplitude próxima a dez vezes entre valores extremos, independentemente do método de extração. As doses variaram de acordo com o poder tampão dos solos, aproximadamente de 7 a 70 kg ha^{-1} e de 8 a 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 para os métodos Mehlich-1 e Mehlich-3, respectivamente. A dose para aumentar 1 mg kg^{-1} é também denominada capacidade tampão de fosfatos (CTF) do solo (Lopes et al., 2004; Sousa et al., 2010), sendo considerada uma medida direta da sensibilidade do extrator Mehlich ao poder tampão do solo. Essa informação é de grande importância na definição de doses para se efetuar a adubação de correção, com objetivo de atingir o nível crítico de P nos solos (Schlindwein & Gianello, 2008). Segundo Sousa et al. (2010), para determinar a quantidade de fósforo necessária para atingir o nível crítico deste nutriente pode-se utilizar seguinte equação: dose de $P_2O_5 = (\text{teor desejado de P} - \text{teor atual de P}) \times \text{CTF}$.

Nos estados do RS e SC, em virtude da sensibilidade do extrator Mehlich-1 ao poder tampão, os solos são separados em quatro classes de tamponamento para interpretação do “P-disponível” (CQFS-RS/SC, 2004). Para cada classe, foi atribuído um teor crítico que varia de acordo com o teor de argila. Os teores críticos são: 6, 9, 12 e 21 mg dm^{-3} para as classes I, II, III e IV, respectivamente. Dentro de cada classe, os solos são ranqueados de acordo com o fósforo extraído por Mehlich-1 em faixas de fertilidade, em função da probabilidade de retorno econômico à aplicação de fertilizante fosfatado. As faixas são assim denominadas: “Muito baixo”, “Baixo”, “Médio”, “Alto” e “Muito alto”, em que o limite superior de cada faixa corresponde a 0,33, 0,5, 1,0, 2,0 e >2 vezes o valor do teor crítico, respectivamente. A recomendação de adubação nesses Estados sugere uma adubação denominada correção para todos os solos que apresentam teores de fósforo abaixo do teor crítico (limite inferior da faixa “Alto”). Essa dose objetiva elevar os teores para a faixa “Alto”. Para isso, independentemente da classe de tamponamento, a recomendação indica as doses de 120 , 60 e 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 para as faixas “Muito baixo”,

“Baixo” e “Médio”, respectivamente. Porém, cada classe possui teor crítico distinto, que diminui na proporção inversa do teor de argila, logo, a CTF (dose para aumentar 1 mg dm⁻³ na análise) aumenta proporcionalmente aos teores de argila. Assim, quando os teores de P estão no limite superior da faixa “Muito baixo”, para elevá-los ao limite inferior da faixa “Alto”, a dose de P₂O₅ necessária para aumentar 1 mg kg⁻¹ é correspondente a 30, 20, 15 e 8,5 kg ha⁻¹ de P₂O₅, para as classes I, II, III, IV, respectivamente.

A CQFS-RS/SC (2004) admite que solos mais tamponados precisam de uma maior dose de P₂O₅ para aumentar 1 mg kg⁻¹. Porém, os valores podem ser questionados, uma vez que parte do princípio que uma mesma dose de P₂O₅ é suficiente para fazer com os teores de P atinjam o limite inferior da faixa “Alto”, independentemente do poder tampão do solo.

Com base na capacidade tampão de cada solo estudado, foi avaliado se as doses estabelecidas para a correção do fósforo do solo pela CQFS-RC/SC (2004) foram suficientes para atingir o objetivo proposto, que é elevar os teores de P para até o limite inferior da faixa “Alto”. Dos dezessete solos que requeriam adubação de correção, em apenas três deles as doses recomendadas foram suficientes para atingir o nível crítico, na avaliação feita trinta dias após a aplicação do fertilizante fosfatado com extrator oficial Mehlich-1. Para os demais, as doses foram insuficientes. Por outro lado, a forma de aplicação do fertilizante pode ter influenciado os resultados, uma vez que a aplicação foi na forma de pó, uniformemente incorporado ao solo. Com isso, o P aplicado ficou mais exposto aos sítios de adsorção, o que pode ter contribuído para o aumento da dose necessária para aumentar 1 mg kg⁻¹.

As doses médias de P₂O₅ necessárias para aumentar 1 mg kg⁻¹ agrupadas de acordo com as classe de argila, sugere que as atuais doses recomendadas podem estar subestimadas (Tabela 7). É importante considerar também que o desvio padrão foi muito elevado, evidenciando grande variação dentro da mesma classe de argila e entre as diferentes datas de avaliação. As doses calculadas para aumentar 1 mg kg⁻¹ de P foram superiores àquelas recomendadas pelo atual sistema de recomendação. As doses aumentaram de 23 para 65 kg ha⁻¹ de P₂O₅, para a classe IV (0 - 20% de argila) e classe I (>60% de argila), respectivamente, na avaliação feita 30 dias após a aplicação do fertilizante, bem mais elevadas se comparadas ao sistema atual de 8,5 e 30

kg ha⁻¹ de P₂O₅, para as classes IV e I, respectivamente. Esta constatação é verossímil com relatos de produtores, que afirmam seguir as recomendações de adubação de correção, porém as doses aplicadas nem sempre são suficientes para se atingir o teor crítico. Esses relatos são mais frequentes em regiões onde predominam solos com elevado poder tampão, o que sugere que

Tabela 6. Quantidade necessária (P₂O₅) para aumentar 1 mg kg⁻¹ de P na análise pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3, decorridos 30 e 80 dias da aplicação do fertilizante fosfatado

Nº	Solo legenda	Mehlich-1		Mehlich-3	
		¹ 30 dias	² 80 dias	¹ 30 dias	² 80 dias
..... kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅					
1	PVA-1	52,6	52,9	61,7	78,1
2	PVA-2	8,3	8,3	7,4	9,4
3	PVA-3	17,9	16,7	21,5	19,7
4	RR	35,7	24,8	28,3	23,7
5	MEk	16,7	19,2	15,4	20,9
6	VEo2	55,6	52,6	40,7	34,5
7	MEo	67,1	65,4	67,1	61,3
8	SXe	13,0	9,4	9,7	14,0
9	MXo	16,9	15,2	17,5	18,2
10	CHa-1	66,7	68,5	90,9	87,0
11	CX	30,3	33,7	25,4	36,9
12	LVd-1	29,4	22,1	39,5	27,3
13	LVaf	71,4	56,5	61,3	84,0
14	NVdf	70,4	52,9	84,0	94,3
15	LVdf	58,8	42,0	57,1	72,5
16	PBAC	26,3	24,3	28,3	37,6
17	PVd	10,3	11,5	8,5	10,1
18	LVef	47,6	36,9	44,6	49,8
19	LVd-2	32,3	28,4	41,2	43,5
20	CHa-2	41,7	32,5	31,6	47,2
Média		38,5	33,7	39,1	43,5
Mediana		34,0	30,5	35,6	37,3
Máximo		71,4	68,5	90,9	94,3
Mínimo		8,3	8,3	7,4	9,4

¹30 dias - amostras coletadas 30 dias após a aplicação do fertilizante fosfatado, utilizando-se para o cálculo doses de 0 a 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅; ²80 dias - amostras coletadas 80 dias após a aplicação do fertilizante fosfatado, utilizando-se para o cálculo doses de 0 a 1200 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

as recomendações poderiam ser diferenciadas de acordo com o tamponamento dos solos. Dentre os solos estudados, cinco deles, que não necessariamente pertenciam à classe de maior tamponamento, requereram doses maiores que 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 para aumentar 1 mg kg^{-1} , na análise, o que equivale o dobro da atual dose recomendada para a classe I. Para estes solos, há evidências de que as atuais doses recomendadas são insuficientes para atingir o objetivo proposto.

Tabela 7. Quantidade média de fósforo (P_2O_5) necessária para aumentar 1 mg kg^{-1} de P na análise pelos métodos Mehlich-1(M1) e Mehlich-3 (M3), decorridos 30 e 80 dias da aplicação do fertilizante fosfatado, separados de acordo com classes de argila e de P-remanescente

Argila ²	30-M1		80-M1		30-M3		80-M3	
	dose	DP ⁽¹⁾	dose	DP ⁽¹⁾	dose	DP ⁽¹⁾	dose	DP ⁽¹⁾
(%)kg ha ⁻¹ de P_2O_5							
>60	65,1	6,3	40,3	7,3	59,2	2,1	78,3	5,8
41 a 60	41,5	20,0	35,3	14,4	40,8	23,1	46,8	25,2
21 a 40	17,9	26,1	42,8	19,2	35,9	19,5	40,6	23,4
0 a 20	23	24,6	22,6	25,8	26,8	36,1	27,7	33,3
P-rem ³								
0 a 7	51,5	21,3	45,5	20,6	53,0	29,3	64,0	25,2
7,1 a 15	45,9	17,1	38,4	10,8	50,5	20,1	57,5	24,9
15,1 a 25	45,3	30,8	38,5	22,0	36,2	23,2	34,1	25,8
25,1 a 60	16,8	11,0	13,8	6,7	14,3	8,8	15,1	6,0

⁽¹⁾DP- desvio padrão em torno da média; ⁽²⁾ classificação adotada pela CQFS-RS e SC(2004); ⁽³⁾P-rem - P remanescente (60 mg L^{-1}), classificação preliminar adotada. Foram consideradas as doses de 0 a 800 kg ha^{-1} no cálculo do dia 30 e, doses de 0 a 1200 kg ha^{-1} para dia 80.

Diferentemente dos estados do RS e SC, os sistemas de recomendação de adubação do estado de Minas Gerais (Alvarez et al., 1999) e da região dos Cerrados (Sousa & Lobato, 2002) consideram a capacidade tampão do solo na definição de doses de fertilizantes fosfatados. Em Minas Gerais, o princípio geral da adubação parte de uma recomendação de uma dose básica, que é indicada para solos argilosos (35 - 60% de argila). Para as demais classes, aplica-se um fator de correção que é dependente do poder tampão do solo. Para solos muito argilosos (>60%) a recomendação sugerida é 1,25 vezes a dose básica; para solos de textura média (15 - 35%) 0,8 a adubação básica e, para solos arenosos (<15% de argila) 0,6 vezes a dose básica. Do mesmo modo, existem diferentes fatores de correção de acordo

com a classe de P-rem, uma vez que este Estado também utiliza este índice para classificar os solos. O valor do índice varia de 1,3 a 0,6 vezes a dose básica, para os solos de maior e menor tamponamento, respectivamente.

Para região dos Cerrados são recomendadas as doses de 5, 9, 30 e 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para aumentar 1 mg dm⁻³, na análise por Mehlich-1, para solos com teores de argila ≤15%, 16 a 35%, 36 a 60 e >60%, respectivamente. Por considerar a capacidade tampão do solo na recomendação, as doses de P₂O₅ são diferenciadas de acordo com a classe de argila, mesmo para solos enquadrados na mesma faixa de fertilidade. Assim, nas regiões acima exemplificadas, solos pertencentes a diferentes classes de argila, porém na mesma faixa de teor de P (Mehlich-1), por exemplo, na faixa “Baixo”, recebem doses diferentes de fertilizante fosfatado para alcançar a faixa “Alto”, diferentemente do modelo utilizado nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Entretanto, Schlindwein & Gianello (2008), em estudo de calibração de métodos para fósforo em solos sob sistema plantio direto do RS e SC, sugerem doses diferenciadas de fertilizantes fosfatados de acordo com o poder tampão (classes de argila), para solos enquadrados na mesma faixa de fertilidade.

As doses de P₂O₅ para aumentar 1 mg kg⁻¹ (CTF), na análise, por Mehlich-1 e 3 nos diferentes tempos de avaliação, correlacionaram-se com a maioria dos atributos do solo relacionados ao poder tampão de P (Tabela 8). A CTF correlacionou-se de forma moderada a forte com o Fe_{DCB}, Fe_{OX}, CMAP e FCP, que indica que quanto maiores forem os valores destes atributos, maior será a resistência do solo em desorver o fósforo retido para a solução extratora Mehlich, o que resulta em doses mais elevadas de fertilizantes para se acrescer o teor de P em uma unidade na análise. A CTF correlacionou-se negativamente com o P-rem para ambos extratores em todas as épocas avaliadas, com coeficientes moderados ($r < -0,60^{**}$), porém significativos com pequena probabilidade de erro ($p < 0,01$). Por outro lado, as correlações da CTF com os teores de argila, quando existiram, foram fracas ($r = 0,50^*$) e com maior probabilidade de erro ($p < 0,05$), comparativamente ao P remanescente. Houve correlação significativa entre argila e CTF em apenas duas das quatro avaliações.

A CTF relacionou-se de forma linear com os valores de P-remanescente, porém não foi possível ajustar uma regressão com os teores de argila, para ambos os extratores avaliados (Figura 5 e 6). A CTF decresceu linearmente em função do aumento dos valores de P-remanescente, embora o coeficiente de determinação tenha sido baixo ($R^2=0,48$). Deste modo, pela equação ajustada, a CTF aumenta aproximadamente $1,1 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 para cada unidade de P-remanescente que decresce na solução de equilíbrio. Por outro lado, a ausência de significância para a regressão entre CTF e argila, sugere que o índice textural é inadequado para classificação dos solos quanto ao tamponamento. A CTF é uma medida direta da sensibilidade do extrator Mehlich ao poder tampão, pois quanto mais sortivo for o mesmo, menos fósforo é extraído pelo método, o que resulta maior CTF. Sendo assim, a falta de relação entre a CTF e argila indica que o tamanho das partículas, por si só, pode não refletir as reais limitações dessortivas do método Mehlich-1 e Mehlich-3. E com isso, solos enquadrados dentro da mesma classe de tamponamento pelo teor de argila, podem requerer doses muito diferentes, para se atingir um determinado nível de fertilidade.

Tabela 8. Coeficientes de correlação (r) simples de Pearson entre as doses necessárias para aumentar o teor de P na análise em 1 mg kg^{-1} P pelos métodos Mehlich-1(M1) e Mehlich-3 (M3) com amostragens feitas 30 e 80 dias após a aplicação do fertilizante fosfatado, contra atributos dos solos relacionados ao poder tampão⁽¹⁾

	80 M1	30 M3	80 M3	Argila	P-rem 60	Fe DCB	Fe _{OX}	CMAP	k	FCP
30-M1	0,96**	0,91**	0,87**	0,50*	-0,65**	0,62**	0,78**	0,53*	0,20 ^{ns}	0,39 ^{ns}
80-M1	-	0,92**	0,88**	0,37 ^{ns}	-0,61**	0,54*	0,87**	0,65**	0,29 ^{ns}	0,51*
30-M3		-	0,95**	0,36 ^{ns}	-0,66**	0,67**	0,82**	0,69**	0,42 ^{ns}	0,52*
80-M3			-	0,50*	-0,69**	0,80**	0,72**	0,63**	0,45 ^{ns}	0,54*

^{ns}, **, * não significativo, significativo a 1 e 5% de probabilidade de erro pelo teste t, respectivamente; P - rem 60 - P remanescente (60 mg L^{-1}); argila - método da pipeta; Fe_{DCB} - Fe por ditionito citrato bicarbonato; Fe_{OX} - Fe por oxalato de amônio; Fe_{OX}/Fe_{DCB} - relação Fe oxalato e Fe ditionito; Fe total - por ataque sulfúrico; CMAP - capacidade máxima de adsorção de fósforo; k - constante relacionada a energia de ligação; FCP- fator capacidade de fosfato.

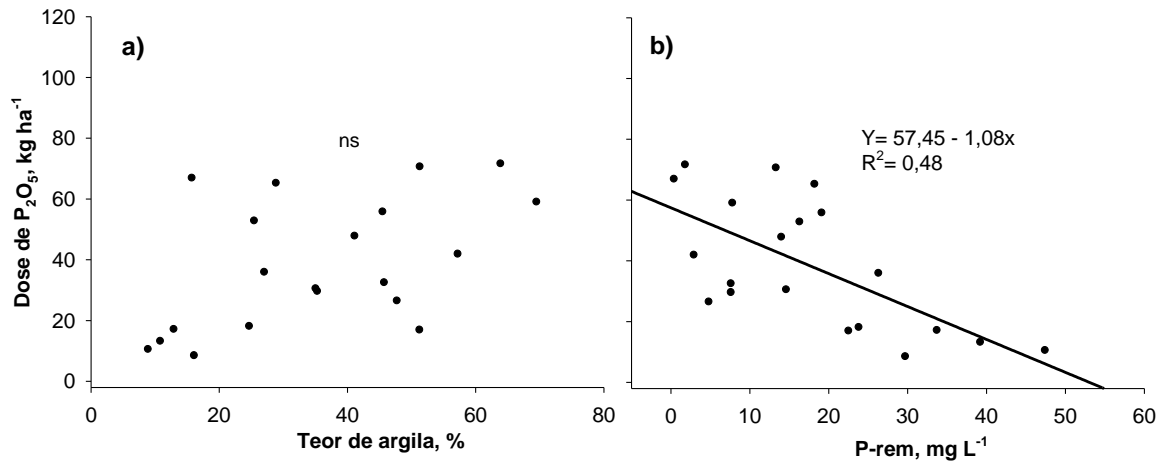


Figura 5. Dose de fósforo (P_2O_5) necessária para aumentar $1\ mg\ kg^{-1}$ de P na análise pelo método Mehlich-1 decorridos 30 dias da aplicação do fertilizante fosfatado, em função do teor de argila (a) e de valores de P-remanescente (b).

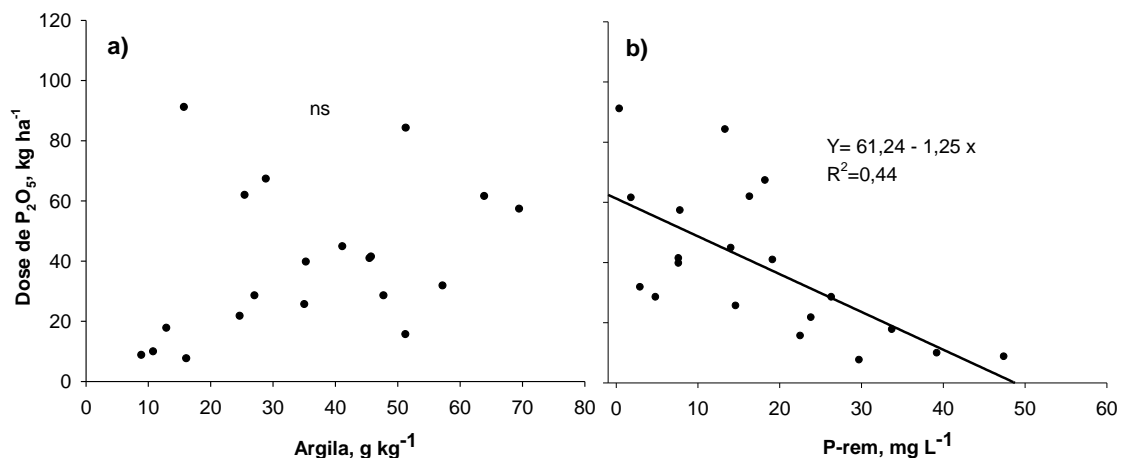


Figura 6. Dose de fósforo (P_2O_5) necessária para aumentar $1\ mg\ kg^{-1}$ de P na análise pelo método Mehlich-3 decorridos 30 dias da aplicação do fertilizante fosfatado, em função do teor de argila (a) e de valores de P-remanescente (b).

Solos que possuem valores muito diferentes de CTF, porém pertencentes à mesma classe de argila podem ser questionados, se de fato, devem possuir o mesmo teor crítico. O exemplo prático é o solo CHa-São Francisco de Paula, pertencente a classe IV (19% de argila), com teor de P por Mehlich-1 de $4,9\ mg\ dm^{-3}$; em que o teor crítico para esta classe de argila é $21\ mg\ dm^{-3}$. Este solo possui uma CTF de $66\ kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 , requerendo, portanto, aproximadamente $1.060\ kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 para atingir o teor crítico, dose que é quase nove vezes superior a indicado pela CQFS-RS/SC (2004). Por outro lado, doses bem menores que a citada, já são suficientes para se

atingir elevadas produtividades nestes solos. Isso sugere que a classificação do solo pode estar equivocada, e que o mesmo deveria ser enquadrado em outra classe de tamponamento, com menor teor crítico.

Por outro lado, o índice do P-remanescente por apresentar melhores ajustes com a CTF, e também com os demais atributos do solo, pode vir contornar algumas incongruências do sistema. Porém, não vai eliminá-las, visto que esta medida apresentou coeficientes de ajustes moderados com as medidas relacionadas ao poder tampão do solo, porém, sempre superiores à argila.

5.4 Relações do poder tampão do solo com medidas relacionadas ao desenvolvimento das plantas

O rendimento da massa seca da parte aérea (MSPA) em função de doses de fósforo, o teor de P na máxima eficiência técnica (MET), as relações entre o P absorvido e o P determinados nos extratos dos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3, bem como as correlações entre estas medidas e os atributos relacionados ao poder tampão do solo, serão apresentados para os três cultivos de milho desenvolvidos.

A priori, a condução de apenas um cultivo seria suficiente para testar as hipóteses propostas. Entretanto, a condução de três cultivos se deu pelo fato de que os dois primeiros não satisfizeram algumas pressuposições concebidas no planejamento dos estudos. O objetivo proposto foi de encontrar o teor de P extraído pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3, em que as plantas deixam de responder à adubação fosfatada, em vasos. A este ponto, que é obtido pelo por meio da equação ajustada entre o P extraído pelos métodos e a MSPA, foi denominado como o teor de P na máxima eficiência técnica (MET). No primeiro cultivo, em que foram testadas doses equivalentes até um máximo de 800 kg ha^{-1} de P_2O_5 , para alguns solos, os mais tamponados, a resposta à aplicação de P_2O_5 foi linear no intervalo testado, não atingindo, portanto, um ponto de máximo rendimento estabilizado. Então, se desenvolveu um segundo cultivo, com dose de até 1.200 kg ha^{-1} , e posteriormente, um terceiro, com dose de até 2.400 kg ha^{-1} .

Para os solos em que o rendimento de MSPA foi linear com as doses testadas, considerou-se o teor de P extraído na maior dose aplicada

como àquele equivalente a MET. Por mais que se espere que plantas ainda respondam à adubação fosfatada, a consideração do teor de P na dose máxima aplicada como aquele equivalente a MET é justificável em estudos de correlação, como já utilizado por pesquisadores em outros estudos (Muniz et al., 1985; Schlindwein, 2003; Silva et al., 2004), embora estes autores tenham utilizado o teor crítico (90% da MET) em vez da MET. Em experimentos de correlação a alteração de uma variável é relacionada à de outra e o grau de associação entre ambas é avaliado. Assim, a existência de resposta linear de rendimento de MSPA, dentro de um intervalo, onde as doses máximas de P_2O_5 foram altas, é um indicativo de que estes solos possam ser muito sortivos e tamponados, o que deve ser compatível com altos teores de argila e/ou baixos valores de P-remanescente. Deste modo, quanto menor for o teor de P por Mehlich na maior dose aplicada, mais tamponado, provavelmente, deverá ser o solo, sendo esta informação é fornecida pelas correlações com atributos do solo consoantes ao poder tampão. É pela interpretação deste conceito, que foram considerados os teores de P na máxima dose testada, na existência de respostas lineares, como aquele equivalente a MET.

Muitos estudos conduzidos em vasos, em ambiente controlado, que objetivam avaliar a resposta das culturas às adubações fosfatadas (Mariano et al., 2002; Leite et al., 2009; Calheiros, et al., 2012; Silva et al., 2013), costumam utilizar o termo “teor crítico” para aquele teor de P no solo em que se obtém 90% do rendimento máximo. Entretanto, o uso desta terminologia pode gerar interpretações dúbias, uma vez que este termo é geralmente utilizado em referência ao teor no solo na máxima eficiência econômica (máximo lucro). Este teor é determinado com base nos experimentos de calibração, que são conduzidos em condições de campo, o qual é influenciado pelo preço dos fertilizantes e dos produtos (Cate & Nelson, 1973). Porém, estudos mostram que o teor na máxima eficiência econômica, na média dos anos, flutua próximo ao equivalente a 90% do máximo rendimento (Kochhann et al. 1982). Este teor, em que se obtém o máximo lucro é, portanto, diferente do teor crítico da planta, que é invariável. Em virtude das condições artificiais criadas em vasos, em que a relação solo/raiz é muito diferente daquela de campo, o uso de um valor que faz referência à máxima eficiência econômica aparenta ser inócuo. Isto porque os valores obtidos (teor crítico em vasos), mesmo que calculados da mesma

forma, não correspondem àqueles encontrados a campo. Sendo assim, neste estudo de correlação, foi optado pelo teor de P no máximo rendimento, aqui denominado como teor na máxima eficiência técnica (MET).

5.4.1 Cultivo I

A produção de massa seca da parte aérea (MSPA) aumentou em função das doses de fósforo aplicadas em todos os solos avaliados (Figura 7). Para muitos dos solos, a resposta das plantas foi quadrática, porém, para alguns o comportamento linear foi muito evidente. Houve solos em que o coeficiente de ajuste (R^2) foi maior utilizando-se equações quadráticas, entretanto, quando esta equação foi derivada para obter-se a dose no maior rendimento, ou, como será descrito posteriormente, o teor de P extraído por Mehlich no máximo rendimento; o valor encontrado ficou fora do intervalo testado. Nestes casos, foi considerado o teor encontrado na maior dose testada, como aquele equivalente ao maior rendimento.

A produção de MSPA variou muito entre os solos avaliados, sendo o valor máximo e mínimo encontrado no maior rendimento foi para o solo MEk-Aceguá e CHa1-São Francisco de Paula, com produções aproximadas de 20,0 e 3,0 g vaso⁻¹, respectivamente (Figura 7). Os coeficientes de determinação (R^2) foram elevados, e a maioria dos solos apresentaram valores acima de 0,90; o que indica um bom ajuste da equação aos dados. O rendimento das culturas é resultado da interação da planta com o meio, o qual é afetado pelas características intrínsecas de cada solo e do ambiente. Em experimentos sob condições controladas, em que se avalia a resposta das plantas a um determinado nutriente, a comparação do rendimento máximo entre solos, pouco acrescenta à discussão dos resultados. Isto porque, o rendimento máximo é reflexo do potencial produtivo de cada solo, e por mais que se procure ajustar algumas variáveis (pH, teor de nutrientes, suprimento hídrico) de modo semelhante, a interação produz resultados diferentes. Por outro lado, quando existe resposta significativa no mesmo solo, esta pode ser creditada unicamente à variável em teste. Assim, é perceptível a resposta diferenciada quanto às doses de P aplicadas. Os solos mais tamponados, aqueles que apresentaram os maiores valores de CMAP, FCP e CTF (CHa-1, CHa-2, LVdf, LVaf) foram, também, os que apresentaram as menores produções máximas e

os menores incrementos de MSPA por unidade de P_2O_5 aplicado, dentre os solos avaliados. Isto se deve, provavelmente, ao grande potencial sortivo dos mesmos, que resultou em baixa disponibilidade de P às plantas. O que vem a corroborar com as informações de que solos muito tamponados necessitam de elevadas doses iniciais de P, para se alcançar produções satisfatórias (Novais et al., 2007).

A taxa de incremento na produção da MSPA por unidade de P_2O_5 aplicado correlacionou-se com a maioria das medidas relacionadas ao poder tampão do solo (Tabela 9). Houve correlação negativa com a CMAP, FCP, k, Fe_{DCB} e argila, evidenciando que quanto maior o valor destas medidas, menor foi a resposta das plantas às doses de P_2O_5 . Cabe ressaltar que apenas houve significância com os teores de argila ($r=-0,69^{**}$) quando o solo Aceguá foi excluído, devido a seu valor discordante dos demais; pois na presença deste, o coeficiente foi insignificante ($r=0,32^{ns}$). A medida P-remanescente foi o índice de tamponamento que apresentou o maior coeficiente de correlação com taxa de incremento ($r=0,92^{**}$). Diferentemente das outras medidas do poder tampão, a correlação com o P-rem foi extremamente forte e positiva. Isso evidencia que a responsividade das plantas à adubação fosfatada foi maior na medida em que a capacidade sortiva do solo diminuiu; que é dado pelos maiores valores de P-remanescente em solução.

A taxa de incremento da MSPA por unidade de P_2O_5 aplicada ao solo apresentou melhor ajuste com os valores de P-rem comparativamente à argila (Figura 8). O coeficiente de determinação foi de 0,48 e 0,77 para a argila e P remanescente, respectivamente. A regressão só foi significativa com os teores de argila quando excluído o solo “*outlier*” de Aceguá, o qual foi muito responsivo às doses de fósforo, dando origem a um ponto discrepante. Por outro lado, a regressão foi significativa entre a taxa de incremento e o P-rem mesmo com a presença deste solo.

A resposta das plantas à aplicação de fósforo é inversamente proporcional ao teor de P originalmente encontrado no solo (CQFS-RS/SC, 2004). Com isso, a probabilidade de resposta das culturas é maior, quanto mais baixo for teor de P no solo. Além disso, baixas taxas de incremento podem ocorrer nas situações em que os teores de “P disponível” são altos ou, em solos com muita sorção, que requerem altas doses de P para compensar a

baixa disponibilidade às plantas, em função da forte adsorção à fase sólida. Por estes motivos, foram selecionados solos que nunca haviam recebido adubação fosfatada e com baixos teores de P, para que a taxa de incremento fosse apenas reflexo do poder sortivo do solo.

A resposta das plantas ao P adicionado ao solo é dependente da avidéz e da quantidade de sítios de adsorção presentes. Isto porque, solos muito sortivos requerem quantidades iniciais elevadas de fósforo para que produtividades satisfatórias sejam alcançadas (Alvarez et al., 2000; Sousa & Lobato, 2002; Gatiboni, 2003). Esta elevada demanda inicial é necessária para diminuir a avidéz do solo por fosfato, para, conseqüentemente, aumentar a disponibilidade do elemento às plantas. As relações lineares da taxa de incremento com os teores de argila e P-remanescente sinalizam que quanto maior o teor de argila e menor o valor de P-rem, maior é a demanda inicial de P, em função do maior tamponamento dos solos. Entretanto, em virtude dos melhores coeficientes de ajuste, o índice P-rem foi mais sensível à variação do potencial de resposta das plantas ao P aplicado.

Os teores de fósforo para a MET extraído pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3 variaram em virtude dos diferentes tamponamentos dos solos (Tabela 10). Os solos que apresentaram os valores extremos foram o NVdf-Rodeio Bonito e PVA2-Tupanciretã, com teores de 13,2 e 81,2 mg kg⁻¹ com Mehlich-1 e 12,2 e 98,3 com Mehlich-3, respectivamente. O teor de fósforo para a MET para uma dose aplicada de até 400 mg kg⁻¹ (800 kg ha⁻¹) é reflexo direto da sensibilidade do extrator Mehlich ao poder tampão do de P do solo. O método Mehlich apresenta algumas limitações quanto à determinação “P disponível”, pois as quantidades extraídas têm relação inversa ao poder tampão do solo (Bortolon, 2010; Oliveira, 2010). Deste modo, solos mais tamponados possuem menores teores de P extraído pelo método na MET. Este contraste de valores é devido tanto à ineficiência do Mehlich em extrair satisfatoriamente o P-lábil do solo (Gatiboni, 2003), como também pelo fato de solos argilosos (geralmente mais tamponados) favorecerem o mecanismo de difusão de P no solo, que é a principal mecanismo de suprimento de P até as raízes (Anghinoni & Barber, 1980). Deste modo, o método Mehlich extrai, proporcionalmente, menores quantidades de P em solos tamponados em relação àqueles pouco tamponados, em uma situação em que a disponibilidade

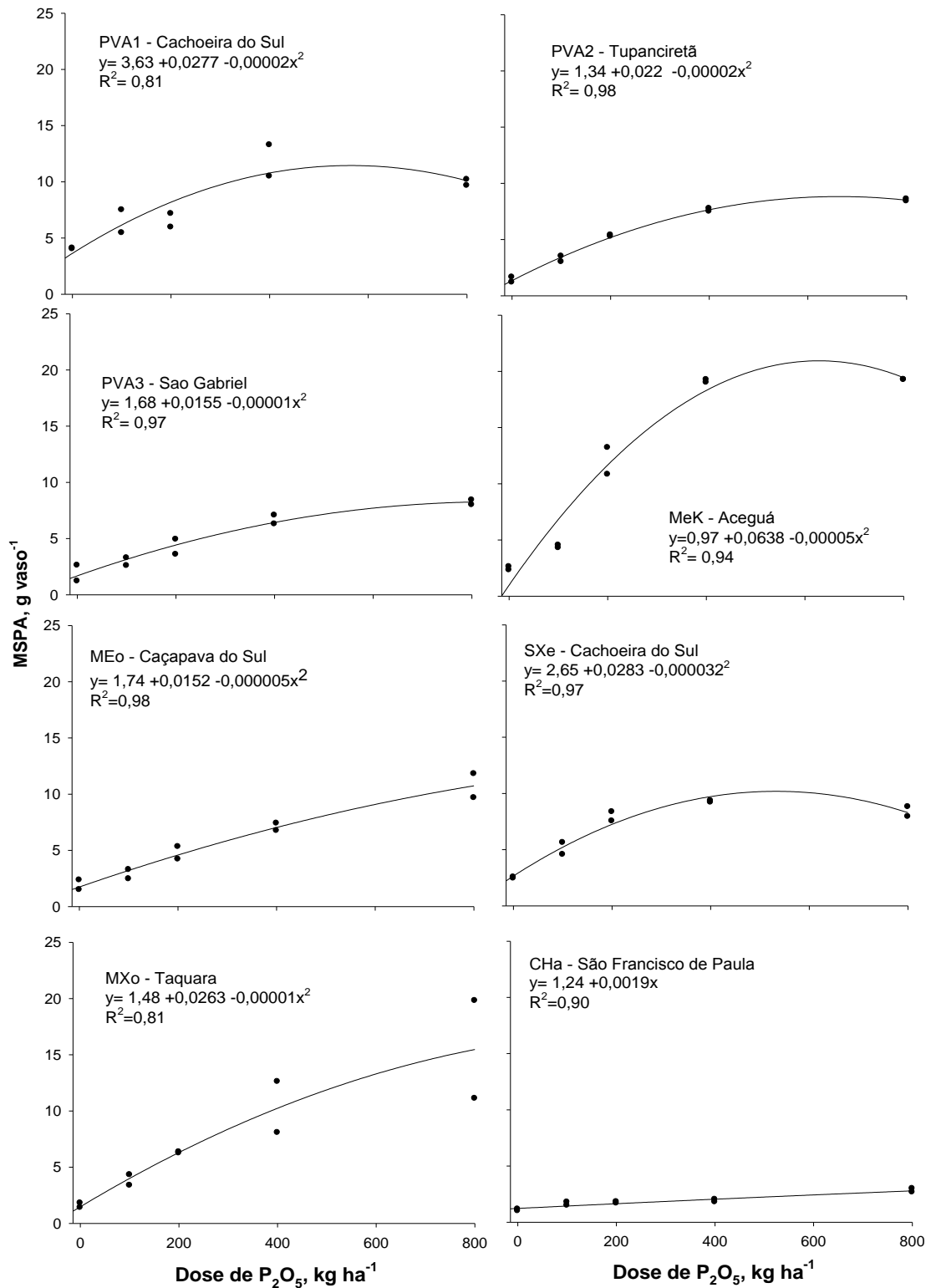


Figura 7. Regressão entre a massa seca de parte aérea (MSPA) de milho (g vaso⁻¹) aos 20 dias após germinação e doses de P₂O₅ (kg ha⁻¹) aplicadas e incorporadas ao solo utilizando-se como fonte o superfosfato triplo no primeiro cultivo.

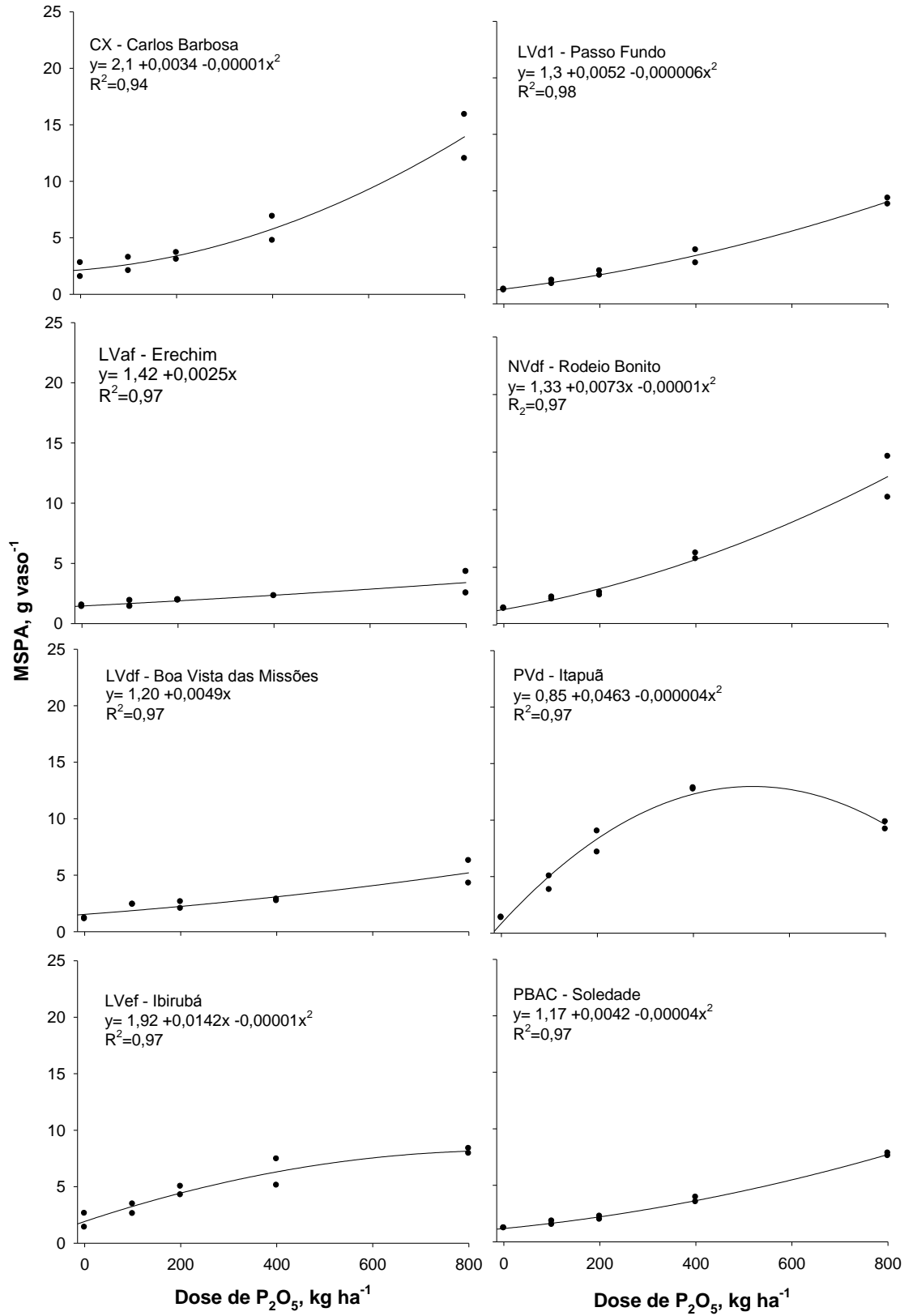


Figura 7 - Continuação...

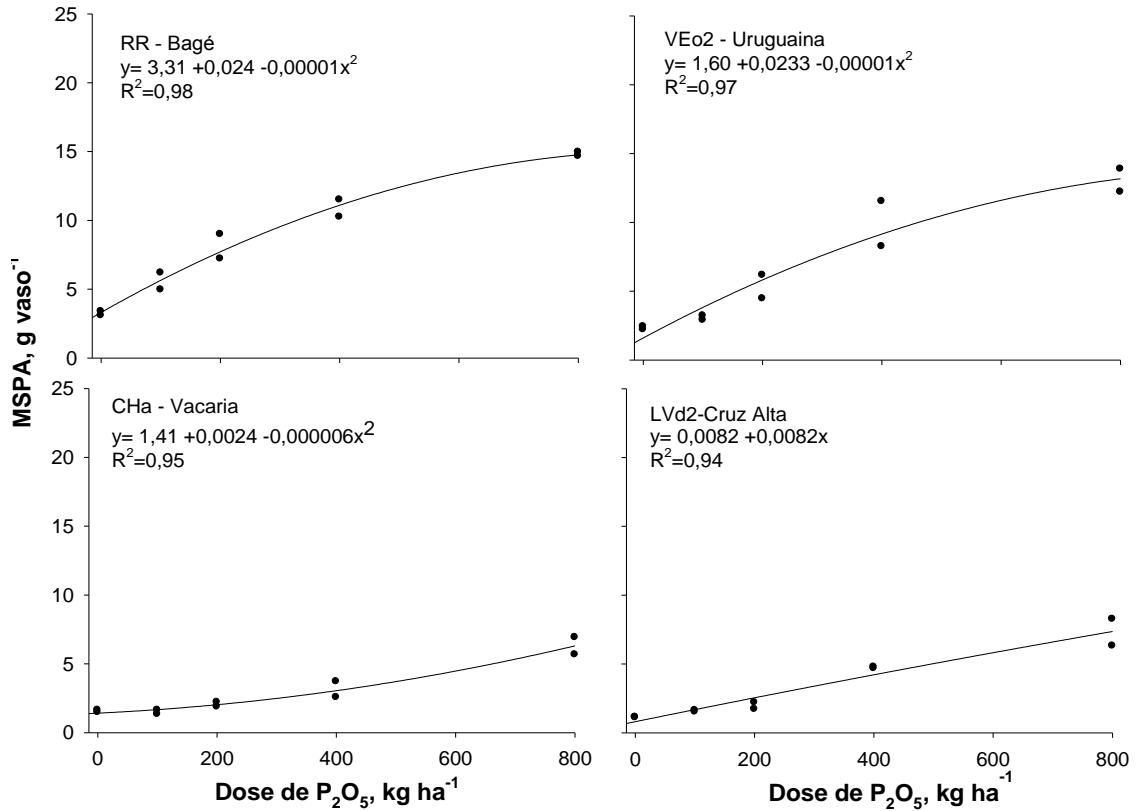


Figura 7 – Continuação...

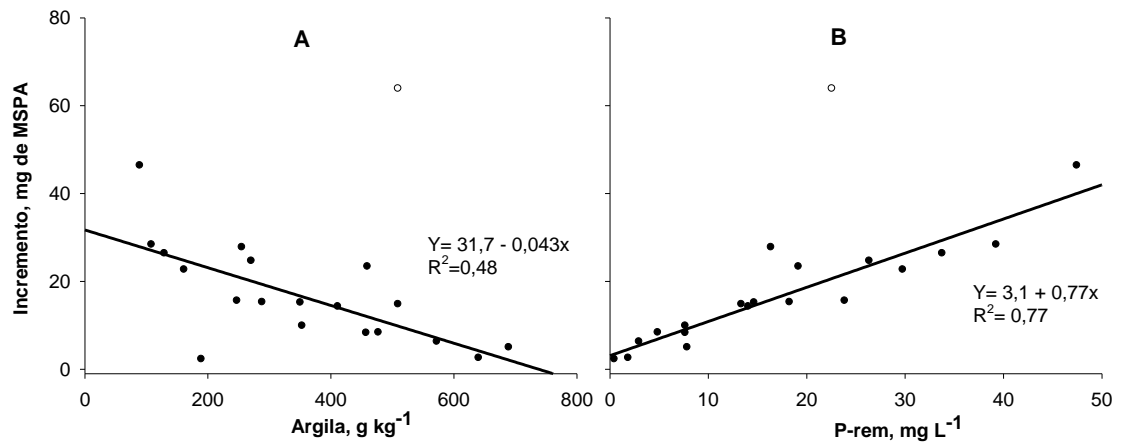


Figura 8. Regressões entre o incremento na produção (mg) de massa seca da parte aérea (MSPA) por unidade de P₂O₅ aplicado em função dos teores de argila (A) e P-remanescente (B). O ponto em branco é a representação do solo Aceguá (MEk), o qual foi eliminado do ajuste da regressão.

“real” de P às plantas é a mesma. É por estes motivos que há necessidade de separação dos solos em classes de tamponamento na interpretação do P extraído por Mehlich às plantas.

Tabela 9. Correlação da taxa de incremento na produção de MSPA por unidade de P_2O_5 aplicado com atributos dos solos relacionados ao poder tampão do solo¹

	Argila	P-rem	Fe _{DCB}	Fe _{OX}	CMAP	K	FCP
Incremento	-0,69**	0,92**	-0,53*	-0,40 ^{ns}	-0,70**	-0,59**	-0,60*

^{ns}, **, * não significativo, significativo a 1 e 5% de probabilidade de erro pelo teste t, respectivamente; argila- método pipeta; P-rem - P remanescente (60 mg L⁻¹) relação solução: solo (10:1); Fe_{DCB}- Fe por ditionito citrato bicarbonato; Fe_{OX}- Fe por oxalato de amônio; CMAP- capacidade máxima de adsorção de fósforo; k- constante relacionada a energia de ligação; FCP- fator capacidade de fosfato. *O solo Aceguá foi excluído do ajuste por apresentar valor muito discrepante.

O suprimento de fósforo até as raízes no solo se dá principalmente pelo mecanismo da difusão. A absorção pelas plantas cria uma zona de depleção na adjacência das raízes e os íons se difundem em decorrência do gradiente de concentração até a superfície radicular (Barber, 1995). A concentração inicial do nutriente na solução do solo, bem como a capacidade do solo (poder tampão) em manter esta concentração, são importantes fatores que afetam o suprimento de P até a superfície das raízes (Barber, 1974). Para uma mesma concentração de P na solução do solo, os argilosos (geralmente mais tamponados) são mais efetivos no suprimento de P. Por mais que o poder tampão possa afetar negativamente o coeficiente de difusão do P no solo, devido à maior atração deste elemento à fase sólida, o que dificulta seu movimento (Nye & Tinker, 1977), o fluxo difusivo acaba sendo, geralmente, maior nestes solos. Isto se deve ao maior conteúdo de água volumétrica e pela menor tortuosidade destes solos, o que facilita o fluxo do elemento até a superfície das raízes (Marcolan, 2006). Mesmo sendo mais efetivos que os arenosos para uma mesma concentração de P na solução, os solos argilosos necessitam doses muito maiores de P para se atingir essa concentração. Obviamente, existem muitos fatores que interferem na absorção de P pelas plantas, porém, uma mesma quantidade de P absorvida pode ser conseguida com concentrações de P na solução do solo muito diferentes. Solos argilosos, devido ao maior estoque de P na fase sólida e, também, pelos demais fatores que afetam positivamente o fluxo difusivo, podem fornecer a mesma quantidade de P às plantas com concentrações de P na solução bem menores, comparativamente a arenosos (Novais & Melo, 2007).

O uso P extraído por um método químico se justifica pela praticidade e facilidade de obtenção para um grande número de solos, em laboratório.

Além disso, a identificação dos fatores que afetam o suprimento de P a campo é complexa (Marcolan, 2006). É por isso, que nem sempre são obtidos coeficientes de correlação significativos entre o P estimado pelos métodos e o absorvido pelas plantas (Silva & Raij, 1999; Bortolon, 2005). Neste contexto, o uso de informações simples e de fácil obtenção, que venham a agregar na exatidão da interpretação da disponibilidade de P são de grande importância para recomendação de adubação.

Os teores de P para a MET obtidos neste estudo, teoricamente, devem ter uma relação direta com os teores críticos de P encontrados a campo, os quais foram obtidos nos experimentos de calibração. Obviamente, que os diferentes modelos matemáticos utilizados para obtenção dos teores, e as condições de estudo em vasos, originam valores com magnitudes diferentes dos obtidos a campo. Entretanto, é plenamente verossímil a ideia de que o teor de P para a MET, extraído por Mehlich, em vasos, tenha uma relação proporcional ao teor crítico obtido a campo. Até porque, se espera a mesma influência do poder tampão do solo sobre a disponibilidade de P às plantas em ambos ambientes. Deste modo, presume-se que os índices do poder tampão que se correlacionem com a MET, também, tenham correlação semelhante com os teores críticos obtidos a campo.

Os teores de P para a MET extraído tanto pelo Mehlich-1 como pelo Mehlich-3 correlacionaram-se negativamente com a maioria dos atributos dos solos relacionados ao poder tampão de P (Tabela 11). Isso evidencia que na medida em que se aumenta o poder tampão do solo, que é dado principalmente pela maior CMAP e FCP, diminui-se a quantidade de P extraído para a máxima eficiência técnica. Embora os coeficientes de correlação não tenham sido muito elevados, eles foram significativos com quase todas as medidas do poder tampão, à exceção da constante de energia relacionada à ligação do P na fase sólida do solo. Em relação aos dois principais índices em estudo, a medida do P remanescente apresentou coeficientes superiores à argila, para ambos os extratores. Os coeficientes foram 0,57** e 0,55* para argila, e 0,65** e 0,74** para P-rem, respectivamente para os métodos Mehlich-1 e Mehlich-3. Essas informações corroboram as de Bonfim et al. (2004), que citam ter encontrado coeficientes maiores para a relação do teor crítico de P no solo para *Brachiaria brizantha* com o P-rem, comparativamente à argila. Estes

autores encontraram coeficientes de correlação de -0,31* e -0,38** para argila e 0,54** e 0,68** para P-rem para os métodos Mehlich-1 e Mehlich-3, respectivamente.

Tabela 10. Equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação (R^2) e teor de fósforo para a máxima eficiência técnica (MET) extraído pelos métodos Mehlich-1 (MET-M1) e Mehlich-3 (MET-M3) no primeiro cultivo

Solo	Mehlich-1			Mehlich-3		
	Equação de regressão ¹	MET-M1 ⁽²⁾	R^2	Equação de regressão ⁽¹⁾	MET-M3 ⁽²⁾	R^2
		mg kg ⁻¹			mg kg ⁻¹	
PVA-1	$\hat{Y} = -21,62 + 2,82x - 0,060x^2$	23	0,63	$\hat{Y} = -28,54 + 4,38x - 0,113x^2$	19,4	0,74
PVA-2	$\hat{Y} = -0,92 + 0,26x - 0,0016x^2$	81,2	0,99	$\hat{Y} = -0,24 + 0,196x - 0,001x^2$	98,3	0,99
PVA-3	$\hat{Y} = -2,27 + 0,44x - 0,0048x^2$	46,7	0,94	$\hat{Y} = -0,62 + 0,350x - 0,0034x^2$	51,5	0,95
RR	$\hat{Y} = -20,68 + 2,52x - 0,044x^2$	28,7	0,91	$\hat{Y} = -10,35 + 1,58x - 0,024x^2$	32,7	0,97
MEk	$\hat{Y} = -14,86 + 2,08x - 0,028x^2$	37,1	0,93	$\hat{Y} = -4,04 + 1,02x - 0,0099x^2$	51,8	0,88
VEo2	$\hat{Y} = -10,33 + 2,11x - 0,047x^2$	22,3	0,92	$\hat{Y} = -8,29 + 1,51x - 0,0268x^2$	28,2	0,86
MEo	$\hat{Y} = -25,4 + 4,92x - 0,1679x^2$	14,6	0,96	$\hat{Y} = -10,87 + 2,617x - 0,078x^2$	16,5	0,95
SXe	$\hat{Y} = -2,13 + 0,52x - 0,0055x^2$	47,2	0,95	$\hat{Y} = -0,08 + 0,33x - 0,0026x^2$	63,9	0,96
MXo	$\hat{Y} = -7,89 + 0,303x$	80,1	0,81	$\hat{Y} = -1,03 + 0,454x - 0,001x^2$	51,1	0,95
CHa-1	$\hat{Y} = 0,38 + 0,1397x$	17,0	0,82	$\hat{Y} = 0,50 + 0,167x$	12,9	0,85
CX	$\hat{Y} = -3,19 + 0,467x$	36,1	0,94	$\hat{Y} = -1,27 + 0,384x$	39,5	0,94
LVd-1	$\hat{Y} = -0,45 + 0,283x$	33,2	0,98	$\hat{Y} = -0,29 + 0,386x$	23,0	0,96
LVaf	$\hat{Y} = 2,79 + 3,886x$	19,0	0,98	$\hat{Y} = -1,26 + 4,63x$	18,9	0,94
NVdf	$\hat{Y} = -5,20 + 1,384x$	13,2	0,96	$\hat{Y} = -2,27 + 1,22x$	12,2	0,99
LVdf	$\hat{Y} = -0,19 + 0,257x$	21,3	0,93	$\hat{Y} = 0,35 + 0,261x$	18,8	0,85
PBAC	$\hat{Y} = -0,91 + 0,226x$	37,0	0,98	$\hat{Y} = -0,73 + 0,236x$	34,6	0,97
PVd	$\hat{Y} = -2,21 + 0,57x - 0,0052x^2$	50,4	0,96	$\hat{Y} = -1,48 + 0,446x - 0,0034x^2$	65,6	0,97
LVef	$\hat{Y} = -9,56 + 1,56x - 0,034x^2$	22,8	0,90	$\hat{Y} = -6,98 + 1,39x - 0,031x^2$	21,9	0,91
LVd-2	$\hat{Y} = -1,64 + 0,61x - 0,0103x^2$	29,5	0,96	$\hat{Y} = -1,27 + 0,644x - 0,011x^2$	23,1	0,94
CHa-2	$\hat{Y} = -0,67 + 0,267x$	24,1	0,92	$\hat{Y} = -0,19 + 0,185x$	27,0	0,75

⁽¹⁾Equação de regressão ajustada entre os teores de fósforo ($X = \text{mg kg}^{-1}$) extraído pelos métodos e a massa seca da parte aérea ($Y = \text{g vaso}^{-1}$) da cultura; ⁽²⁾ MET- para equações quadráticas foi calculado igualando a primeira derivada da equação à zero, para equações lineares foi considerado o teor de P extraído na maior dose aplicada.

O P-remanescente, como discutido em tópicos anteriores, demonstrou ser o índice que melhor se ajusta às principais medidas do solo

relacionadas ao poder tampão de P, dentre elas a CMAP, FCP e CTF. Entretanto, essas medidas não incluem informações relacionadas ao desenvolvimento das plantas, que em suma, são essas que importam. Isso porque, os métodos analíticos têm por finalidade estimar parâmetros que estejam significativamente associados ao desenvolvimento das plantas. Assim, o teor de P para a MET pode ser considerado, dentre todas as medidas, como aquela mais adequada como critério de seleção do melhor índice do poder tampão de P dos solos, por refletir a interação da sensibilidade das plantas e do extrator Mehlich ao poder tampão do solo.

A regressão dos teores de P extraído por Mehlich-1 e Mehlich-3 para a MET com os teores de argila e de P-rem são mostrados na Figura 9. Para obtenção da relação matemática entre as variáveis foram consideradas como variáveis independentes os teores de argila e os valores de P remanescente. Houve decréscimo linear do teor de P para a MET em função do aumento dos teores de argila, para ambos os métodos de extração, com coeficientes de determinação de 0,34 e 0,30 para o Mehlich-1 e Mehlich-3, respectivamente. Por outro lado, ocorreu aumento linear do teor de P para a MET com a elevação dos valores de P-remanescente, com coeficientes de determinação de 0,45 e 0,54 para os métodos Mehlich-1 e Mehlich-3, respectivamente. Porém, os coeficientes de determinação foram baixos para ambos os índices do poder tampão do solo, mas são aceitáveis, tendo em vista a grande diversidade de solos utilizados e os diversos fatores que influenciam tanto o crescimento das plantas como a extração de P pelos métodos. No entanto, ficou evidente que o índice do P-rem comparativamente à argila, foi índice que apresentou o melhor ajuste com esta importante medida do poder tampão do solo. Essas informações corroboram as de Alcântara et al., (2008) que encontraram maiores coeficientes de correlação usando o P-rem para classificar os solos. Do mesmo modo, Broggi et al. (2010) encontraram maiores teores críticos para solos com maior P-remanescente, assim como coeficientes de correlação maiores entre o teor crítico e o P-remanescente, comparativamente à argila.

As informações obtidas neste estudo permitem conjecturar que, se o índice do P-remanescente tivesse sido utilizado em substituição à argila, na

separação dos solos nos experimentos de calibração, os coeficientes de ajuste teriam sido maiores, diminuindo assim a probabilidade de se classificar erroneamente os solos quanto ao tamponamento. A comprovação desta hipótese fica comprometida pela dificuldade de condução de novos experimentos da envergadura daqueles desenvolvidos no passado. Porém, se

Tabela 11. Coeficientes de correlação (r) simples de Pearson entre o teor de fósforo extraído para a máxima eficiência técnica pelos métodos Mehlich-1 (MET-M1) e Mehlich-3 (MET-M3) e alguns atributos de solo relacionados ao poder tampão no primeiro cultivo

	MET-M3	Argila	P-rem	Fe _{DCB}	Fe _{OX}	Fe total	CMAP	k	FCP
MET-M1	0,88**	-0,57**	0,65**	-0,54*	-0,67**	-0,55**	-0,51*	-0,22 ^{ns}	-0,48*
MET-M3	-	-0,55*	0,74**	-0,62**	-0,69**	-0,61*	-0,56*	-0,25 ^{ns}	-0,46*

ns, **, * não significativo, significativo a 1 e 5% de probabilidade de erro pelo teste t, respectivamente; P-rem 60= P remanescente (60 mg L⁻¹) relação solução:solo (10:1); argila= método pipeta; Fe_{DCB}- Fe por ditionito citrato bicarbonato; Fe_{OX}= Fe por oxalato de amônio; Fe total= por ataque sulfúrico; CMAP= capacidade máxima de adsorção de fósforo; k= constante relacionada a energia de ligação; FCP= fator capacidade de fosfato.

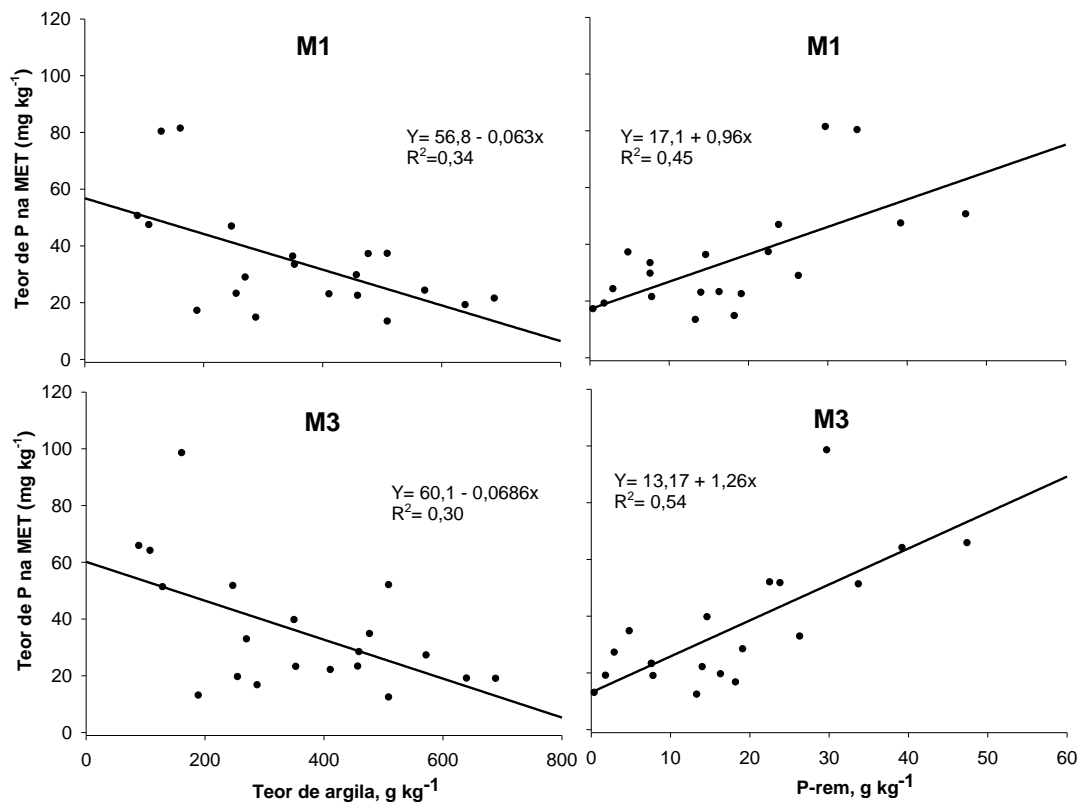


Figura 9. Regressão entre o teor de P na máxima eficiência técnica (MET) extraído pelos métodos Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3) em função dos teores de argila e valores de P-remanescente.

existissem amostras dos solos utilizados nos experimentos de calibração, juntamente com informações de rendimento das culturas, poder-se-ia determinar o valor de P-remanescente desses e desenvolver um novo ajuste dos dados. Porém, pelo longo período decorrido da execução destes experimentos, as amostras originais já foram descartadas. Os solos utilizados nos experimentos de calibração eram, em sua maioria, solos da região do Planalto rio-grandense, onde a qualidade da fração argila não varia de forma acentuada entre os solos, predominando argilominerais 1:1 e oxihidróxidos de ferro e alumínio (Brasil, 1973). Assim, a variação da quantidade de argila se traduz em aumento proporcional do poder tampão do solo, o que pode explicar as relações significativas dos teores críticos com a argila. Porém, um sistema de recomendação de adubação deve contemplar os diferentes sistemas edáficos existentes na região de abrangência. E, quando utilizados solos com mineralogias contrastantes, como neste estudo, o índice do P-rem aparenta ser mais adequado para classificação do tamponamento solos.

5.4.2 Comparação entre métodos Mehlich-1 e Mehlich-3 em relação às quantidades de fósforo extraído antes primeiro cultivo

Os teores de fósforo extraídos pela solução Mehlich-3 foram maiores que os extraídos pela solução Mehlich-1, quando todos os solos com as diferentes doses aplicadas de P foram analisados conjuntamente (Figura 10a). O valor do coeficiente angular (b) da equação de regressão ajustada entre os extratores Mehlich-3(y) e Mehlich-1(x) foi significativamente maior do que “1”, indicando que a solução de Mehlich-3 extraiu na média 20 % mais P que a solução de Mehlich-1. Entretanto, o teste t-Student ($t = -0,69^{ns}$) não foi significativo ($p < 0,05$), indicando que as quantidades de P extraídas pelos métodos não foram diferentes. Porém, conforme Miller & Miller (2005) na comparação entre extratores, a verificação da presença do valor “1” dentro do intervalo de confiança do coeficiente angular predito é mais indicada que o teste t-Student para médias pareadas. Como o intercepto (a) foi negativo e diferente de zero ($p < 0,05$), o mesmo sugere que a quantidade de P extraído foi maior com o extrator Mehlich-1, resultado este que vai de encontro à interpretação obtida pelo coeficiente angular. Estas evidências induziram a crer, pela inspeção visual do gráfico, que os valores de P extraído maiores de

30 mg kg⁻¹, que visivelmente predominaram acima da linha de igualdade, ou seja, maior com Mehlich-3, foram os responsáveis pelas diferenças entre os métodos pela análise do intervalo de confiança.

Essa hipótese foi comprovada quando apenas os teores extraídos de até 21 mg kg⁻¹ foram analisados separadamente (Figura 10b). Quando isso foi feito, o intercepto (a) não foi diferente de “0”, nem tampouco o coeficiente angular (b) foi diferente de “1”, indicando que para essa faixa de valores não houve diferença entre os métodos. A escolha do valor 21 mg kg⁻¹ se deu por este ser o limite superior da faixa alta da classe IV, segundo a CQFS-RS/SC (2004). Ou seja, o teor de P no solo abaixo do qual pode haver diferença quanto a interpretação, pois valores acima deste, em todas as classes de tamponamento, são considerados “muito alto”. Deste modo, dentro da amplitude de valores, em que o sistema de recomendação permite diferenciação na interpretação do fósforo “disponível”, não houve diferença entre a quantidade de P extraído pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3.

Quando os solos foram separados por classes de argila (4 classes), só houve diferença entre os métodos na classe IV (0 – 20% de argila). Nesta classe o Mehlich-3 extraiu maiores quantidades de P, em que o coeficiente angular (1,25) foi significativamente diferente de “1” ($p < 0,05$) pelo intervalo de confiança ($1,15 < IC < 1,32$). Com isso, ficou comprovado que os maiores teores de fósforo extraído pelo Mehlich-3 nos solos arenosos foram os responsáveis pela diferença entre os métodos, quando todos os solos foram analisados conjuntamente. Estes resultados corroboram com os apresentados por Bortolon & Gianello (2008) no que diz respeito à classe IV, porém discordam em relação às demais classes. Estes autores observaram que em solos da classe IV de argila, o método Mehlich-3 extraiu em média 60% a mais de fósforo que o Mehlich-1, porém em solos com teores maiores que 600 g kg⁻¹ de argila, os teores de fósforo extraído pelo Mehlich-3 foram 20% menores que os extraídos pelo método Mehlich-1.

A maior parte dos trabalhos na literatura descreve que o método Mehlich-3 extrai maiores quantidades de fósforo que o Mehlich-1, e alguns relatam quantidades extraídas maiores em até 200% (Gartley et al., 2002; Schlindwein & Gianello, 2008; Bortolon et al, 2009; Bortolon et al., 2011; Stainer et al, 2012). Por outro lado, há trabalhos discordantes, em que não

foram verificadas diferenças entre os métodos ou, em alguns casos, quantidades maiores para o Mehlich-1 (Gatiboni, 2003; Ranno, 2004; Oliveira, 2010; Santos, 2013). Neste contexto, verifica-se que a superioridade do Mehlich-3 em relação ao Mehlich-1 frequentemente relatada pelo seu maior espectro de ação (Beegle, 2005) nem sempre é verificada, como ocorreu neste estudo para solos com teores de argila maiores que 200 g kg^{-1} .

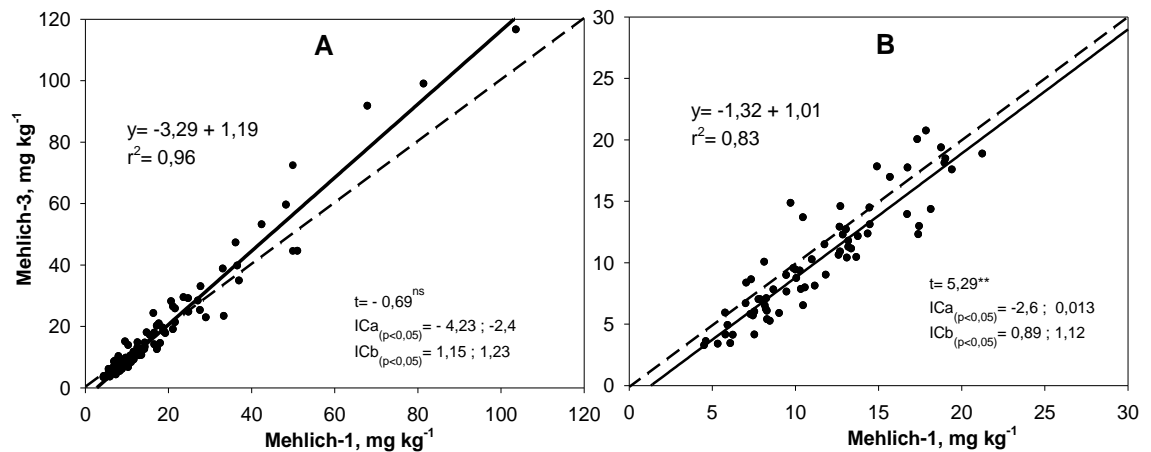


Figura 10. Regressão entre os teores de fósforo extraído pelas soluções de Mehlich-1 e Mehlich-3 antes do primeiro cultivo, com todos os valores (A) e com valores até 21 mg kg^{-1} (B). A linha tracejada projetada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos). ICa e ICb - intervalo de confiança (95%) do coeficiente linear (a) e angular (b); t - teste t-Student para médias pareadas; ^{ns}, ^{**} não significativo e significativo ($p < 0,05$), respectivamente.

5.4.3 Cultivo II

No segundo cultivo, foi adicionada uma dose extra de 1100 kg ha^{-1} a todas as unidades que haviam recebido a dose de 100 kg ha^{-1} no primeiro em que a produção de MSPA de milho foi linear no intervalo testado (0 a 800 kg ha^{-1}). No segundo cultivo, mesmo com aplicação da dose, não foi possível obter produção estável de MSPA em muitos dos solos estudados (Figura 11). Assim, os solos que haviam apresentado comportamento linear no primeiro cultivo mantiveram essa tendência. Em alguns casos, embora a curva quadrática tenha sido ajustada, devido ao maior coeficiente de determinação, fica perceptível que a maior produção de MSPA foi obtida na maior dose testada. Isso é comprovado ao se igualar a zero a primeira derivada da função, em que a dose que proporcionou o maior rendimento está fora do intervalo testado. Por outro lado, para a maioria dos solos pouco tamponados, as doses

aplicadas foram suficientes para estabilizar a produção dentro do intervalo de doses testadas.

A produção de MSPA no segundo cultivo, na média de todos os solos, foi menor que a obtida no primeiro cultivo pelo teste “t” ($p < 0,05$), mesmo com a inclusão de uma dose adicional equivalente a 1.100 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Os valores médios foram $3,9$ e $5,3 \text{ g vaso}^{-1}$ para o cultivo II e cultivo I, respectivamente. A relação entre os maiores rendimentos de MSPA nos diferentes cultivos é mostrada na Figura 12. Pela figura, é possível observar que na maioria dos solos os maiores rendimentos foram obtidos no cultivo I. Pois, 16 dos 20 solos estudados, estão situados sobre ou acima da reta de igualdade projetada. Embora o tempo de cultivo tenha sido o mesmo (20 dias após a emergência), a redução do fotoperíodo com conseqüente diminuição da radiação solar, associada às menores temperaturas no período de cultivo (Berlato et al., 1984; Gadioli et al., 2000) podem ter contribuído para o menor crescimento das plantas.

No cultivo II, mesmo que muitos solos tenham sido responsivos até a maior dose de P_2O_5 aplicada, os incrementos de MSPA por unidade de P_2O_5 aplicado foram inferiores aos obtidos no cultivo I. Este comportamento foi constatado em todos os solos avaliados, inclusive naqueles que não receberam dose extra de P. Assim, fica evidente que as plantas continuaram sendo responsivas à adubação fosfatada, porém com menor eficiência de utilização do P aplicado. A comparação entre cultivos pouco acrescenta à discussão do trabalho, porém é interessante para demonstrar a interferência de fatores não controláveis no desenvolvimento das plantas e não apenas a variável em estudo.

Os teores de P extraído pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3 na MET, no cultivo II, são apresentados na Tabela 12. Para o Mehlich-1, os valores variaram de 20 a 114 mg kg^{-1} para o solo de Caçapava do Sul (MEo) e Taquara (MXo), respectivamente. Para o Mehlich-3 os valores variaram de 22 a 108 mg kg^{-1} para o solo de CHa1-São Francisco de Paula e PVd-Viamão, respectivamente. Para ambos os métodos, em 16 dos 20 solos avaliados, o teor de P na MET foi obtido na maior dose de P aplicada, conseqüentemente, no maior valor de P extraído pelos métodos. Por outro lado, para o cultivo I, esta mesma constatação foi verificada em 14 dos 20 solos, não

necessariamente os mesmos. Este fato evidencia que a dose extra de P_2O_5 aplicada, não foi suficiente para se atingir produções estáveis de MSPA na maioria dos solos.

Há de se considerar que houve solos em que a MET foi encontrada em valores intermediários de P no solo no cultivo I, entretanto, no cultivo II, a MET dos mesmos foi verificada nos maiores valores de P do intervalo. Este comportamento poderia ser creditado à redução do P biodisponível às plantas no cultivo II, pela absorção de P que se deu no cultivo I, uma vez que não houve reaplicação de doses nestes solos. Porém, esta hipótese é pouco plausível, pois a quantidade de P absorvida no primeiro cultivo foi muito pequena em relação ao montante aplicado. Mesmo nos tratamentos em que houve elevada produção de MSPA, a quantidade de P extraído pelas plantas, independentemente da dose aplicada, foi sempre menor do que 5% da quantidade aplicada. Também deve ser considerado que os teores de P nos solos utilizados na determinação da MET no cultivo II, são referentes à amostragem feita antes deste cultivo, e não aquela feita antes do primeiro. Portanto, o teor de P na MET é reflexo direto da quantidade de P extraída pelos métodos, independentemente da quantidade de P absorvida pelas plantas no cultivo anterior.

Os teores de P na MET extraído por ambos os métodos, na média de todos os solos, foram maiores pelo teste t-Student ($p < 0,05$) no segundo cultivo comparativamente ao primeiro (Figura 13). Para muitos solos esses valores eram esperados, uma vez que a resposta das plantas a doses de P no primeiro cultivo foram lineares. Entretanto, os maiores teores na MET no cultivo II contrastam com as menores produções de massa neste cultivo. Isso evidencia, apesar do menor crescimento, que as plantas continuaram sendo responsivas ao fósforo do solo, inclusive nas unidades em que não foi adicionada a dose extra de 1.100 kg ha^{-1} , por já terem apresentado respostas quadráticas no primeiro cultivo. Os dados permitem concluir que não somente o poder tampão do solo, mas também as condições ambientais existentes no segundo cultivo contribuíram para os maiores teores de P na MET. A menor temperatura do ar na maior parte dos dias, juntamente com a diminuição da radiação solar global pela menor insolação (Figura 16), podem ter diminuído a evapotranspiração e a taxa fotossintética líquida. Estes fenômenos, associados

a fatores genéticos do híbrido Pioneer (30F53 - superprecoce) semeada em épocas diferentes, possivelmente, foram os fatores que contribuíram para o menor crescimento das plantas (Andrade et al., 1996; Mozambani & Bicudo, 2009).

A diminuição da temperatura do solo afeta negativamente a absorção de fósforo pelas plantas, pela menor difusão efetiva do elemento na solução do solo, mas muito mais pela diminuição do crescimento radicular (Mackay & Barber, 1984). Plantas com sistema radicular reduzido tendem a responder a maiores teores de fósforo no solo, em compensação ao menor volume explorado. Anghinoni (1992) obteve maior crescimento inicial de plantas de milho fertilizadas no sulco de semeadura, embora esse maior crescimento inicial não tenha se transformado em maior rendimento de grãos.

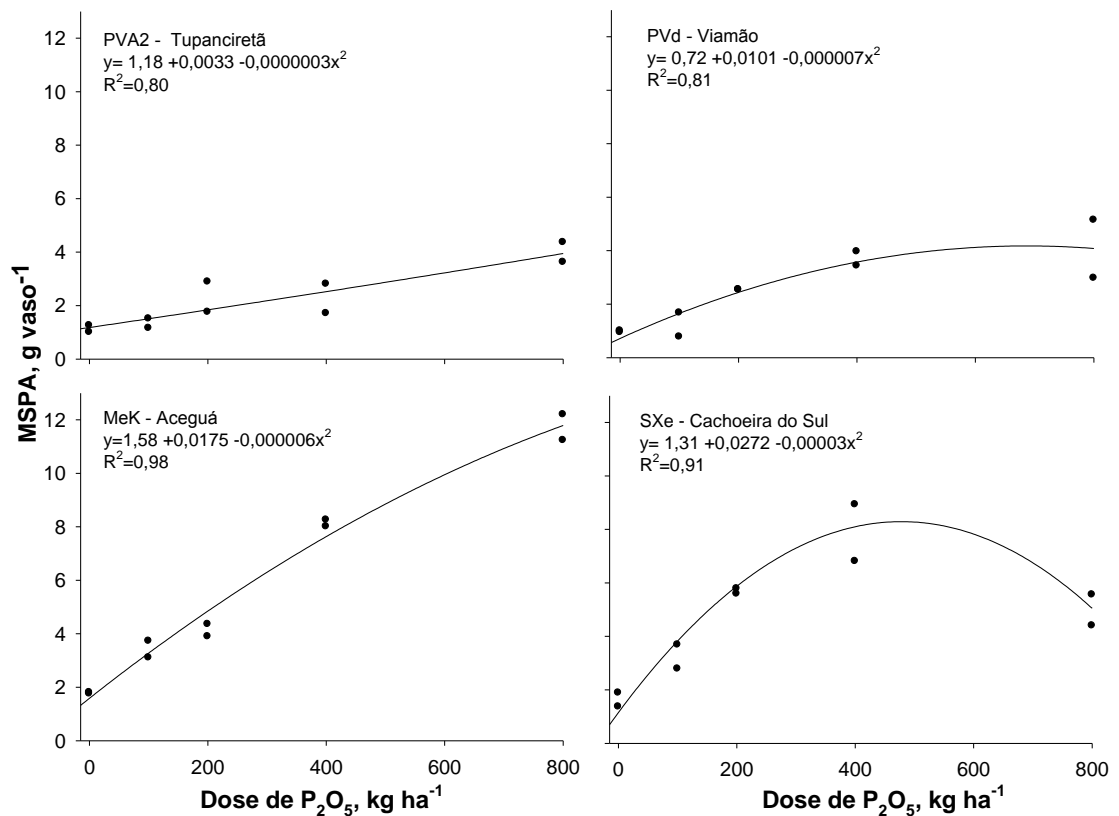


Figura 11. Regressão entre a massa seca de parte aérea (MSPA) de milho (g vaso⁻¹) cultivado por 20 dias após germinação e doses de P_2O_5 (kg ha⁻¹) aplicadas e incorporadas ao solo utilizando-se como fonte o superfosfato triplo, no segundo cultivo.

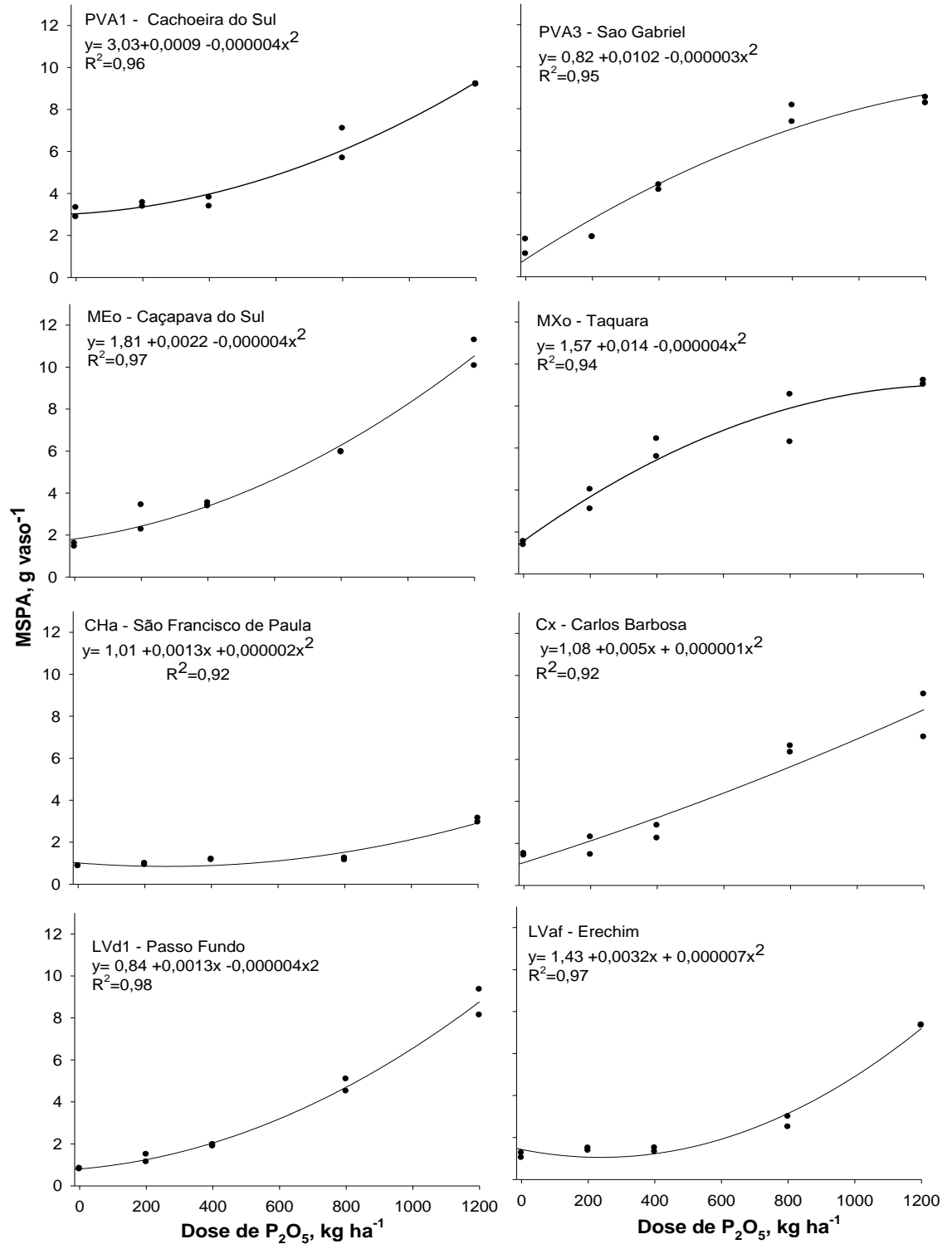


Figura 11. Continuação...

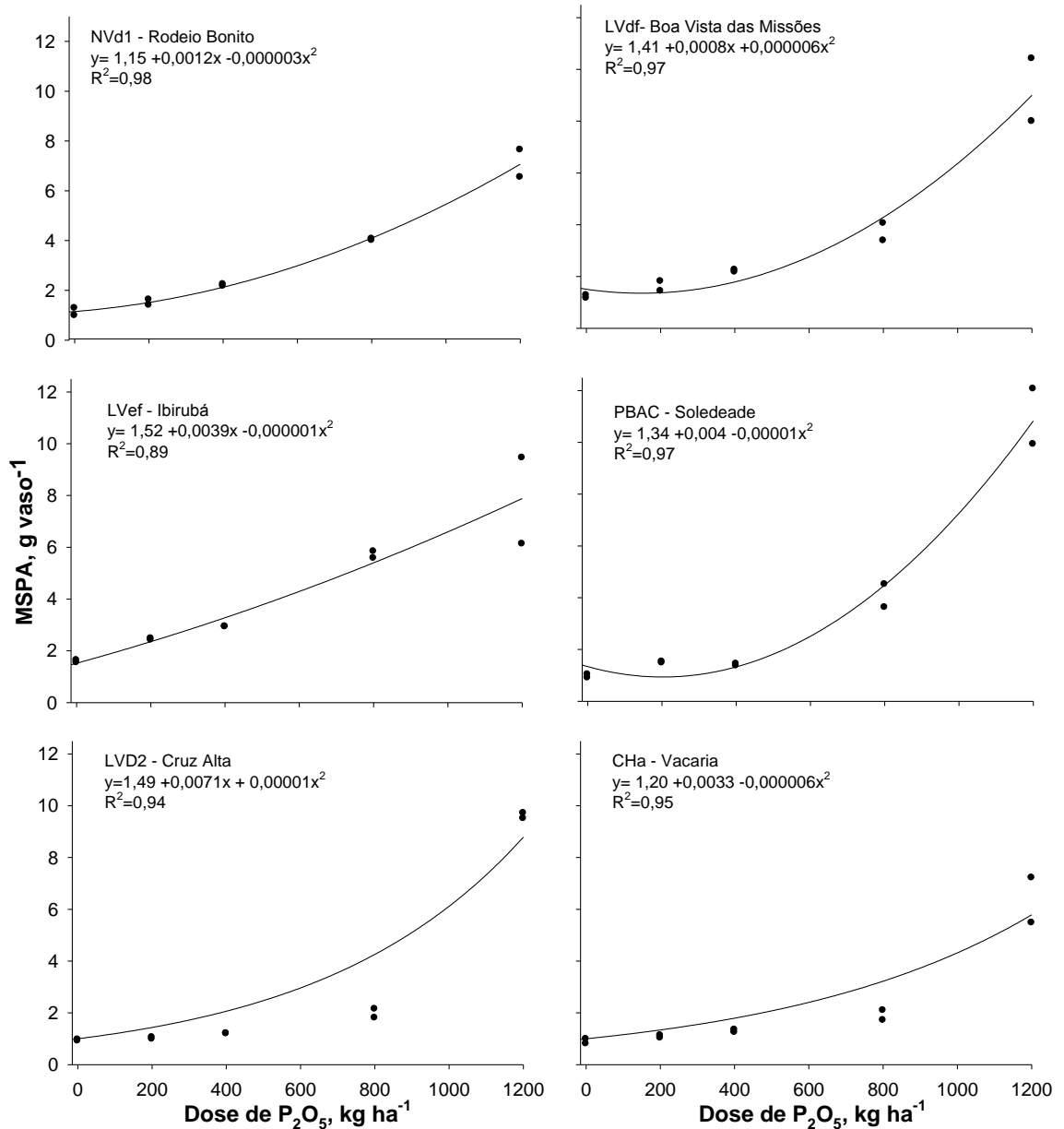


Figura 11 – Continuação...

De modo semelhante ao ocorrido no primeiro cultivo, os teores de P para a MET no cultivo II correlacionaram-se com a maioria das medidas relacionadas ao poder tampão do solo (Tabela 13). Para o método Mehlich-1, não houve diferença entre P-rem e argila, e ambos os parâmetros apresentaram coeficiente de correlação idêntico ($r=0,51^*$) com o teor de P para a MET, embora com sinais opostos. Para o método Mehlich-3, o coeficiente de correlação do teor de P para a MET foi maior com o P-rem ($r=0,80^{**}$) comparativamente à argila ($r= -0,64^{**}$). De modo geral, os coeficientes de correlação (P para MET x medidas poder tampão) do cultivo I foram superiores aos observados no cultivo II. Entretanto, as associações entre teor de P para

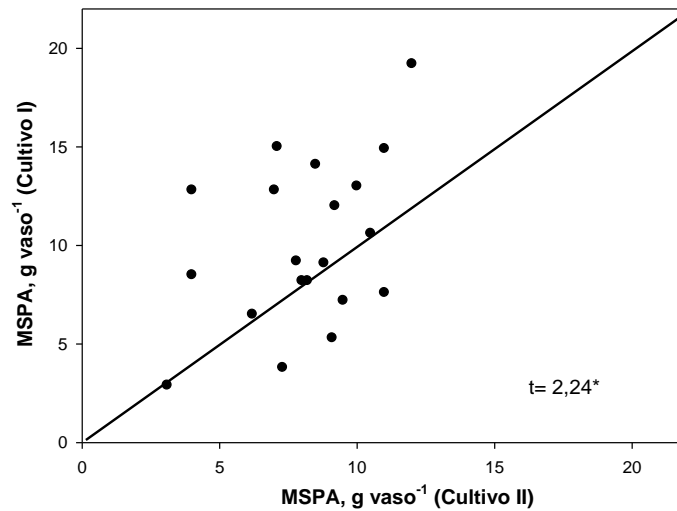


Figura 12. Rendimento máximo de massa seca da parte aérea de milho (MSPA), obtido nos cultivos I e II. A reta (45°) projetada faz referência à relação idêntica entre os rendimentos. A linha projetada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os cultivos); t - teste t-Student para médias pareadas; * significativo ($p < 0,05$).

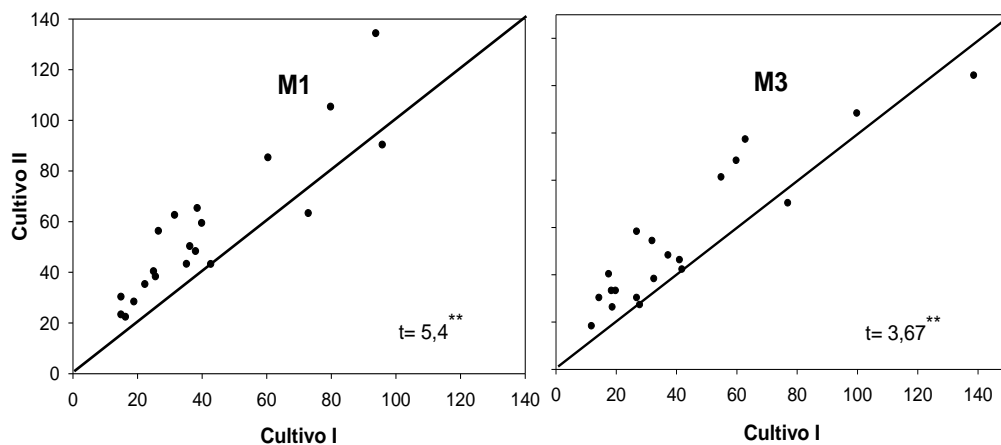


Figura 13. Relação entre os teores de fósforo extraído pelos métodos Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3) na máxima eficiência técnica (MET) obtidos nos cultivos I e II. A linha projetada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os cultivos); t- teste t-Student para médias pareadas; ** significativo ($p < 0,01$).

MET e os índices do poder tampão, em ambos os cultivos, seguiram a mesma tendência. A exceção foi a igualdade do coeficiente de correlação entre o teor de P na MET com os teores de argila e P-rem, uma vez que no cultivo I o coeficiente foi maior para o P-rem. Deste modo, as inferências em relação à

influência do poder tampão do solo sobre o teor de P na MET descritas para o cultivo I, também são válidas para o segundo.

Tabela 12. Equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação (R^2) e teor de fósforo na máxima eficiência técnica (MET) extraído pelos métodos Mehlich-1 (MET-M1) e Mehlich-3 (MET-M3) no segundo cultivo

Solo	Mehlich-1			Mehlich-3		
	Equação de regressão ⁽¹⁾	MET-M1 ⁽²⁾	R ²	Equação de regressão ⁽¹⁾	MET-M3 ⁽²⁾	R ²
		mg kg ⁻¹			mg kg ⁻¹	
PVA-1	$\hat{Y} = - 2,68 + 0,505x - 0,0053x^2$	47,7	0,86	$\hat{Y} = - 0,0263 + 0,397x - 0,004x^2$	23	0,91
PVA-2	$\hat{Y} = 0,98 + 0,042x$	71,0	0,81	$\hat{Y} = 0,043 + 0,092x - 0,0005x^2$	81,2	0,85
PVA-3	$\hat{Y} = - 2,08 + 0,3293x - 0,0025x^2$	65,8	0,96	$\hat{Y} = - 1,39 - 0,0021x^2 + 0,288x$	46,7	0,98
RR	$\hat{Y} = - 0,58 + 0,339x - 0,0025x^2$	58,0	0,84	$\hat{Y} = - 1,39 + 0,311x - 0,002x^2$	28,7	0,97
VEo2	$\hat{Y} = - 1,21 + 0,671x$	35,0	0,91	$\hat{Y} = - 2,94 + 0,796x - 0,011x^2$	37,1	0,84
MEo	$\hat{Y} = - 1,72 + 0,5957x$	20,0	0,98	$\hat{Y} = - 0,33 + 0,389x - 0,001x^2$	22,3	0,98
SXe	$\hat{Y} = - 2,50 + 0,502x - 0,0047x^2$	53,4	0,98	$\hat{Y} = - 3,57 + 0,501x - 0,005x^2$	14,6	0,70
MXo	$\hat{Y} = - 3,54 + 0,229x - 0,001x^2$	114,0	0,89	$\hat{Y} = 0,86 + 0,21x - 0,001x^2$	47,2	0,84
CHa-1	$\hat{Y} = 0,151 + 0,087x$	27,0	0,75	$\hat{Y} = 0,075 + 0,124x$	80,1	0,83
CX	$\hat{Y} = - 0,702 + 0,191x$	46,0	0,96	$\hat{Y} = - 0,774 + 0,204x$	17,0	0,83
LVd-1	$\hat{Y} = 0,158 + 0,149x$	58,5	0,98	$\hat{Y} = - 0,292 + 0,177x$	36,1	0,99
LVaf	$\hat{Y} = - 1,73 + 0,306x$	27,0	0,90	$\hat{Y} = 6,64 + 2,595x$	33,2	0,85
NVdf	$\hat{Y} = 0,512 + 0,271x$	25,0	0,95	$\hat{Y} = 0,284 + 0,277x$	19,0	0,97
LVdf	$\hat{Y} = - 0,852 + 0,290x$	33,0	0,93	$\hat{Y} = - 0,908 + 0,304x$	13,2	0,92
PBAC	$\hat{Y} = - 1,59 + 0,219x$	53,5	0,90	$\hat{Y} = - 2,053 + 0,264x$	21,3	0,89
PVd	$\hat{Y} = 0,146 + 0,169x - 0,0018x^2$	68,0	0,79	$\hat{Y} = 0,22 + 0,075x - 0,00038x^2$	37,0	0,81
LVef	$\hat{Y} = - 1,48 + 0,508x - 0,0065x^2$	30,0	0,89	$\hat{Y} = - 2,21 + 0,523x - 0,0071x^2$	50,4	0,86
LVd-2	$\hat{Y} = - 0,697 + 0,212x$	42,0	0,83	$\hat{Y} = + 2,41 - 0,423x + 0,027x^2$	22,8	0,99
CHa-2	$\hat{Y} = 1,42 - 0,1005x + 0,0052x^2$	39,5	0,99	$\hat{Y} = 2,90 - 0,496x + 0,0212x^2$	29,5	0,64

⁽¹⁾ Equação de regressão ajustada entre os teores de fósforo ($X = \text{mg dm}^{-3}$) extraído pelos métodos e a massa seca da parte aérea ($Y = \text{g vaso}^{-1}$) da cultura; ⁽²⁾ MET - para equações quadráticas foi calculado igualando a primeira derivada da equação à zero, para equações lineares foi considerado o teor de P extraído na maior dose aplicada. *O solo MEK (Aceguá) foi excluído neste cultivo.

Tabela 13. Coeficientes de correlação (r) simples de Pearson entre o teor de fósforo extraído na máxima eficiência técnica (MET) pelos métodos Mehlich-1 (MET-M1) e Mehlich-3 (MET-M3) atributos dos solos relacionados ao poder tampão no segundo cultivo

	MET-M3	Argila	P-rem	Fe _{DCB}	Fe _{OX}	CMAP	K	FCP
MET-M1	0,67**	-0,51*	0,51*	-0,50*	-0,57**	-0,47*	-0,23 ^{ns}	-0,49*
MET-M3	-	-0,64**	0,80**	-0,60**	-0,61**	-0,60**	-0,47 ^{ns}	-0,52*

^{ns}, **, * não significativo, significativo a 1 e 5% de probabilidade de erro pelo teste t, respectivamente; P-rem 60- P remanescente (60 mg L⁻¹) relação solução: solo (10:1); argila- método pipeta; Fe_{DCB}- Fe por ditionito citrato bicarbonato; Fe_{OX}- Fe por oxalato de amônio; Fe total - por ataque sulfúrico; CMAP- capacidade máxima de adsorção de fósforo; k- constante relacionada a energia de ligação; FCP- fator capacidade de fosfato.

Os teores de P extraído por Mehlich-3 na MET, na média de todos os solos, foram maiores que os obtidos por Mehlich-1, no primeiro cultivo (Figura 14 a). Isso porque o coeficiente angular (b) da equação ajustada entre Mehlich-3 (y) e Mehlich-1 (x) foi significativamente ($p < 0,05$) maior que "1" pela interpretação do intervalo de confiança ($1,14 < IC < 1,51$), embora o teste "t" ($t = 1,59^{ns}$) não tenha sido significativo, indicando semelhança entre os métodos. Por outro lado, no segundo cultivo, não houve diferença entre os métodos (Figura 14 b). Neste cultivo o valor "1" ficou dentro do intervalo de confiança calculado para o coeficiente angular ($0,77 < IC < 1,50$) demonstrando que não houve diferença entre os extratores na média dos solos, o que também foi comprovado pelo teste "t" que não foi significativo ($t = 0,25^{ns}$). Pela inspeção visual do gráfico do primeiro cultivo é possível visualizar que, para valores acima de 40 mg L^{-1} por Mehlich-1, os pontos estão situados predominantemente acima da linha de igualdade. Estes solos pertencem, em

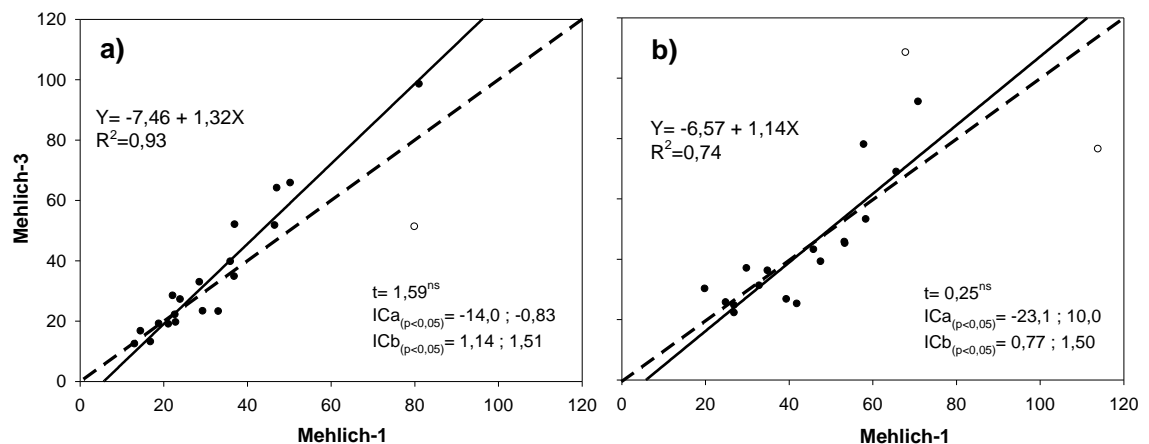


Figura 14. Relação entre as quantidades de P extraído pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3 na máxima eficiência técnica nos cultivo I (a) e II (b). A linha tracejada projetada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos). ICa e ICb - intervalo de confiança (95%) do coeficiente linear (a) e angular (b); t- teste t-Student para médias pareadas; ^{ns} não significativo. Os pontos em branco representam solos que foram excluídos dos cálculos.

sua totalidade, a classe IV, portanto, a de menor tamponamento. Como já discorrido anteriormente (Figura 10) estes solos foram os responsáveis pelas diferenças entre os extratores, uma vez que nesta classe o Mehlich-3 extrai maiores quantidades de P que o Mehlich-1 (Bortolon & Gianello, 2008). Por outro lado, no segundo cultivo, quando foi utilizada uma dose maior de P_2O_5 ,

os teores de P na MET aumentaram, praticamente, para todos os solos e não houve diferença entre os extratores.

5.4.4 Cultivo III

No terceiro cultivo, as unidades que haviam recebido as doses de 200 e 400 kg ha⁻¹ no primeiro, receberam doses adicionais de 1.200 e 2.000 kg ha⁻¹, respectivamente. Este procedimento foi feito em todas as unidades que já haviam recebido uma dose adicional (1.100 kg ha⁻¹) no segundo cultivo. Por outro lado, houve solos que não receberam doses extras no segundo cultivo. Todavia, para o terceiro cultivo, a estas unidades foram adicionados 1.100 e 1600 kg ha⁻¹ nos tratamentos que haviam recebido as doses 100 e 200 kg ha⁻¹ no primeiro cultivo, perfazendo doses finais de 1.200 e 1.800 kg⁻¹, respectivamente.

O terceiro cultivo foi caracterizado pelo reduzido desenvolvimento das plantas, pelo alto coeficiente de variação entre as repetições, embora alguns solos, ainda foram responsivos até as maiores doses de P₂O₅ aplicadas (Figura 15). A produção média de todos os solos de MSPA foi de 2,55 g vaso⁻¹, sendo inferior às obtidas nos cultivos anteriores (5,3 e 3,9 g vaso⁻¹ para cultivo I e II, respectivamente), não obstante às maiores doses de P aplicadas. A semeadura deste cultivo se deu na segunda quinzena do mês de março e, o desenvolvimento das plantas coincidiu, na maior parte do tempo, com períodos de menores temperaturas e insolação, comparativamente aos observados nos cultivos anteriores (Figura 17). Estes fatores, associados à sensibilidade do híbrido à época de semeadura (Andrade et al., 1996; Vilhegas et al., 2001), possivelmente, foram responsáveis pelo baixo rendimento de massa seca, em relação ao cultivo I e II.

Apesar do menor crescimento, algumas unidades foram responsivas até as maiores doses aplicadas de P. Entretanto, os coeficientes de acréscimo de MSPA por unidade de P₂O₅ aplicado foram muito baixos, como podem ser visualizados pelos valores dos coeficientes angulares (b1) das equações ajustadas entre as doses de fósforo e a resposta das plantas (Figura 15). Os coeficientes de ajuste (R²) entre as doses de P e o rendimento de MSPA, de modo geral, foram mais baixos neste cultivo, o que evidencia menor aderência da curva ajustada entre a resposta da cultura e as doses de fósforo. Esta

mesma constatação foi observada nos coeficientes de determinação das curvas ajustadas entre os teores de P extraídos por Mehlich-1 e 3 e a produção de MSPA (Figura 15). Para solos SXe, PVd e PVa1 devido à grande variabilidade dos dados não foi possível ajustar uma função entre a MSPA e as doses e P, nem tampouco entre o teor de P extraído pelos métodos. As plantas cultivadas solos SXe e PVd tiveram um desenvolvimento inadequado. Em virtude desses fatos, estes solos foram excluídos dos cálculos e correlações elaborados neste cultivo.

O teor de P na MET no cultivo III para ambos os extratores, assim como as equações de regressão e os coeficientes de ajustes são apresentados na Tabela 14. Apesar do menor rendimento das plantas em relação aos cultivos precedentes, a quase totalidade dos solos foi responsiva ao incremento dos teores P extraíveis, como consequência das maiores doses de P_2O_5 aplicadas. Em virtude disso, os teores de P na MET foram maiores que os obtidos nos cultivos anteriores, para ambos os extratores (Figura 16). Nos solos em que foi possível o ajuste de funções, os teores de P na MET para o método Mehlich-1 variaram de 50 a 240 mg kg⁻¹ para os solos CHa1-São Francisco de Paula e MXo-Taquara, respectivamente. Para Mehlich-3, os teores variaram de 33 a 219 mg kg⁻¹ para os solos CHa1-São Francisco de Paula e PVd2-Tupanciretã, respectivamente.

Os teores de P na MET, para ambos os métodos, aumentaram no decorrer dos cultivos, mesmo naqueles solos em que a MET não se deu na maior dose avaliada nos cultivos anteriores (Figura 16). Isso nos induz a crer, que as condições ambientais intrínsecas de cada cultivo tiveram contribuição expressiva no comportamento desta variável. Desse modo, é pouco provável que os teores de P em que se deu a MET no cultivo III, por exemplo, teriam sido os mesmos, caso tivessem sido aplicadas as doses utilizadas neste cultivo no primeiro ou mesmo no segundo. Foi a partir deste entendimento, que não foram utilizados nos cálculos de correlação os teores de P na MET obtidos em cultivos diferentes. Assim, as inferências em relação à influência do poder tampão do solo no teor de P para a MET foram feitas individualmente para cada cultivo.

As correlações entre o teor de P na MET no cultivo III e os atributos dos solos relacionados ao poder tampão tiveram a mesma tendência da

verificada nos cultivos precedentes (Tabela 15). O teor de P na MET extraído por ambos os métodos correlacionou-se significativamente com os principais atributos do solo relacionados ao poder tampão do solo. Dentre os atributos avaliados, embora a maioria tenha sido significativa à exceção da constante k , o índice que apresentou o maior coeficiente de correlação foi o P-rem, para ambos extratores. Este índice apresentou coeficientes de $0,70^{**}$ e $0,73^{**}$ para os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3, respectivamente. Por outro lado, os coeficientes com os teores de argila foram de $-0,59^*$ e $-0,67^*$ para Mehlich 1 e 3, respectivamente.

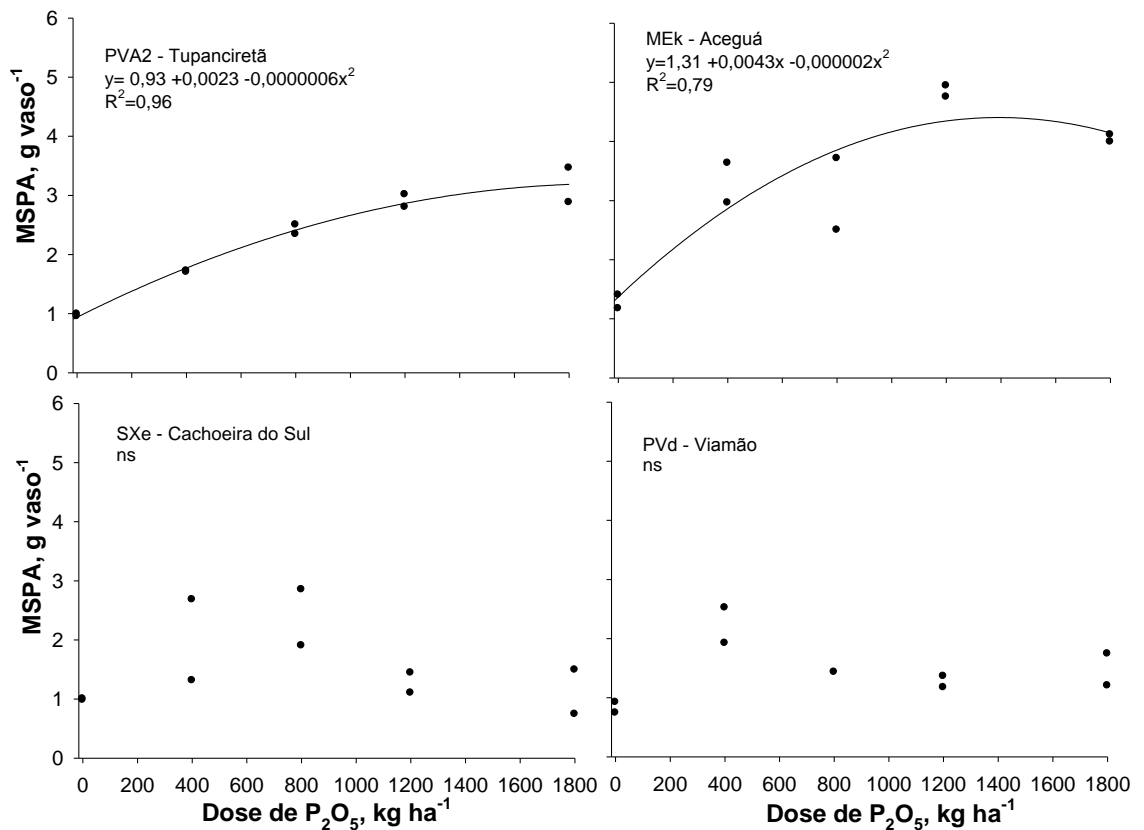


Figura 15. Regressão entre a massa seca de parte aérea (MSPA) de milho (g vaso^{-1}) cultivado por 20 dias após germinação e doses de P_2O_5 (kg ha^{-1}) aplicadas e incorporadas ao solo utilizando-se como fonte o superfosfato triplo, no terceiro cultivo.

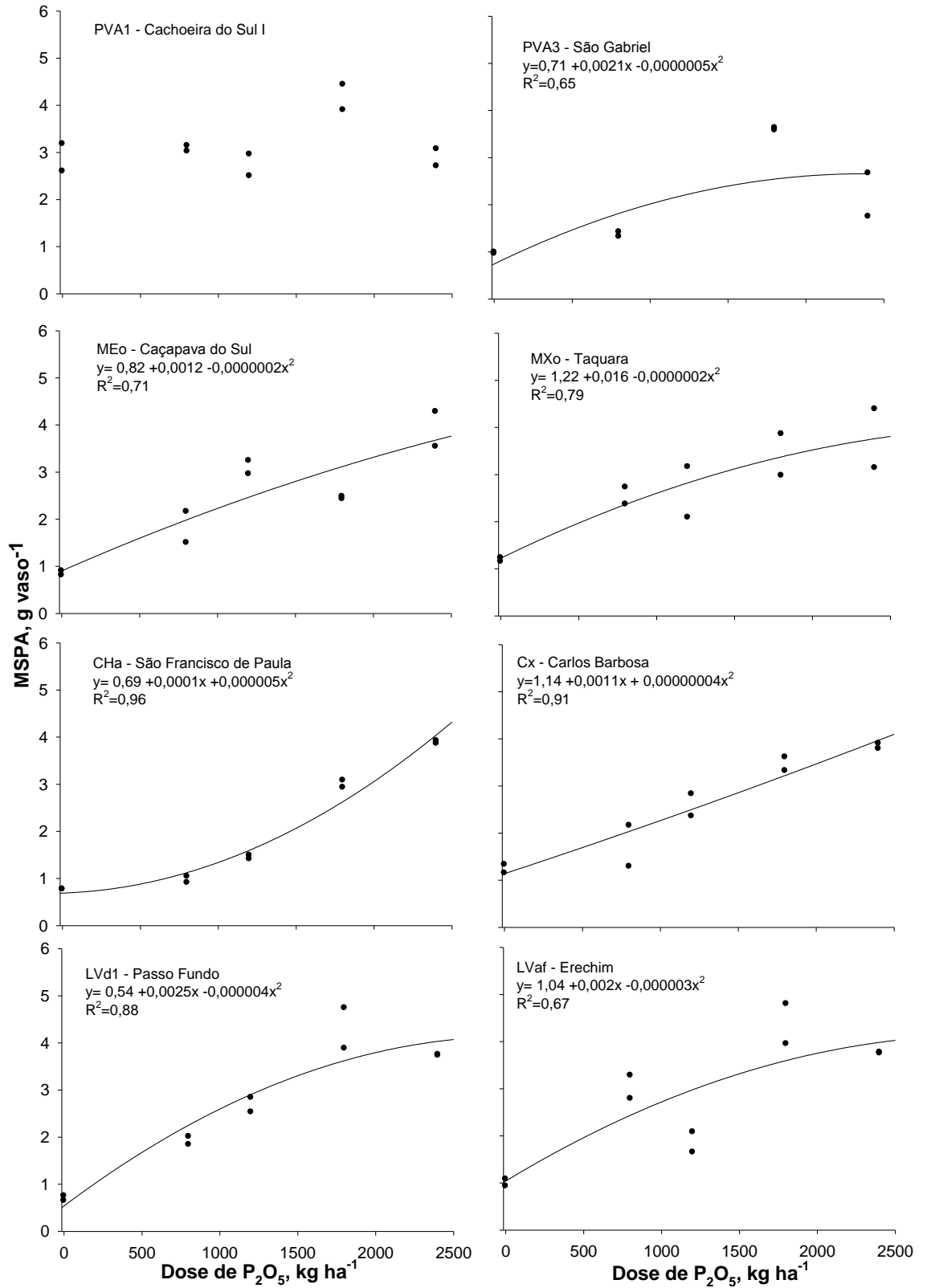


Figura 15. Continuação...

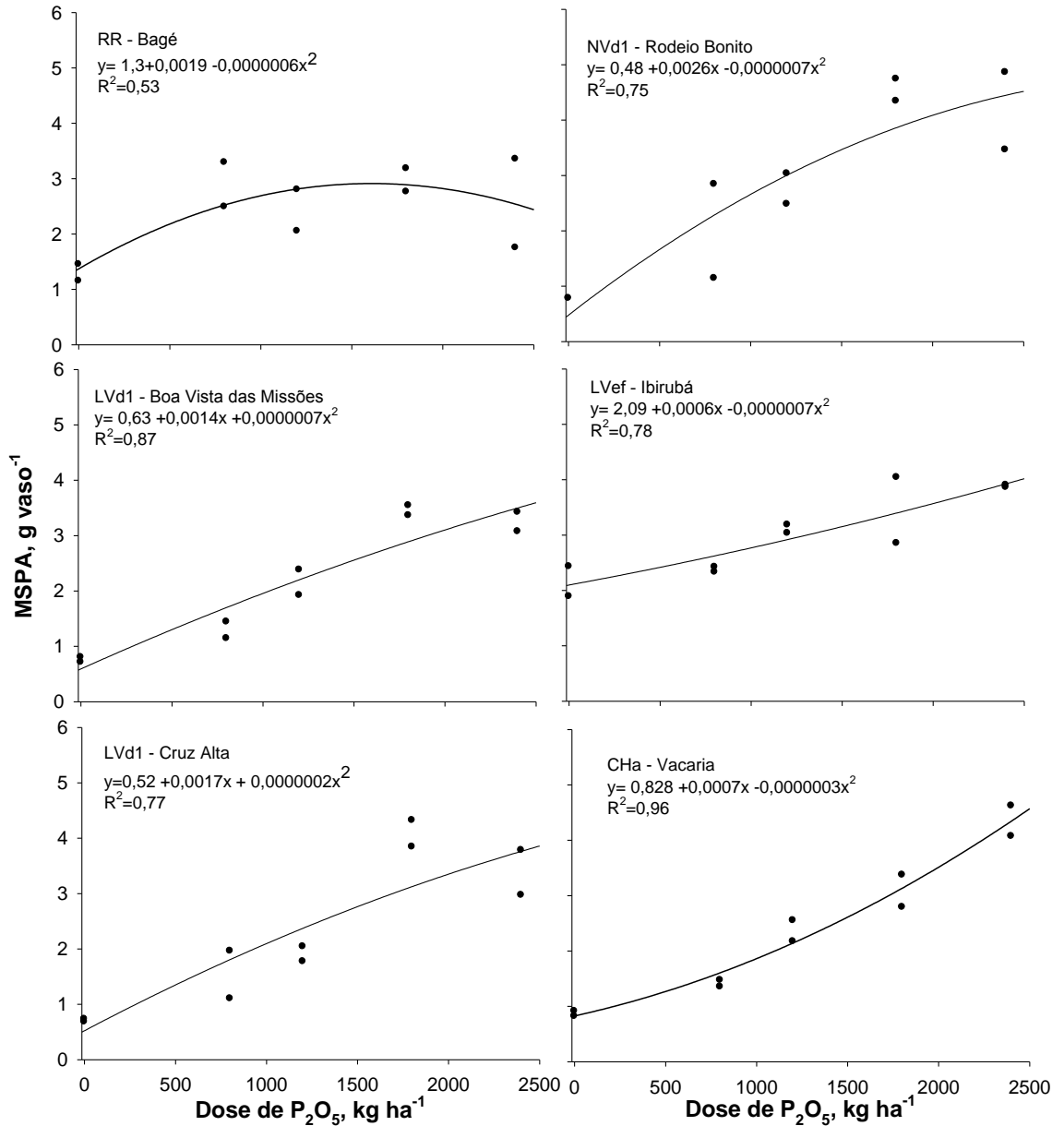


Figura 15. Continuação...

Em geral, nos três cultivos desenvolvidos e na maioria dos cenários, os coeficientes de correlação do teor de P na MET foram superiores para o P-rem comparativamente à argila. Em algumas situações houve semelhança entre eles, porém os coeficientes do P-rem em nenhuma condição foram inferiores aos obtidos com a argila. Isso evidencia, uma vez mais, a maior sensibilidade do P-rem na identificação dos efeitos do poder tampão dos solos sobre a disponibilidade de P às plantas.

Tabela 14. Equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação (R^2) e teor de fósforo extraído na máxima eficiência técnica (MET) pelos métodos Mehlich-1 (MET-M1) e Mehlich-3 (MET-M3) no terceiro cultivo

Solo	Mehlich-1			Mehlich-3		
	Equação de regressão ⁽¹⁾	MET-M1 ⁽²⁾	R^2	Equação de regressão ⁽¹⁾	MET-M3 ⁽²⁾	R^2
PVA-1	$\hat{Y} = 0,88 + 0,019x - 0,0004x^2$	194,0	0,95	$\hat{Y} = 0,85 + 0,022x - 0,00005x^2$	219,0	0,94
PVA-2	$\hat{Y} = 0,42 + 0,027x - 0,00007x^2$	197,0	0,79	$\hat{Y} = 0,32 + 0,037x - 0,0001x^2$	184,0	0,74
PVA-3	$\hat{Y} = 1,13 + 0,031x - 0,0001x^2$	157,0	0,78	$\hat{Y} = -0,0001x^2 + 0,029x + 1,13$	145,0	0,81
RR	$\hat{Y} = 0,53 + 0,095x - 0,0005x^2$	95,7	0,96	$\hat{Y} = 0,64 + 0,126x - 0,001x^2$	63,0	0,86
VEo2	$\hat{Y} = 1,19 + 0,14x - 0,0012x^2$	59,0	0,87	$\hat{Y} = 1,72 + 0,094x - 0,0007x^2$	67,0	0,67
MEo	$\hat{Y} = 1,28 + 0,035x - 0,0002x^2$	87,0	0,64	$\hat{Y} = 1,21 + 0,035x - 0,0002x^2$	87,5	0,64
SXe	$\hat{Y} = 0,61 + 0,040x - 0,0002x^2$	240,0	0,72	$\hat{Y} = 1,02 + 0,031x - 0,00009x^2$	174,0	0,80
MXo	$\hat{Y} = 0,17 + 0,068x$	50,0	0,85	$\hat{Y} = 0,13x - 0,55$	33,0	0,94
CHa-1	$\hat{Y} = 0,72 + 0,048x - 0,0002x^2$	121,0	0,91	$\hat{Y} = 0,61 + 0,054x - 0,0002x^2$	136,0	0,80
CX	$\hat{Y} = 0,32 + 0,054x - 0,0003x^2$	90,0	0,88	$\hat{Y} = 0,21 + 0,068x - 0,0003x^2$	113,0	0,92
LVd-1	$\hat{Y} = 0,38 + 0,12x - 0,0012x^2$	53,0	0,63	$\hat{Y} = -0,49 + 0,19x - 0,0021x^2$	43,0	0,63
LVaf	$\hat{Y} = 0,52 + 0,14x - 0,0012x^2$	58,0	0,85	$\hat{Y} = -0,29 + 0,24x - 0,0029x^2$	41,6	0,95
NVdf	$\hat{Y} = 0,14 + 0,071x - 0,0004x^2$	88,0	0,90	$\hat{Y} = -0,22 + 0,138x - 0,0013x^2$	53,0	0,90
LVdf	$\hat{Y} = 0,72 + 0,031x - 0,0001x^2$	150,0	0,95	$\hat{Y} = 0,55 + 0,0003x^2 + 0,064x$	107,0	0,97
LVef	$\hat{Y} = 2,01 + 0,0221x$	88,0	0,81	$\hat{Y} = 1,75 + 0,051x - 0,0003x^2$	86,0	0,71
LVd-2	$\hat{Y} = 0,36 - 0,0002x^2 + 0,053x$	131,0	0,86	$\hat{Y} = -0,0005x^2 + 0,084x + 0,29$	84,0	0,84
CHa-2	$\hat{Y} = 0,73 + 0,032x$	95,0	0,94	$\hat{Y} = 0,42 + 0,0598x$	65,0	0,94

⁽¹⁾ Equação de regressão ajustada entre os teores de fósforo ($X = \text{mg kg}^{-1}$) extraídos pelos métodos e a massa seca da parte aérea ($Y = \text{g vaso}^{-1}$) da cultura; ⁽²⁾ MET- para equações quadráticas foi calculado igualando a primeira derivada da equação à zero, para equações lineares foi considerado o teor de P extraído na maior dose aplicada. *Os solos SXe (Cachoeira do Sul I) e PVd (Viamão) foram excluídos neste cultivo.

Tabela 15. Coeficientes de correlação (r) simples de Pearson entre o teor de fósforo extraído na máxima eficiência técnica (MET) pelos métodos Mehlich-1 (MET-M1) e Mehlich-3 (MET-M3) e atributos dos solos relacionados ao poder tampão no terceiro cultivo

	MET-M3	Argila	P-rem	Fe_{DCB}	Fe_{OX}	CMAP	k	FCP
MET-M1	0,91**	-0,59*	0,70**	-0,50*	-0,60**	-0,55*	-0,36 ^{ns}	-0,49*
MET-M3		-0,67**	0,73**	-0,56*	-0,55**	-0,59*	-0,45 ^{ns}	-0,52*

^{ns}, **, * não significativo, significativo a 1 e 5% de probabilidade de erro pelo teste t, respectivamente; P-rem 60- P remanescente (60 mg L^{-1}) relação solução: solo (10:1); argila- método pipeta; Fe_{DCB} - Fe por ditionito citrato bicarbonato; Fe_{OX} - Fe por oxalato de amônio; Fe total - por ataque sulfúrico; CMAP- capacidade máxima de adsorção de fósforo; k- constante relacionada a energia de ligação; FCP- fator capacidade de fosfato.

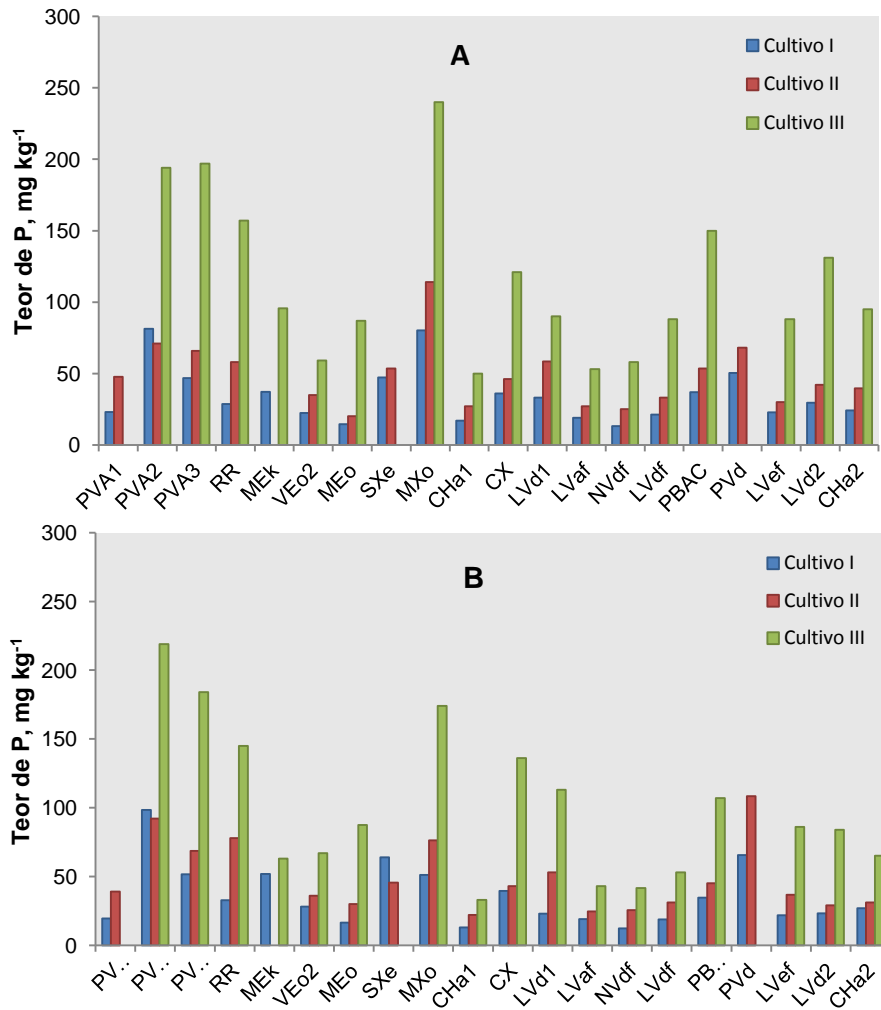


Figura 16. Teores de fósforo na máxima eficiência técnica (MET) extraídos pelos métodos Mehlich-1 (A) e Mehlich-3 (B) nos três cultivos desenvolvidos.

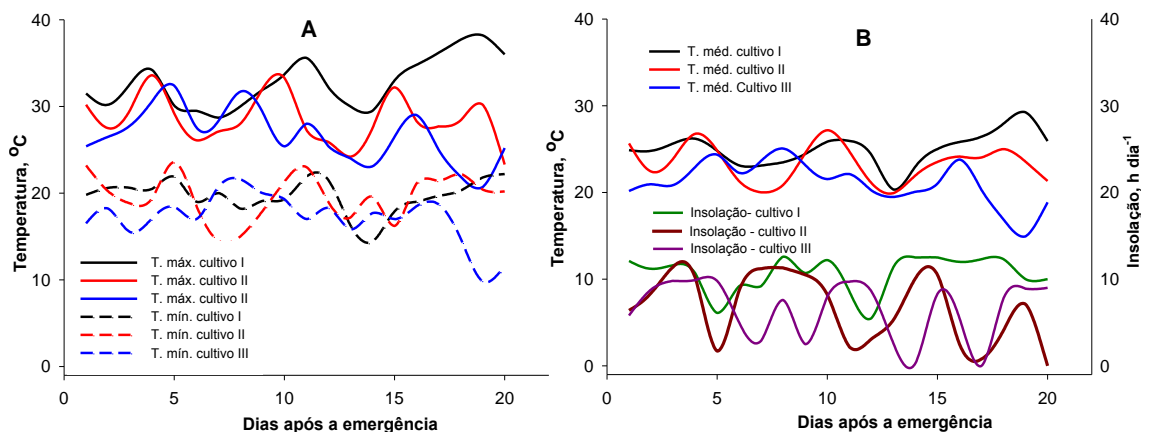


Figura 17. Variação da temperatura máxima e mínima (A), da temperatura média compensada e horas diárias de insolação (B) nos dias decorrentes após a germinação das plantas, para os cultivos I, II e III. Fonte: INMET (<http://www.inmet.gov.br>) estação 83967, Porto Alegre-RS.

5.5 Avaliações de diferentes concentrações de P na solução de determinação do P-remanescente

O uso de maiores concentrações de fósforo na solução para obtenção do P-remanescente não resultou em melhores ajustes com a maioria dos atributos dos solos avaliados (Tabela 16). Foram testadas outras duas concentrações de P na solução (80 e 100 mg L⁻¹), além daquela de 60 mg L⁻¹, que é usualmente utilizada em laboratórios de rotina que empregam o P-remanescente como índice do poder tampão do solo (Alvarez et al., 1999; Sousa & Lobato, 2002). As concentrações avaliadas tiveram correlação muito forte entre si ($r > 0,99$), e os coeficientes destas com as demais medidas relacionadas ao poder tampão dos solos, de modo geral, foram semelhantes.

Uma das poucas avaliações em que se observou tendência de elevação do coeficiente, na medida em que houve aumento da concentração de P na solução, foi com a CMAP (Tabela 16). Os coeficientes foram 0,74^{**}, 0,76^{**} e 0,81^{**} para as concentrações de 60, 80 e 100 mg L⁻¹, respectivamente. A explicação para essa tendência reside no fato de terem sido selecionados alguns solos com CMAP muito elevada (>600 mg kg⁻¹). A determinação do P-rem com a dose de 60 mg L⁻¹, na relação solo:solução 10:1, equivale a uma adsorção de 600 mg kg⁻¹, caso todo P adicionado em solução seja adsorvido pelo solo. Com isso, solos que possuem CMAP maior que esse valor, tendem a apresentar valores de P-remanescente em solução muito semelhantes. Isso fica evidenciado quando se ajusta uma regressão entre a CMAP determinada pela isoterma de Langmuir e a CMAP determinada pelo P-remanescente da solução de 60 mg L⁻¹. Nesse ajuste, quando se utilizam apenas solos que possuem CMAP menor que 600 mg kg⁻¹, a função linear é a que melhor se adequa aos dados. Porém, quando se utilizam todos os solos, a função quadrática é a que apresenta o melhor ajuste, pois a partir de 600 mg kg⁻¹ a curva tende a flexionar e a manter-se constante. Por outro lado, as concentrações de 80 e 100 mg L⁻¹ correspondem respectivamente a adsorções máximas de 800 e 1000 mg kg⁻¹, se todo P adicionado for adsorvido. Essas concentrações maiores de P em solução permitem diferenciar uma amplitude maior de solos. Pois, quando se ajusta regressão entre a CMAP por Langmuir e a determinada apenas pelo P-remanescente destas soluções, a relação tende a ser linear para uma maior faixa de valores, além dos 600 mg kg⁻¹ da

solução de 60 mg L^{-1} . Em virtude disso é que se observaram maiores coeficientes de correlação linear de Pearson, na medida em que houve aumento do P em solução, uma vez que foram utilizados cinco solos com CMAP superior a 600 mg kg^{-1} .

A semelhança dos coeficientes de correlação do P-remanescente, determinado com diferentes concentrações, com as medidas relacionadas ao poder tampão do solo, indica que não há vantagem em substituir a concentração usual (60 mg L^{-1}) sugerida por Alvarez et al. (2000). Por outro lado, com as crescentes preocupações ambientais, é pertinente num futuro próximo, que os laudos de análise de solo forneçam algum índice relacionado à probabilidade perdas de P para ambientes aquáticos. Dentre os diversos índices existentes, o grau de saturação de fósforo (GSP) é um dos mais difundidos (Bortolon, 2010). Esse índice relaciona a quantidade de fósforo extraída por Mehlich com capacidade máxima de adsorção de P do solo ($\text{GSP} = \text{P-Mehlich} / \text{CMAP}$); quanto maior for o quociente, maior é a probabilidade de perda de P para os sistemas aquáticos (Allen & Mallarino, 2006). Como a CMAP é inexecutável em escala de rotina, a medida do P-remanescente, caso seja adotada como índice do poder tampão dos solos, poderia, também, ser utilizada para determinar a CMAP. Isso é possível porque a relação entre estas medidas é linear, uma vez que a concentração de P utilizada para se determinar P-remanescente é uma dentre as várias usadas para determinar a CMAP. Porém, para o hipotético uso do GSP nos laudos de análise do solo com a CMAP calculada com base no P-remanescente, o uso de concentrações maiores que 60 mg L^{-1} seriam indicadas. Isso porque, como demonstrado anteriormente, a utilização de maiores concentrações resulta em melhores correlações com a CMAP.

5.6 Métodos de determinação de argila e as relações com o poder tampão do solo

O grau de ajuste entre o teor de argila e as medidas relacionadas ao poder tampão de P no solo, de modo geral, foi de baixo ($r < 0,4$) a moderado ($r < 0,6$). Entretanto, os coeficientes de correlação tendem a ser ainda menores, quando se utilizam os teores de argila obtidos pelo método usual do laboratório de rotina nos cálculos de correlação (Tabela 17). Todas as inferências

consoantes à argila descritas até aqui, foram feitas baseadas nos teores determinados pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1999). Esse método é laborioso e demorado, sendo impraticável sua utilização em escala de rotina para um grande número de solos. Uma modificação do método do hidrômetro (Gee & Bauder, 1986), comumente denominado por densímetro de Bouyoucos, em referência ao método original (Bouyoucos, 1927), embora menos exato que o da pipeta, é o método usual para determinação de argila em laboratórios de rotina. Na análise de rotina, em virtude da necessidade de determinação de argila de um grande número de amostras, num curto período de tempo, a rapidez operacional exigida nem sempre permite a execução do procedimento de modo rigoroso, obtendo-se baixa exatidão nos resultados. Isso, associado a problemas intrínsecos do método, pode contribuir para que ocorram resultados com teores de argila discrepantes dos obtidos pelo método da pipeta ou mesmo de outros métodos que utilizam o densímetro de Boyoucos (Norambuena et al., 2002; García & Núñez, 2008). Essa discrepância é frequentemente verificada na prática, quando produtores enviam uma mesma amostra de solo para a análise química e física. Como a metodologia utilizada para determinação de argila na análise química é diferente daquela utilizada na física, os teores nem sempre são condizentes. Alguns pesquisadores sugerem, inclusive, que a denominação “teor de argila” presente no laudo da análise química mude de terminologia, e passe a se chamar “índice tampão”. Essa mudança teria por objetivo dirimir as contradições, uma vez que o teor de argila presente na análise química tem única e exclusiva finalidade de classificar os solos quanto ao tamponamento, para interpretação da disponibilidade de P às plantas.

Não houve diferença entre os teores de argila determinados pelo método da pipeta e pelo método usual do laboratório de rotina (hidrômetro) (Figura 18). Os parâmetros “a” (intersecção) e “b” (declividade) não diferiram de 0 e 1, respectivamente; bem como não houve diferença entre as médias pelo teste “t” ($t=0,53^{ns}$). A ausência de diferença já era esperada, uma vez que o método do hidrômetro foi calibrado tendo por base os teores quantificados pelo método da pipeta. Embora, na média dos solos, não tenha havido diferença entre os métodos, é possível observar pelo gráfico (pontos circulados) que alguns solos se distanciaram muito da reta projetada. Para esses solos a

diferença entre os métodos foi maior que 100 g kg^{-1} . Essas diferenças, esporádicas, não podem ser creditadas a problemas associados à dispersão dos microagregados estáveis (Neto, 1996; Donagemma et al. 2008; Miyazawa & Barbosa, 2011) que são frequentemente observados em solos com alto teor de matéria orgânica e, em solos conduzidos sob sistema plantio direto em longo prazo. Isso porque, ambos os métodos utilizados utilizam o mesmo procedimento de dispersão, o que os diferencia é o modo de quantificar a argila dispersa.

Os solos selecionados para esse estudo, em sua grande maioria, não eram utilizados para cultivo de plantas. Deste modo, pela ausência de solos conduzidos sob sistema plantio direto, não foi possível avaliar os efeitos da subestimação do teor argila em decorrência do aumento da matéria orgânica nesse sistema, nas correlações com as medidas do poder tampão do solo. Por outro lado, a subestimação pela matéria orgânica, quando ocorreu, teoricamente, deve ter sido percebida por ambos os métodos empregados. É de conhecimento no meio científico, que o uso de pré-tratamentos para minimizar a ação dos agentes agregantes dos solos (Tavares Filho & Magalhães, 2008; Sousa Neto et al., 2009) bem como o uso de técnicas alternativas à dispersão mecânica, como sonificação (Vitorino et al., 2007), aumentam a exatidão da determinação de argila. Todavia, estas técnicas são impraticáveis em escala de rotina e, por isso, não foram avaliadas neste estudo, exceção feita para o solo CHa-1. Este solo apresentou 100 g kg^{-1} de matéria orgânica e teores de argila de 190 e 150 g kg^{-1} pelo método do hidrômetro e pipeta, respectivamente. Por outro lado, quando efetuada a queima da matéria orgânica, os teores se elevaram para 340 g kg^{-1} pelo método da pipeta. Entretanto, para os cálculos gerais de correlação desenvolvidos, foi utilizado o teor encontrado na determinação sem pré-tratamento. Isso porque, o escopo do estudo foi avaliar os métodos exequíveis em escala de rotina (P-remanescente e argila-hidrômetro), incluindo as implicações de suas limitações analíticas na classificação dos solos quanto ao poder tampão de fósforo.

Tabela 16. Correlação de entre diferentes concentrações de P remanescente e atributos dos solos relacionados ao poder tampão de fósforo¹

	P-80	P-100	D-M1 30 dias	D-M1 80 dias	D-M3 30 dias	D-M3 80 dias	MET M1 cult1	MET M3 cult1	MET M1 cult2	MET M3 cult2	Fe _{-DCB}	Fe _{-OX}	Fe- total	Fe _{OX} / Fe _{DCB}	CMAP	k	FCP
P-60	0,99**	0,99**	-0,59**	-0,61**	-0,66**	-0,69**	0,65**	0,74**	0,51*	0,80**	-0,57**	-0,50**	-0,53**	0,28 ^{ns}	-0,74**	-0,54*	-0,65**
P-80	-	0,99**	-0,60**	-0,63**	-0,67**	-0,70**	0,65**	0,75**	0,54*	0,81**	-0,57**	-0,53**	-0,54**	0,27 ^{ns}	-0,76**	-0,54*	-0,66**
P-100	-	-	-0,60**	-0,66**	-0,69**	-0,72**	0,64**	0,53*	0,60**	0,81**	-0,55**	-0,55**	-0,51**	0,25 ^{ns}	-0,81**	-0,58**	-0,69**

P- 60, 80 e 100 - P remanescente nas concentrações de 60, 80 e 100 mg L⁻¹, respectivamente; D-M1 e D-M3 (30 e 80) – Dose de fósforo necessária para aumentar 1 mg kg⁻¹ de P na análise pelos métodos Mehlich-1(M1) e Mehlich-3 (M3), com amostras coletadas 30 e 80 dias após a aplicação do fertilizante; MET-M1 e M3 (cult.1 e cult.2)- Teor de fósforo extraído por Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3(M3) na máxima eficiência técnica no primeiro cultivo de milho (cult. 1) e segundo cultivo (cult. 2); Fe_{DCB}- Fe por ditionito citrato bicarbonato; Fe_{OX}- Fe por oxalato de amônio; Fe total- ferro total por ataque sulfúrico; Fe_{OX}/Fe_{DCB}– relação Fe oxalato e Fe ditionito; CMAP- capacidade máxima de adsorção de fósforo; k- constante relacionada a energia de ligação; FCP- fator capacidade de fosfato.

Tabela 17. Correlação de entre os teores de argila determinado e pelo método da pipeta e pelo densímetro modificado (método do laboratório de rotina) com atributos dos solos relacionados ao poder tampão de fósforo¹

	Argila dens.	D-M1 30 dias	D-M3 30 dias	D-M1 80 dias	D-M3 80 dias	MET M1 cult1	MET M3 cult1	MET M1 cult2	MET M3 cult2	Fe _{DCB}	Fe _{-OX}	Fe _{OX} / Fe _{DCB}	CMAP	k	FCP
Pipeta	0,96**	0,50*	0,36 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,50*	-0,57**	-0,55**	-0,51**	-0,64**	0,66**	0,11 ^{ns}	-0,31 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,26 ^{ns}
Hidrômetro	-	0,40 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,41 ^{ns}	-0,50*	-0,48*	-0,51*	-0,56**	0,67**	0,02 ^{ns}	-0,39 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,15 ^{ns}

Argila pipeta - teores de argila determinados pelo método da pipeta; Argila hidrômetro - teores de argila determinados pelo método do densímetro (bouyoucus); D-M1 e D-M3 (30 e 80) - Dose de fósforo necessária para aumentar 1 mg kg⁻¹ de P na análise pelos métodos Mehlich-1(M1) e Mehlich-3 (M3), com amostras coletadas 30 e 80 dias após a aplicação do fertilizante; MET-M1 e M3 (cult.1 e cult.2)- Teor de fósforo extraído por Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3(M3) na máxima eficiência técnica no primeiro cultivo de milho (cult. 1) e segundo cultivo (cult. 2); Fe_{DCB}- Fe por ditionito citrato bicarbonato; Fe_{OX}- Fe por oxalato de amônio; Fe_{OX}/Fe_{DCB} – relação Fe oxalato e Fe ditionito; CMAP- capacidade máxima de adsorção de fósforo; k- constante relacionada a energia de ligação; FCP- fator capacidade de fosfato.

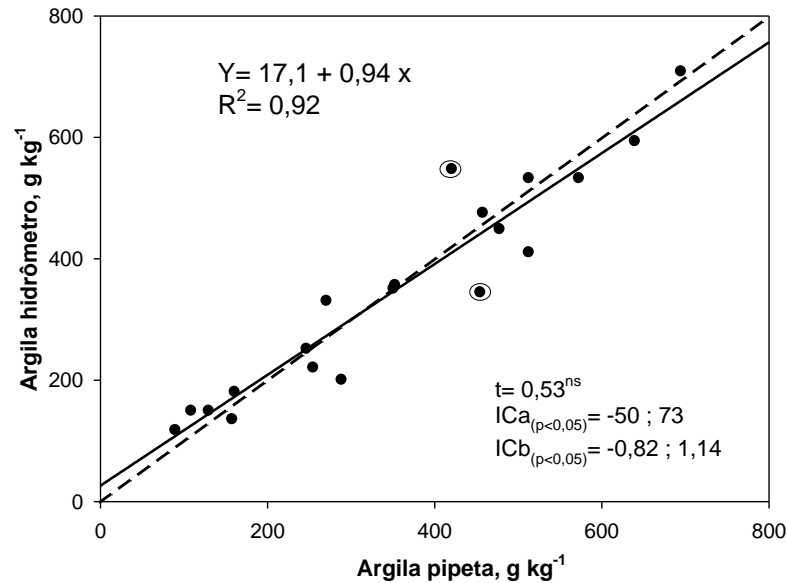


Figura 18. Relação entre os teores de argila determinada pelo método da pipeta e pelo método usual do laboratório de rotina (hidrômetro modificado). A linha tracejada projetada indica a relação 1:1 (ou seja, onde os pontos de dados seriam localizados se houvesse 100% de conformidade entre os métodos). ICa e ICb - intervalo de confiança (95%) do coeficiente linear (a) e angular (b); t - teste t-Student para médias pareadas; ^{ns} não significativo (p < 0,05).

5.7 Relações entre fósforo absorvido pelas plantas e fósforo predito pelos métodos

Para avaliar as relações entre as quantidades de P extraído por Mehlich-1 e 3 e as quantidades absorvidas pelas plantas foram utilizados apenas os dados dos cultivos I e II. Essa escolha se deu em decorrência da menor variabilidade experimental nesses cultivos e, também, por terem sido utilizadas doses de P₂O₅ mais coerentes com aquelas aplicadas na prática. As altas doses de P₂O₅ aplicadas no terceiro cultivo resultaram em elevados teores de P extraído por Mehlich, os quais estão muito acima dos teores comumente encontrados nos solos agrícolas.

Foram feitas regressões e correlações entre as quantidades de fósforo extraído por Mehlich-1 e Mehlich-3, com e sem separação dos solos por critério de tamponamento. Para separação dos solos foram usados apenas os índices argila e P-remanescente, devido à impossibilidade de adoção dos demais índices para uso em escala de rotina. A separação pela argila foi feita de acordo com as classes adotadas pela CQFS-RS/SC (2004), enquanto para o P-remanescente por tentativas, optando-se pelas faixas que resultaram em

maior coeficiente de correlação entre o P extraído pelos métodos e o absorvido pelas plantas. Além disso, a escolha das faixas foi feita considerando-se a lógica existente entre o P-remanescente e argila, de acordo com a Figura 3. Desse modo, foram estabelecidas quatro classes de P-remanescente, a saber: Classe I= 0 a 7 mg L⁻¹; classe II=7,1 a 15 mg L⁻¹; classe III= 15,1 a 30 mg L⁻¹; classe IV= 30,1 a 60 mg L⁻¹.

No primeiro cultivo, as quantidades de P absorvido pelas plantas variaram respectivamente de 1,15 a 73,0 mg vaso⁻¹ para os solos São Francisco de Paula-CHa1 (sem P) e Taquara-MXo (800 kg ha⁻¹), com média geral de 14 g vaso⁻¹. Para o cultivo II, os valores variaram respectivamente de 0,67 a 60,0 mg vaso⁻¹ para os solos Cruz Alta-LVd2 (sem P) e Taquara-MXo (1.200 kg ha⁻¹), com média geral de 11,5 mg vaso⁻¹. A menor quantidade média absorvida de P no segundo cultivo foi reflexo da menor produção de massa seca, como já abordado anteriormente, não obstante a maior dose de P aplicada neste cultivo.

As regressões entre as quantidades de P absorvido pelas plantas de milho e as quantidades de P extraído pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3, sem a separação dos solos por classes de tamponamento são mostrados na Figura 19. Os coeficientes de determinação (R²) foram 0,49 e 0,47 para o Mehlich-1 e, 0,51 e 0,53 para o Mehlich-3, no primeiro e segundo cultivo, respectivamente. Para estudos que objetivam seleção de métodos, esses coeficientes são considerados baixos, pois a função ajustada explica, na média dos extratores, apenas 50% da variação dos dados. Isso pode ser devido, em parte, à sensibilidade dos extratores ao poder tampão do solo, uma vez que não houve separação dos solos por este critério. Porém, as limitações preditivas dos métodos, associadas à complexidade intrínseca da disponibilidade de P no solo, que é dependente de fatores edafoclimáticos e de características inerentes às plantas, podem ter sido os fatores responsáveis pelos baixos coeficientes (Silva & Raij, 1999; Barber, 1995; Bortolon, 2005).

Os coeficientes de determinação (R²), de modo geral, aumentaram com a separação dos solos por classes de tamponamento para ambos os métodos e cultivos. No primeiro cultivo, para o método Mehlich-1, os coeficientes (R²) ficaram entre 0,58 e 0,84, com média de 0,67_{±0,11} na separação por argila (Figura 20) e entre 0,50 e 0,91, com média de 0,69_{±0,17}

(Figura 21) na separação pelo P-remanescente. Por outro lado, neste mesmo cultivo, os coeficientes para o Mehlich-3 ficaram entre 0,61 e 0,67, com $0,65_{\pm 0,02}$ na separação pela argila (Figura 22) e, entre 0,57 e 0,86, com média de $0,70_{\pm 0,12}$ pelo P-remanescente (Figura 23).

No cultivo II, os coeficientes de determinação (R^2), de modo geral, aumentaram ou se aproximaram do valor obtido sem a separação dos solos, embora houvesse dois casos pontuais em que os coeficientes foram levemente inferiores a esse. Para o método Mehlich-1, os coeficientes variaram de 0,40 a 0,69 na separação por argila (Figura 24) e de 0,36 e 0,74 pelo P-remanescente (Figura 25). Para este método o coeficiente (R^2) médio na separação por argila foi $0,53_{\pm 0,11}$, e para o P-remanescente $0,59_{\pm 0,17}$. Para o método Mehlich-3 os coeficientes variaram de 0,47 a 0,88 na separação pela argila (Figura 26) e de 0,47 e 0,81 pelo P-remanescente (Figura 27). Para este método o coeficiente médio foi $0,64_{\pm 0,19}$ na separação por argila e $0,64_{\pm 0,15}$ pelo P-remanescente.

Com isso, é evidente a melhora na capacidade preditiva dos métodos com a separação dos solos em classe de tamponamento. Essa informação só vem a corroborar com aquilo que já é de conhecimento do meio científico, que os métodos Mehlich-1 e 3 são sensíveis ao tamponamento do solo (Anghinoni & Bohnen, 1974; Bortolon & Gianello, 2008; Alcântara et al., 2008; Oliveira, 2010). Em trabalhos desenvolvidos no RS (Miola, 1995; Braidá et al., 1996; Kroth, 1998; Schlindwein, 2003) com os mesmos métodos, também foi observado aumento dos coeficientes de determinação quando os solos foram separados por classes de argila. Do mesmo modo, Gonçalves et al., (2012) trabalhando com solos alagados e a cultura do arroz, verificaram aumento do coeficiente de determinação com a separação dos solos pelos teores de óxidos de baixa cristalinidade. Entretanto, a dúvida reside em saber se há melhoria na predição da disponibilidade de P às plantas quando os solos são separados por outro índice do poder tampão do solo, neste caso o P-remanescente.

Vários estudos desenvolvidos no RS e SC nas últimas décadas têm mostrado ampla variabilidade de coeficientes de determinação entre o fósforo extraído por Mehlich e atributos relacionados às plantas, conforme os trabalhos compilados na Tabela 18. As comparações entre os estudos têm um complicador, pois estes foram conduzidos sob diferentes condições

experimentais, onde variou o número de solos; a planta-teste; a fonte fertilizante e a quantidade utilizada de solo nos vasos. Mesmo assim, é possível verificar grande variabilidade dos coeficientes de determinação, os quais em aproximadamente 80% dos trabalhos foram menores que 0,70, para o método Mehlich-1. Para o método Mehlich-3, a quantidade de trabalhos é bem menor, tendo em vista o uso mais recente deste método, entretanto, em aproximadamente 60 % dos trabalhos os coeficientes ficaram abaixo de 0,70. Neste contexto, os coeficientes encontrados neste estudo são coerentes com a maioria dos trabalhos desenvolvidos com solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

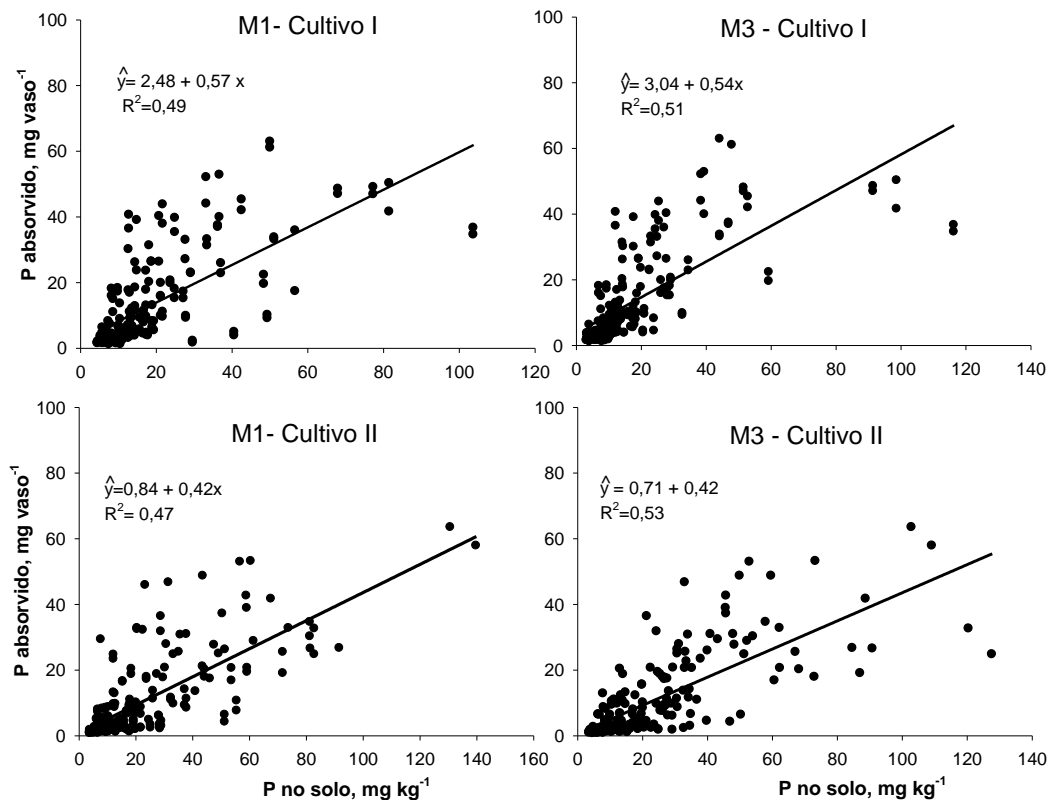


Figura 19. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvido pelas plantas de milho e as quantidades extraídas por Mehlich-1(M1) e Mehlich-3 (M3) nos cultivos desenvolvidos, sem separação dos solos por classes de tamponamento.

O método oficial adotado nos estados do RS e SC (Mehlich-1) é frequentemente criticado pela sua baixa capacidade preditiva do fósforo disponível às plantas para os diferentes sistemas edáficos e fontes fertilizantes empregadas (Raij, 1998; Silva & Raij, 1999, Gatiboni, 2003, Oliveira, 2010). Entretanto, o seu uso ainda se justifica por sua execução fácil, baixo custo e pela rapidez na determinação, não obstante suas limitações preditivas. A resina

de troca aniônica (Amer et al., 1995), segundo alguns autores (Raij, 1998; Silva & Raij, 1999) é o método, dentre aqueles com possibilidade de ser empregado em escala de rotina, potencialmente mais preciso, por, teoricamente, melhor simular a absorção de fósforo pelas plantas. Além disso, Silva & Raij (1996) afirmam que este método dispensa o uso de índices do poder tampão do solo, por não ser sensível ao mesmo. Entretanto, estudos com solos do RS (Miola, 1995; Braida et al., 1996; Kroth, 1998; Rheinheimer et al., 2003a) mostram que o método também é sensível ao poder tampão do solo (nesses estudos foi usado o teor de argila como índice de tamponamento) embora em menor magnitude comparativamente ao Mehlich-1. De modo geral, os coeficientes obtidos com este método em solos do RS e SC foram superiores aos obtidos com Mehlich-1 (Tabela 18), mas nem sempre foram elevados sendo inferiores a 0,70 em 45% dos estudos. Essa superioridade nem sempre se manifestou, pois em alguns estudos os coeficientes foram iguais ou até mesmo inferiores aos obtidos com Mehlich-1. O grande entrave para adoção da resina como método para predizer a disponibilidade de P é sua dificuldade de execução em grande escala e por ser mais moroso e oneroso que o Mehlich. Esta é a principal justificativa para a não adoção deste método nos estados do RS e SC.

Por outro lado, Bortolon (2010) faz algumas interessantes considerações sobre métodos analíticos que visam predizer a disponibilidade de nutrientes às plantas. Segundo esse autor, os métodos, em sua maioria, possuem um vício de origem, por aceitarem a premissa de que a planta não participa do processo e que o resultado é sempre uma função linear da quantidade de um determinado fator. O modelo mecanístico proposto por Barber & Cushman (1981) para simulação de absorção de nutrientes, com relativo sucesso para o fósforo (Barber, 2005; Marcolan, 2006), utiliza-se de onze parâmetros relacionados ao solo e à planta. Com base nesse modelo, seria muito otimismo esperar que uma simples medida do “P extraído” pudesse explicar toda a complexidade envolvida na disponibilidade de fósforo. E a inclusão de outros fatores na estimativa da disponibilidade em laboratório de rotina é complexa. Todavia, se há interesse de continuar utilizando o método Mehlich-1 ou mesmo substituí-lo pelo Mehlich-3, qualquer medida que seja exequível em escala de rotina e que venha agregar na predição da disponibilidade é bem vinda. Neste contexto, a adoção do P-remanescente, em

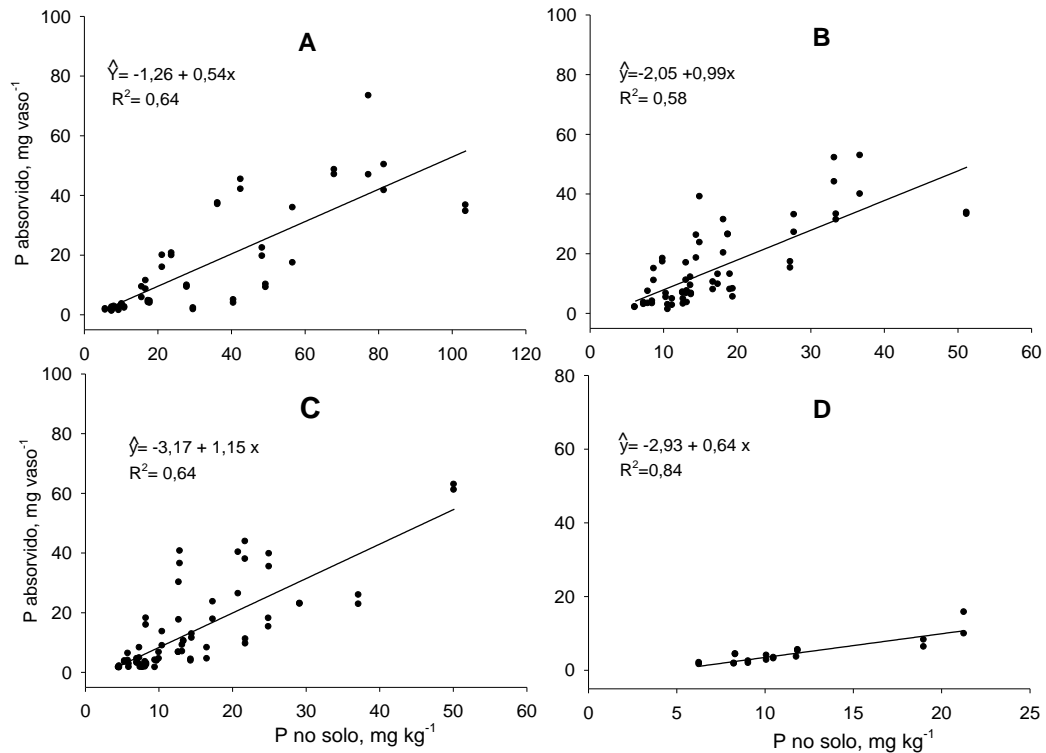


Figura 20. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvido pelas plantas de milho e as quantidades extraídas pelo método Mehlich-1 no primeiro cultivo, com separação dos solos de acordo com as classes de argila adotadas pela CQFS-RS/SC. A - 0 a 20 %; B - 21 a 40%; C - 41 a 60% e D - >60% de argila.

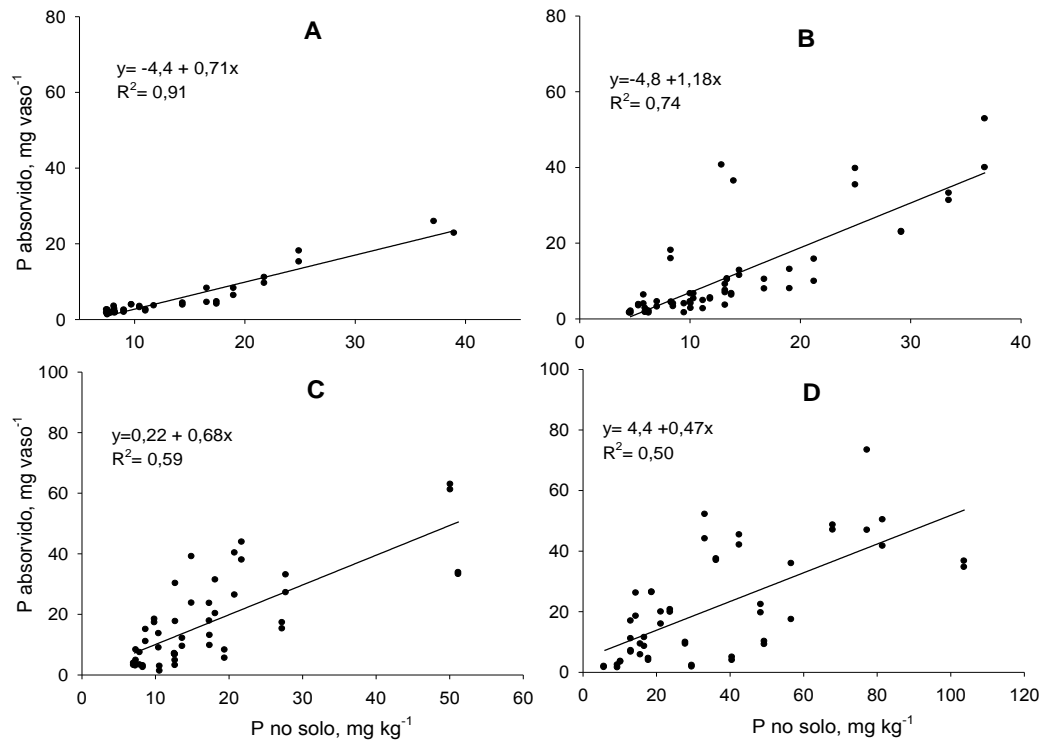


Figura 21. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvido pelas plantas de milho e as quantidades extraídas por Mehlich-1 no cultivo I, com separação dos solos de acordo com as classes de P-remanescente. A - 0 a 7 mg L⁻¹; B - 7,1 a 15 mg L⁻¹; C - 15,1 a 30 mg L⁻¹ e D - 30,1 a 60 mg L⁻¹.

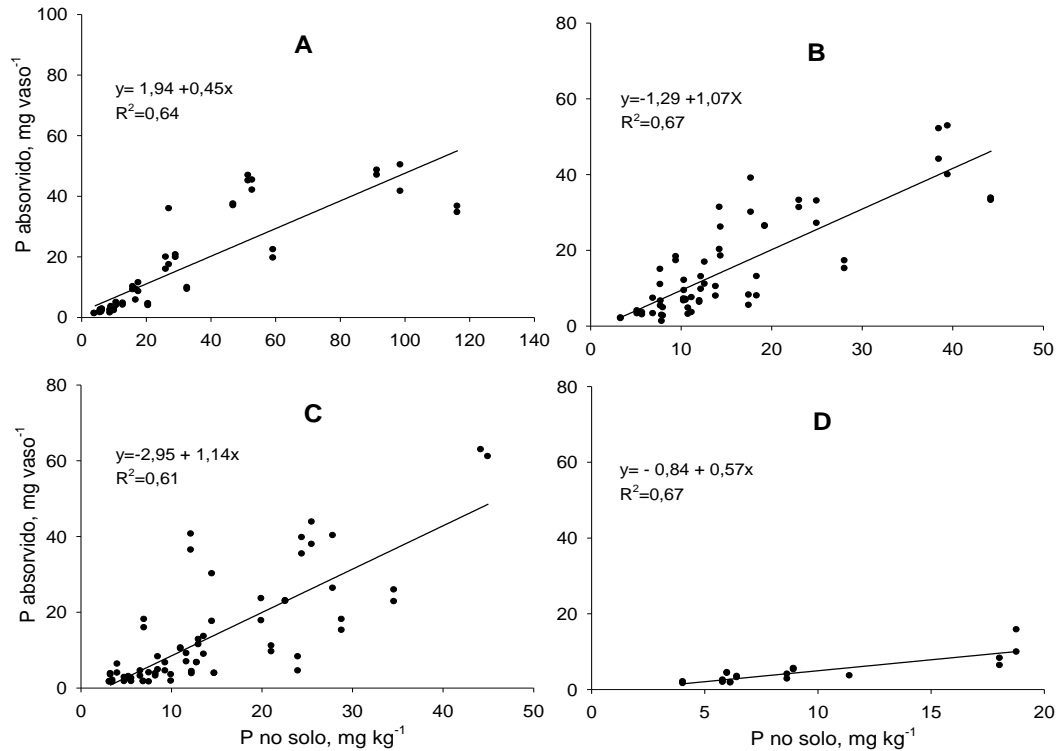


Figura 22. Regressão entre as quantidades de fósforo absorvida pelas plantas de milho e as quantidades extraídas por Mehlich-3 no cultivo I, com separação dos solos de acordo com as classes de argila adotadas pela CQFS-RS/SC. A - 0 a 20 %; B - 21 a 40%; C - 41 a 60% e D - >60% de argila.

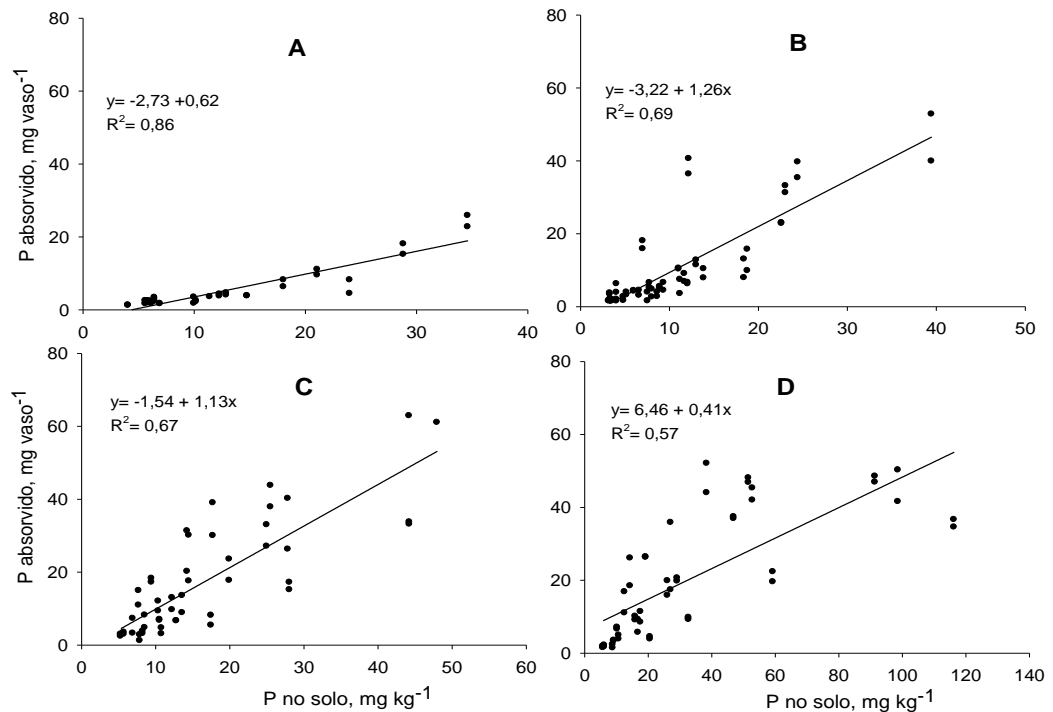


Figura 23. Regressão entre as quantidades absorvidas de fósforo pelas plantas de milho e as quantidades extraídas por Mehlich-3 no cultivo I, com separação dos solos de acordo com as classes de P-remanescente. A - 0 a 7 mg L⁻¹; B - 7,1 a 15 mg L⁻¹; C - 15,1 a 30 mg L⁻¹ e D - 30,1 a 60 mg L⁻¹.

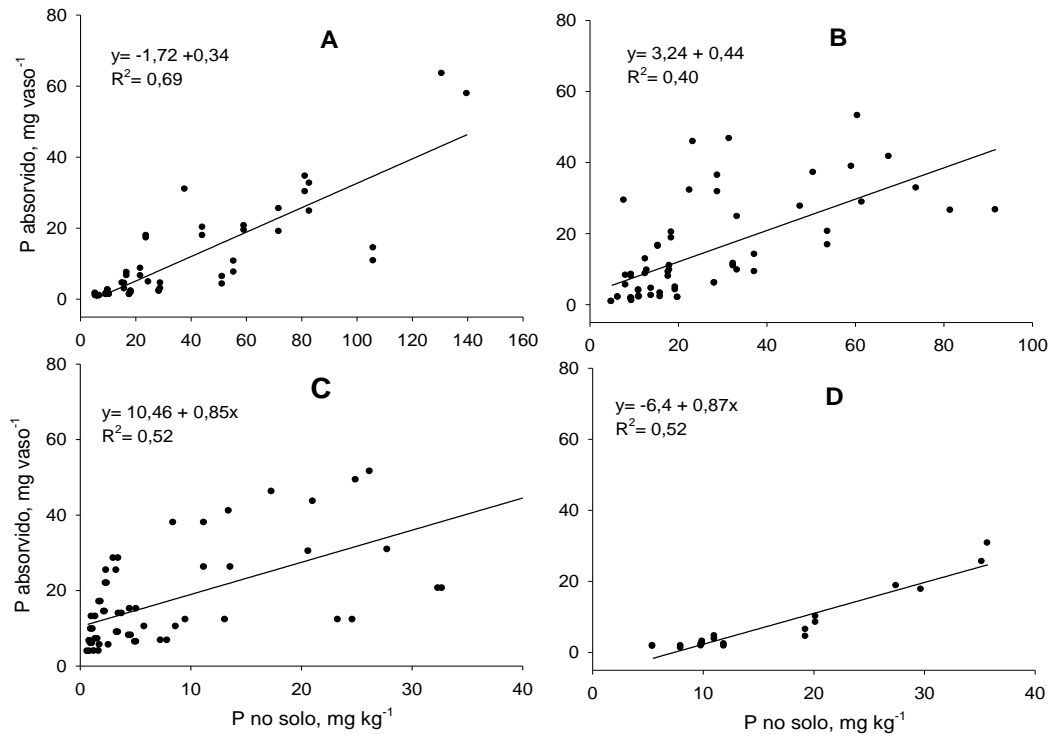


Figura 24. Regressão entre as quantidades absorvidas de fósforo pelas plantas de milho e as quantidades extraídas por Mehlich-1 no cultivo II, com a separação dos solos de acordo com as classes de argila adotadas pela CQFS-RS/SC (2004). A - 0 a 20 %; B - 21 a 40%; C - 41 a 60% e D - >60% de argila.

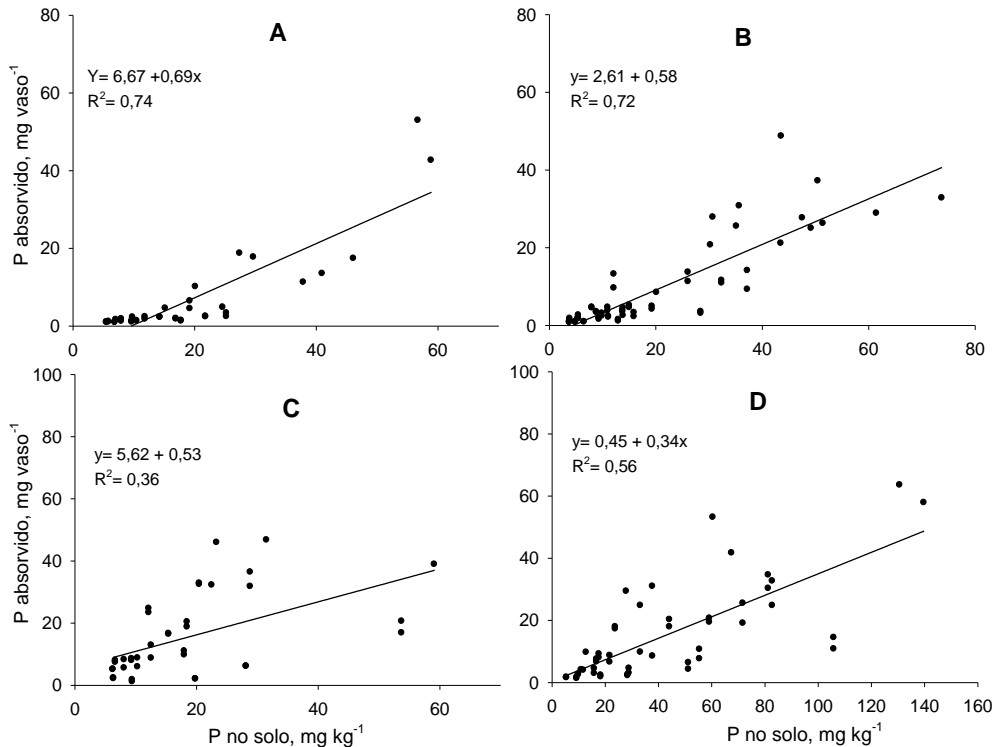


Figura 25. Regressão entre as quantidades absorvidas de fósforo pelas plantas de milho e as quantidades extraídas por Mehlich-1 no cultivo II, com separação dos solos de acordo com as classes de P-remanescente. A - 0 a 7 mg L⁻¹; B - 7,1 a 15 mg L⁻¹; C - 15,1 a 30 mg L⁻¹ e D - 30,1 a 60 mg L⁻¹.

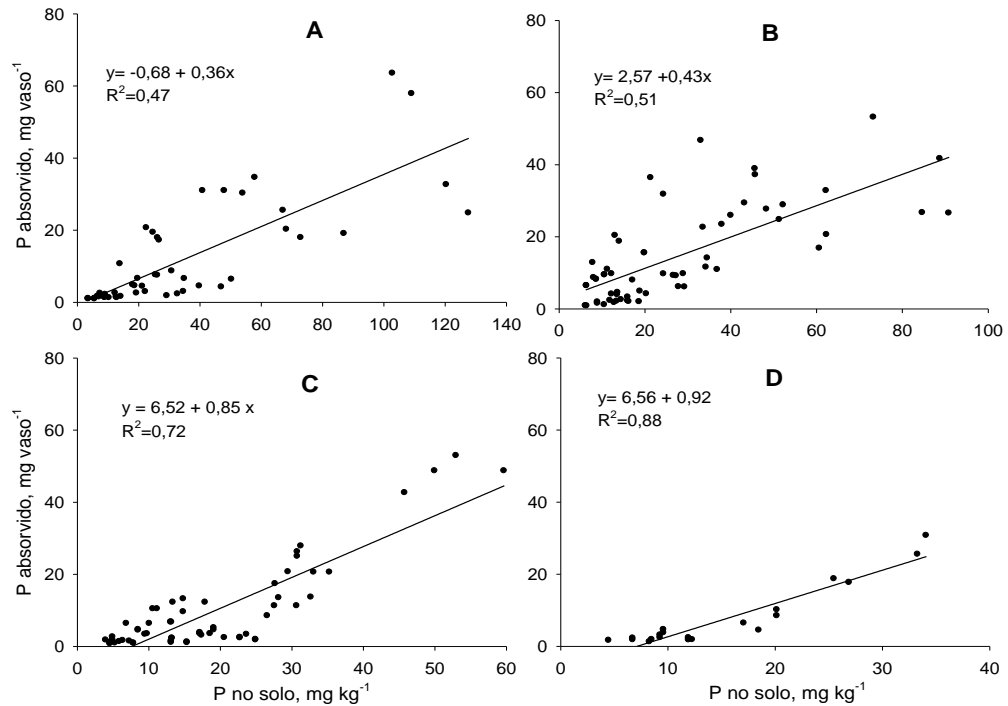


Figura 26. Regressão entre as quantidades absorvidas de fósforo pelas plantas de milho e as quantidades extraídas por Mehlich-3 no cultivo II, com a separação dos solos de acordo com as classes de argila adotadas pela CQFS-RS/SC. A - 0 a 20 %; B - 21 a 40%; C - 41 a 60% e D - >60% de argila.

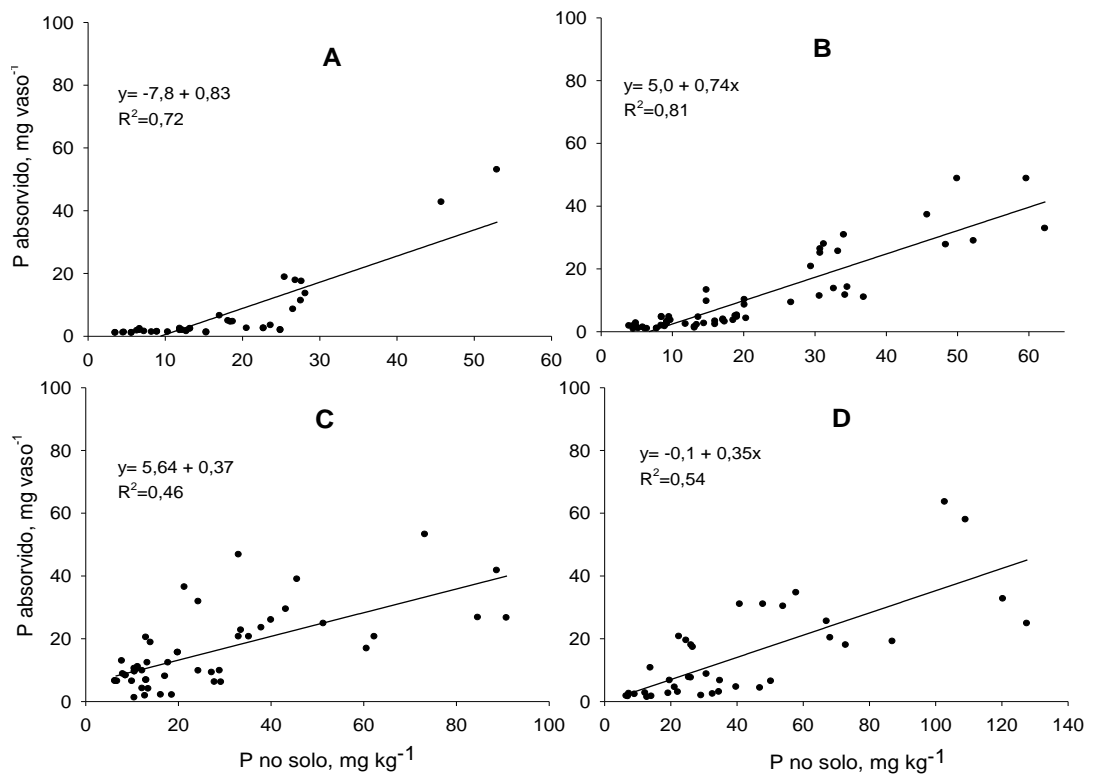


Figura 27. Regressão entre as quantidades absorvidas de fósforo pelas plantas de milho e as quantidades extraídas por Mehlich-3 no cultivo II, com separação dos solos de acordo com as classes de P-remanescente. A - 0 a 7 mg L⁻¹; B - 7,1 a 15 mg L⁻¹; C - 15,1 a 30 mg L⁻¹ e D - 30,1 a 60 mg L⁻¹.

hipótese de melhor índice do poder tampão que a argila, pode representar uma importante contribuição. Os coeficientes de correlação entre o P-absorvido e o extraído pelos métodos Mehlich-1 e 3, com os solos separados por classes de tamponamento, seja pela argila ou pelo P-remanescente são apresentados na Tabela 18.

O coeficiente de correlação (r) é diretamente relacionado ao coeficiente de determinação (R^2), pois ($R^2 = (r)^2$). Sendo assim, as proporções entre os coeficientes continuam iguais, embora os valores dos coeficientes de correlação sejam maiores. Optou-se, também, por utilizar os coeficientes de correlação, pois os valores desta estatística são os mais comumente empregados na seleção de métodos. Os coeficientes (r) foram significativos ($P < 0,05$) e maiores que 0,60 para todas as classes, sejam elas separadas por argila ou pelo remanescente, em ambos os cultivos avaliados (Tabela 19). Na comparação entre os métodos, não houve diferença pelo teste t-Student entre os coeficientes obtidos pelo Mehlich-1 e Mehlich-3, para médias pareadas pela classe equivalente. Este comportamento foi verificado tanto na separação dos solos pelo teor de argila ($t = -0,67^{ns}$), como na separação pelo remanescente ($t = 1,24^{ns}$). Com base apenas nessa informação, não haveria vantagem alguma em substituir o Mehlich-1 pelo Mehlich-3 como método para prever a disponibilidade de P às plantas. Os resultados dos trabalhos desenvolvidos por Kroth, 1998; Bortolon, 2005; Gonçalves & Meurer, 2008 e Bortolon et al., 2009 vão ao encontro dos obtidos neste estudo, pois também não encontraram diferenças entre os métodos. Entretanto, no presente estudo foi utilizado como fonte de P às plantas o superfosfato triplo. Porém, em trabalhos com fosfatos naturais (Kroth, 1998; Oliveira, 2010; Gonçalves et al., 2012), o método Mehlich-3 tem sido superior ao Mehlich-1, por não solubilizar demasiadamente o fósforo ligado ao Ca presente neste fertilizante.

Não houve diferença entre os coeficientes obtidos com a separação dos solos por classes de argila ou pelo P-remanescente, para ambos os métodos avaliados (Figura 28). Os métodos foram analisados conjuntamente, uma vez que não houve diferença entre eles, e os coeficientes foram comparados de pelo teste t-Student para médias pareadas de acordo com as classes equivalentes (classe I argila x classe I P-rem). De acordo com a

distribuição na figura, é possível observar que para sete classes os coeficientes foram superiores com separação pelo P-rem; em cinco classes foram maiores com separação pela argila, e em quatro não houve diferença entre os índices. Entretanto, na média de todas as classes não há diferença entre os índices ($t = -1,1^{ns}$).

Tabela 18. Coeficientes de determinação de diferentes extratores de fósforo para solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina em trabalhos desenvolvidos nas últimas décadas

Autores dos trabalhos	Ano	Nº de solos utilizados	UF	Variação explicada pelos métodos ($r^2 \times 100$)		
				Mehlich-1	Mehlich-3	Resina
Vanderberg	1969	9	RS	41	-	-
Cajuste	1972	5	RS	51	-	-
Fole & Gimm	1973	1	RS	62	-	70
Anghinoni & Bohnen	1974	40	RS	67	-	-
Magalhães	1974	4	RS	63	-	74
Biasi	1978	5	SC	64	-	-
Galvão & Volkweiss	1981	9	RS	76	-	-
Rein	1991	22	RS	86	-	42
Salet et al.	1994	40	RS	74	-	83
Miola	1995	20	RS	67	-	89
Braida et al.	1996	10	RS	70	-	86
Silva ¹	1996	11	RS	68	-	74
Kroth	1998	20	SC	66	62	80
Kroth (FN) ¹	1998	6	RS	40	75	59
Gatiboni	2003	1	RS	16 a 99	-	13 a 99
Sch lindwein ³	2003	18	RS	43 a 70	34 a 68	44 a 81
Bortolon	2005	20	RS	57 e 58	45 e 57	57
Gonçalves & Meurer ¹	2008	6	RS	83	81	88
Silva et al. ¹	2008	16	RS	45	48	70
Bortolon et al.	2009	6	RS	88	91	-
Oliveira (FN) ²	2010	1	SC	18	91	83
Gonçalves et al. (FN) ^{1,2}	2012	6	RS	58	61	-

⁽¹⁾Cultivo de arroz em solos alagados; ⁽²⁾FN -fosfato natural; ⁽³⁾Experimento a campo.

A separação dos solos tanto pela argila como pelo P-remanescente, de modo geral, aumentou os coeficientes de correlação do P predito por Mehlich com o P absorvido pelas plantas, como pode ser visualizado na Figura 28, na qual o ponto azul representa o valor médio (0,70) de ambos os métodos nos cultivos. O ponto que ficou abaixo da média dos solos sem separação

representa solos da classe III no segundo cultivo. Os baixos valores dos coeficientes (0,60) se devem ao alto coeficiente de variação entre o P absorvido e o determinado pelo método Mehlich-1 em alguns solos, que coincidentemente foram enquadrados na mesma classe, seja pela argila ou pelo P-remanescente. Estes solos apresentaram correlações modestas quando analisados individualmente e, quando analisados conjuntamente, contribuíram para diminuição do coeficiente da classe.

Tabela 19. Coeficientes de correlação (r) do P absorvido pelas plantas de milho e o fósforo extraído por Mehlich-1 e Mehlich-3 com separação dos solos em classes de tamponamento pelo teor de argila e por P-remanescente, no primeiro e segundo cultivo

Cultivo	Mehlich-1							
	Teor de argila (%)				P-remanescente (mg L ⁻¹)			
	>60	41 - 60	21 - 40	0 - 20	0 - 7	7,1 - 15	15 - 30	30 - 60
I	0,92**	0,79**	0,76**	0,80**	0,95**	0,80**	0,76**	0,80**
II	0,72**	0,72**	0,63**	0,83**	0,83**	0,85**	0,60*	0,75**
	Mehlich-3							
	>60	41 - 60	21 - 40	0 - 20	0 - 7	7,1 - 15	15 - 25	25 - 60
	>60	41 - 60	21 - 40	0 - 20	0 - 7	7,1 - 15	15 - 25	25 - 60
I	0,82**	0,78**	0,82**	0,80**	0,92**	0,83**	0,82**	0,75**
II	0,94**	0,85**	0,71**	0,68**	0,85**	0,90**	0,68**	0,74**

Classificação pela argila: classe 4 = 0 a 20 %; classe 3= 21 a 40%; classe 2= 41 a 60% e classe 1= >60% de argila. Classificação pelo P-rem: classe 1= 0 a 7 mg L⁻¹; classe 2= 7,1 a 15 mg L⁻¹; classe 3 = 15,1 a 30 mg L⁻¹ e classe 4= 30,1 a 60 mg L⁻¹.

Em suma, considerando-se apenas os coeficientes de correlação entre o P absorvido e o P extraído por Mehlich-1 e 3, pode-se inferir que não há diferença entre os índices P-remanescente nas classes propostas e o teor argila. Deste modo, a escolha de um índice em detrimento a outro, para se utilizar na classificação dos solos dos estados do RS e SC, poderá ser feita com base em outros critérios discutidos.

As correlações dos teores de fósforo por Mehlich-1 e Mehlich-3 em que ocorreu a maior absorção de P pelas plantas com os atributos do solo relacionados ao poder tampão do solo são mostradas na Tabela 20. Esses teores foram calculados de modo semelhante ao descrito para os teores na máxima eficiência técnica (MET). Entretanto, em vez de utilizar a massa seca da parte aérea como variável dependente, utilizou-se a quantidade de fósforo absorvido pelas plantas. Os coeficientes encontrados nessa análise se

assemelham aos obtidos com MET, uma vez que para muitos solos a maior absorção de P ocorreu exatamente na máxima produção de massa seca.

Tabela 20. Coeficientes de correlação (r) simples de Pearson entre o teor de fósforo extraído por Mehlich-1 (M1) e Mehlich-3 (M3) em que ocorreu a maior absorção de P pelas plantas, no primeiro (C1) e segundo (C2) cultivo com atributos dos solos relacionados ao poder tampão

	P-rem	Argila	Fe _{DCB}	Fe _{OX}	Fe total	F _{OX} /Fe _{DCB}	CMAP	K	FCP
C1-M1	0,74**	-0,64**	-0,59**	-0,68**	-0,60**	-0,04 ^{ns}	-0,53*	-0,04 ^{ns}	-0,43 ^{ns}
C1-M3	0,78**	-0,57**	-0,62**	-0,67**	-0,62**	0,15 ^{ns}	-0,55*	0,01 ^{ns}	-0,43 ^{ns}
C2-M3	0,76**	-0,62**	-0,52*	-0,65**	-0,51*	-0,17 ^{ns}	-0,57*	-0,23 ^{ns}	-0,51*
C2-M1	0,61**	-0,56**	-0,53*	-0,58**	-0,53*	-0,17 ^{ns}	-0,51*	-0,25 ^{ns}	-0,44 ^{ns}

^{ns}, **, * não significativo, significativo a 1 e 5% de probabilidade de erro pelo teste t, respectivamente; P-rem 60- P remanescente (60 mg L⁻¹) relação solução: solo (10:1); argila- método pipeta; Fe_{DCB}- Fe por ditionito citrato bicarbonato; Fe_{OX}- Fe por oxalato de amônio; Fe total - por ataque sulfúrico; F_{OX}/Fe_{DCB}- relação Fe oxalato/Fe ditionito; CMAP- capacidade máxima de adsorção de fósforo; k- constante relacionada a energia de ligação; FCP- fator capacidade de fosfato.

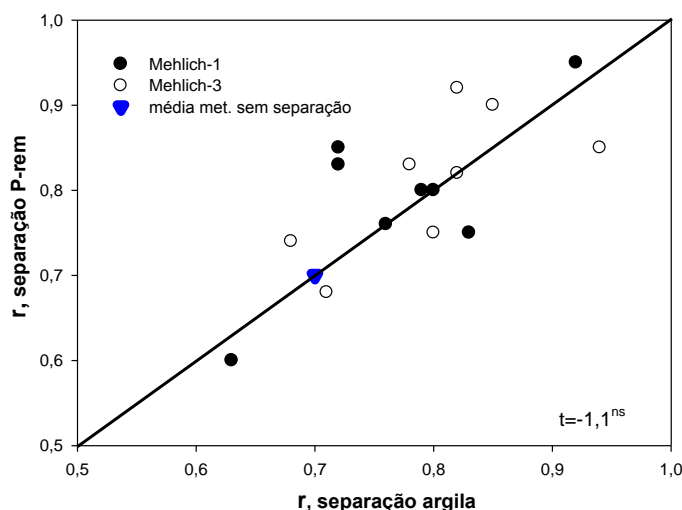


Figura 28. Representação gráfica da relação entre os coeficientes de correlação (r) obtidos entre o fósforo extraído por Mehlich-1 e Mehlich-3 e fósforo absorvido pelas plantas, com separação dos solos por classes de argila (classe I= >60%; classe II=60 a 41%; classe III= 40 a 21%; classe IV=<20%) ou por valores de P-remanescente (classe I= 0 a 7 mg L⁻¹; classe II=7,1 a 15 mg L⁻¹; classe III= 15,1 a 30 mg L⁻¹; classe IV= 30,1 a 60 mg L⁻¹). A plotagem foi feita de acordo com classes correspondentes. A linha projetada indica a relação 1:1, ou seja, onde deveriam estar os pontos caso os coeficientes fossem iguais.

O teor de P no solo em que houve a máxima absorção de P pelas plantas correlacionou-se negativamente com a maioria dos atributos do solo avaliados. Na comparação entre os índices em estudo, o P-remanescente foi,

novamente, superior à argila. Os coeficientes do P no solo com argila e P-remanescente foram significativos em todos os cultivos e métodos, entretanto, os mesmos foram sempre superiores favoravelmente ao P-remanescente. Na média, para todos os cultivos e métodos, os coeficientes obtidos com o P-remanescente foram 20% maior que os da argila.

5.8 Proposta de classificação dos teores de P extraídos pela solução de Mehlich de acordo com os valores de P-remanescente.

De modo geral, foi possível verificar que a medida do P-remanescente se mostrou superior à medida textural em praticamente todas as relações efetuadas com os atributos relacionados ao poder tampão do solo. Em alguns cenários, houve igualdade entre os índices, porém, não houve situações em que o P-remanescente tenha sido inferior à argila. Com base nestas evidências, pode-se inferir que a medida do P-remanescente é um índice mais fidedigno do poder tampão do solo. A igualdade entre P-remanescente e argila já bastaria para se propor à adoção deste índice para a classificação dos solos, tendo em vista as vantagens operacionais para obtenção dessa medida. Porém, além de ser mais exequível em escala de rotina, o P-remanescente também se mostrou mais sensível ao poder tampão do solo. Por isso, há poucas razões práticas e científicas para continuar se adotando a medida textural para dividir os solos em classes de tamponamento nos estados do RS e de SC.

As tabelas para interpretação dos teores de fósforo disponível às plantas, com a classificação dos solos de acordo com os valores de P-remanescente que este estudo propõe, são demonstradas na Tabela 21, para o Mehlich-1 e na Tabela 22, para o Mehlich-3. Os limites das faixas de interpretação do “P-disponível” continuam os mesmos daqueles descritos com a separação pela argila, tanto para o Mehlich-1 (CQFS-RS/SC, 2004) como para o Mehlich-3 (Schlindwein & Gianello, 2008). A amplitude de cada classe foi definida, como já mencionado anteriormente, por tentativas, optando-se pelas faixas que resultaram em maior coeficiente de correlação entre o P extraído pelos métodos e o absorvido pelas plantas. Além disso, a escolha das faixas foi feita considerando a lógica existente entre o P-remanescente e argila, de acordo com a Figura 3.

Tabela 21. Interpretação do teor de fósforo no solo extraído pelo método Mehlich-1, conforme classes de P-remanescente ⁽¹⁾

Interpretação	Classes de solo conforme o teor de P-remanescente (mg L ⁻¹)			
	0 -7,0	7,1 - 15	15,1 - 30,0	30,1 - 60
 mg dm ⁻³			
Muito baixo	≤ 2,0	≤ 3,0	≤ 4,0	≤ 7,0
Baixo	2,1 – 4,0	3,1 – 6,0	4,1 – 8,0	7,1 – 14,0
Médio	4,1 - 6,0	6,1 – 9,0	8,1 – 12,0	14,1 - 21
Alto	6,1 – 12,0	9,1 – 18,0	12,1 – 24,0	21,1 – 42,0
Muito alto	> 12,0	> 18,0	> 24,0	> 42,0

⁽¹⁾Fósforo remanescente é a concentração de P da solução de equilíbrio (mg L⁻¹), após agitar durante 5 minutos 5 cm³ de solo com 50 mL de solução de CaCl₂ 10 mmol L⁻¹, contendo 60 mg L⁻¹ de fósforo.

Tabela 22. Interpretação do teor de fósforo no solo extraído pelo método Mehlich-3, conforme classes de P-remanescente.

Interpretação	Classes de solo conforme o teor de P-remanescente (mg L ⁻¹) ⁽¹⁾			
	0 -7,0	7,1 - 15	15,1 - 30,0	30,1 - 60
 mg dm ⁻³			
Muito baixo	≤ 2,0	≤ 4,0	≤ 6,0	≤ 10,0
Baixo	2,1 – 4,0	4,0 - 7,0	6,1 – 12,0	10,1 – 20,0
Médio	4,1 - 6,0	7,1 – 10,0	12,1 – 18,0	20,1 - 30
Alto	6,1 – 12,0	10,1 – 20,0	18,1 – 36,0	30,1– 60,0
Muito alto	> 12,0	> 20,0	> 36,0	>60,0

⁽¹⁾Fósforo remanescente é a concentração de P da solução de equilíbrio (mg L⁻¹), após agitar durante 5 minutos 5 cm³ de solo com 50 mL de solução de CaCl₂ 10 mmol L⁻¹, contendo 60 mg L⁻¹ de fósforo.

5.9 Implicações práticas do uso do P-remanescente como índice do poder tampão do solo

Os solos utilizados para avaliar a relação entre o P-remanescente e argila (200 amostras) foram agrupados de acordo com as classes de tamponamento segundo os índices P-rem ou argila (Figura 29). A distribuição dos solos foi feita para avaliar o impacto que ocorreria na prática, caso se adotasse a tabela com base na classificação pelo P-rem proposta por este estudo. Pela argila 29; 38; 31 e 2% dos solos seriam enquadrados nas classes IV; III; II e I de tamponamento, respectivamente. Com a utilização do P-remanescente 17,5; 33,5; 40 e 9% dos solos seriam enquadrados nas classes IV; III; II e I de tamponamento, respectivamente. Com isso, é possível constatar que a utilização do P-rem resultou no enquadramento de quantidade percentualmente maior de solos nas classes I e II, em contraste com a

diminuição nas classes III e IV. Ou seja, na média, houve maior migração para classes mais tamponadas, o que na prática implica na diminuição do teor crítico de P para maior número de solos, comparativamente à classificação pela argila.

Para avaliar a magnitude das alterações que a adoção do P-remanescente como índice do poder tampão pode promover, foram feitas simulações de recomendação de adubação fosfatada para os solos estudados (Tabela 23). As recomendações foram feitas para um cultivo hipotético de milho, com expectativa de rendimento de 6.000 kg ha^{-1} , tendo por base as indicações de adubação (correção + manutenção) sugeridas pela CQFS-RS/SC (2004). A interpretação do fósforo “disponível” por Mehlich-1 foi feita utilizando-se como índice do poder tampão os teores de argila, de acordo com a CQFS-RS/SC (2004) e o P-remanescente, com base na classificação proposta, descrita na Tabela 21. Foram verificadas as faixas de fertilidade em que os teores de P foram enquadrados, em função das diferentes classificações. Foi, também, contabilizado o número de classes migradas, quando houve divergência entre os índices e as doses de P_2O_5 recomendadas para a cultura do milho.

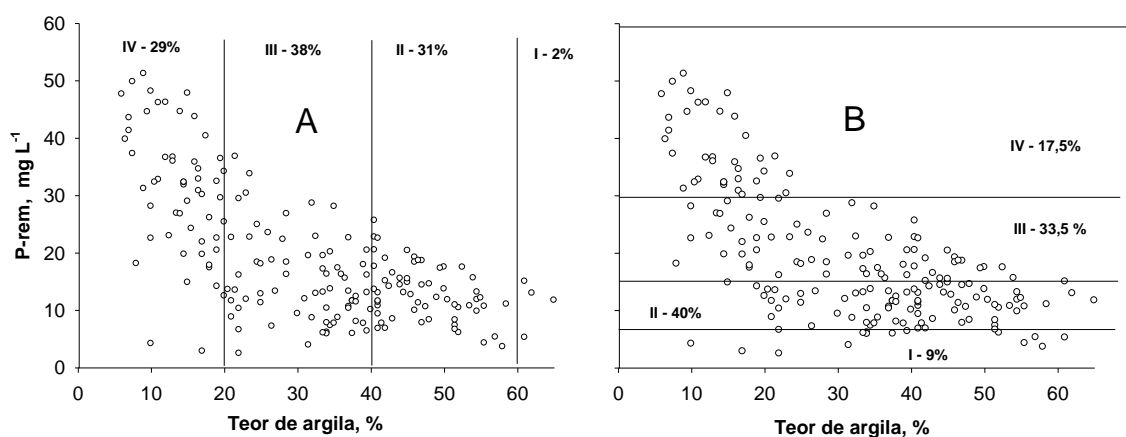


Figura 29. Frequência de amostras (%) em cada classe, de acordo com o índice utilizado para classificar os solos (200 amostras). A - classificação com base no teor de argila: classe I (>60%), classe II (41 a 60%), classe III (21 a 40%) e classe IV (0 a 20 %). B - classificação dos solos com base no P-remanescente (60 mg L^{-1}): Classe I (0 a 7 mg L^{-1}), classe II ($7,1 \text{ a } 15 \text{ mg L}^{-1}$), classe III ($15,1 \text{ a } 30 \text{ mg L}^{-1}$) e classe IV ($30,1 \text{ a } 60 \text{ mg L}^{-1}$).

Dos vinte solos estudados, nove mudaram de classe de tamponamento com a utilização do P-remanescente como índice do poder

tampão (Tabela 23). Destes, seis solos (CHa-2; PBAC; LVd; CX; CHa-1 e PVa-2) migraram para classes de maior, e três (LVdf; VEO2 e MEK) passaram para classes de menor tamponamento. Oito solos mudaram apenas uma classe, porém, o solo CHa-1 migrou três, saindo da classe IV, na classificação pela argila, para a classe I na classificação pelo P-remanescente. Dos nove solos que foram classificados de modo diferente, em apenas sete destes houve recomendações diferentes de P_2O_5 . As doses divergiram em $\pm 30 \text{ kg ha}^{-1}$ à exceção do solo CHa1-São Francisco de Paula, em que a dose recomendada foi 90 kg ha^{-1} menor, quando classificado pelo P-remanescente.

Em suma, a utilização do P-remanescente em substituição à argila resultou nas seguintes alterações: 45 % dos solos foram enquadrados em classes diferentes de tamponamento; houve mudança na faixa de interpretação do P “disponível” em 35 % dos solos e, com isso, houve recomendações de doses de P_2O_5 diferentes na mesma percentagem. Para os solos, cuja recomendação foi alterada, em 60% dos casos, as doses foram menores e em 40% maiores que as recomendadas com a classificação pela argila. Os solos que migraram para classes de maior tamponamento na classificação pelo P-remanescente, receberiam doses menores de P_2O_5 , num hipotético uso deste índice. Por outro lado, os solos que foram rebaixados de classe receberiam maiores doses de P_2O_5 . Essa recomendação aparenta ser inverossímil, pois os resultados dos experimentos demonstraram que quanto maior o tamponamento dos solos, maiores foram às doses de P_2O_5 requeridas para se atingir a MET. Pela lógica, na prática, esperar-se-ia que o sistema recomendasse doses maiores de fósforo para solos que ascenderam de classe de classe de tamponamento, de modo a compensar o poder sortivo de P solo, como supracitado. O exemplo clássico é o solo São Francisco de Paula (CHa-1) que apresentou CMAP acima de 2.000 kg ha^{-1} e a resposta das plantas à aplicação de P foi praticamente linear até a maior dose de testada (2.400 kg ha^{-1} de P_2O_5). Este solo receberia 185 kg ha^{-1} na classificação pela argila e, apenas 95 kg ha^{-1} com a classificação pelo P-rem. Se partirmos da premissa de quanto maior a dose requerida em vasos para se atingir a MET, maior será a dose requerida no campo para se atingir a máxima eficiência econômica, a dose recomendada com a classificação pelo P-rem iria de encontro a essa lógica,

uma vez que recomenda menos P que a recomendada na classificação pela argila.

Entretanto, essa contradição é aparente. Ela é resultado de algumas premissas adotadas pelo sistema atual do RS/SC. A mudança de classe de tamponamento implica, necessariamente, na mudança do teor crítico para as plantas. Assim, quando o solo migra para classes de maior tamponamento, o teor crítico de P diminui como medida compensatória à limitação do extrator Mehlich. Com isso, os limites e a amplitude das faixas de interpretação do P “disponível” também diminuem. Desse modo, um solo com teor de P por Mehlich-1 de 5 mg kg^{-1} é classificado como “Muito baixo” na classe de menor (classe IV), e “Médio” na classe de maior tamponamento (classe I). O atual sistema de recomendação sugere adubação de correção para todos os solos que possuem teores de P “disponível” abaixo da faixa de interpretação “Alto”.

A dose de adubação de correção é indicada com base na faixa de interpretação do P “disponível” e não leva em consideração o poder tampão do solo. Desse modo, solos que têm, por exemplo, teores de P na faixa “Médio” recebem a mesma dose de adubação de correção, independentemente da classe de tamponamento. Já a dose de adubação de manutenção é dependente da cultura, e objetiva manter os teores de P no solo acima do teor crítico depois do cultivo, e a dose sugerida independe do poder tampão do solo. Portanto, as diferenças entre as doses de P_2O_5 recomendadas utilizando-se o P-remanescente ou argila com índices, foram decorrentes apenas de recomendações diferenciadas quanto à adubação de correção. Isso porque, como já supracitado, o enquadramento dos solos em classes de maior tamponamento, implica na redução do teor crítico e dos intervalos de P nas faixas de fertilidade. Com isso, quando ocorre migração para classes de maior tamponamento, o teor de P “disponível” pode ser enquadrado em faixa de fertilidade mais próxima do teor crítico (ex: de “Baixo” para “Médio”). Quando isso ocorre, a dose adubação de “correção” recomendada diminui, como de fato ocorreu para a maioria dos solos que ascenderam de classe de tamponamento utilizando-se o P-remanescente como índice.

Na prática, a mudança de classe de tamponamento significa, apenas, mudança de teor crítico. Pois, por exemplo, se o solo for mais tamponado, menos fósforo é extraído pelo extrator Mehlich, logo, menor será o

teor crítico do mesmo. Uma vez atingido esse teor, teoricamente, não há porque recomendar adubações diferenciadas para uma mesma expectativa de rendimento, em solos de diferente poder tampão. Por outro lado, as menores doses de P_2O_5 sugeridas com a utilização do P-rem quando os solos ascenderam de classe são aparentes, uma vez que a diferença foi devido apenas à dose indicada para se atingir o teor crítico. Teoricamente, se for considerado que o P-rem é o melhor índice do poder tampão do solo, não haveria superestimação nem subestimação de doses, e sim, aplicação da dose adequada. Por outro lado, poder-se-ia hipotetizar que os solos classificados pelo P-rem em classes de maior tamponamento em relação à argila, estariam sendo superadubados ao longo do tempo, quando classificados pela argila. Isso porque maiores doses seriam requeridas para se atingir o teor crítico. Uma vez mais, o exemplo do solo CHa1-São Francisco de Paula pode ser utilizado. Este solo possui naturalmente 4 mg kg^{-1} de P pelo método Mehlich-1, que é classificado como “Muito baixo” utilizando-se o teor de argila como índice (classe IV). Pelo atual sistema seriam recomendados 185 kg ha^{-1} de P_2O_5 para produção de 6.000 kg de milho. Por outro lado, seriam recomendados apenas 95 kg ha^{-1} de P_2O_5 com a classificação pelo P-remanescente. Se classificado pela argila este solo teria teor crítico de 21 mg dm^{-3} , já pelo P-remanescente o teor seria 6 mg dm^{-3} . Este solo requer, aproximadamente, 70 kg ha^{-1} para se elevar o teor de P em 1 mg kg^{-1} . Com isso, certamente, a dose de 185 kg ha^{-1} seria insuficiente para atingir os 21 mg kg^{-1} , não obstante estar incluída nesta dose, também, a de manutenção da cultura. Assim, na próxima análise, provavelmente, este solo seria enquadrado na faixa “Muito baixo” ou “Baixo”, requerendo, portanto, outra dose de adubação de correção. Teoricamente, seria necessária uma dose de aproximadamente 1.300 kg ha^{-1} de P_2O_5 para se atingir o teor crítico de 21 mg dm^{-3} , dose esta totalmente fora de contexto no tocante a culturas comerciais de grãos. Para amenizar algumas incongruências em relação à adubação de correção dos solos, o sistema de recomendação do RS e SC poderia adotar adubações de correção diferenciadas para cada classe de tamponamento. Essa adubação poderia ser proposta de acordo com a dose necessária para se aumentar 1 mg kg^{-1} de P na análise por Mehlich. Com este procedimento, os solos muito tamponados, embora com menores teores críticos, acabariam, em alguns casos, recebendo maiores doses de P_2O_5 para

correção, mesmo quando o “P-disponível” for enquadrado em faixas de interpretação mais altas.

Tabela 23. Simulação de classificação, interpretação e recomendação de adubação fosfatada para os solos utilizados nos estudos em um hipotético uso do P-remanescente em substituição à argila como índice do poder tampão. Na simulação foi considerado para P-remanescente o mesmo número de classes de tamponamento utilizadas para argila e, também, os mesmos teores críticos atribuídos a cada classe, conforme a CQFS- RS/SC (2004)

Legenda	Local de Coleta	Argila ⁽¹⁾			P-remanescente ⁽³⁾			Nº Clas. ⁽⁷⁾	Dif. doses ⁽⁸⁾
		Classe ⁽²⁾	Faixa ⁽⁵⁾	C+M ⁽⁶⁾	Classe ⁽⁴⁾	Faixa ⁽⁵⁾	C+M ⁽⁶⁾		
					kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹
PVA1	Cachoeira do Sul	3	Alto	65	3	Alto	65	0	0
PVA2	Tupanciretã	4	Baixo	125	3	Médio	95	+1	-30
PVA3	São Gabriel	3	Médio	95	3	Médio	95	0	0
RR	Bagé	3	Médio	95	3	Médio	95	0	0
MEk	Aceguá	2	Médio	95	3	Médio	95	-1	0
VEo2	Uruguaiana	2	Médio	95	3	Baixo	125	-1	+30
MEo	Caçapava do Sul	3	Baixo	125	3	Baixo	125	0	0
SXe	Cachoeira do Sul	4	Baixo	125	4	Baixo	125	0	0
MXo	Taquara	4	Alto	65	4	Alto	65	0	0
CHa1	São Fran. de Paula	4	M. baixo	185	1	Médio	95	+3	-90
CX	Carlos Barbosa	3	Baixo	125	2	Médio	95	+1	-30
LVd	Passo Fundo	3	Baixo	125	2	Baixo	125	+1	0
LVaf	Erechim	1	Médio	95	1	Médio	95	0	0
NVdf	Rodeio Bonito	2	Baixo	125	2	Baixo	125	0	0
LVdf	Boa V. das Missões	1	Médio	95	2	Baixo	125	-1	+30
PBAC	Soledade	2	Médio	95	1	Alto	65	+1	-30
PVd	Viamão	4	M. baixo	185	4	M. baixo	185	0	0
LVef	Ibirubá	2	Alto	65	2	Alto	65	0	0
LVd	Cruz Alta	2	Baixo	125	2	Baixo	125	0	0
CHa2	Vacaria	2	Médio	95	1	Alto	65	+1	-30

⁽¹⁾Classificação com base no teor de argila determinada pelo método da pipeta; ⁽²⁾ Classes de argila: classe I (>60%), classe II (41 a 60%), classe III (21 a 40%) e classe IV (0 a 20 %); ⁽³⁾Classificação dos solos com base no P-remanescente (60 mg L⁻¹); ⁽⁴⁾ Classes de P-remanescente: classe I (0 a 7 mg L⁻¹), classe II (7,1 a 15 mg L⁻¹), classe III (15,1 a 30 mg L⁻¹) e classe IV (30,1 a 60 mg L⁻¹); ⁽⁵⁾ Faixas de interpretação do teor de fósforo extraído por Mehlich-1 conforme a CQFS-RS/SC (2004); ⁽⁶⁾ Cálculo hipotético de dose de fósforo (correção + manutenção) para uma produção estimada de 6.000 kg ha⁻¹ de milho; ⁽⁷⁾ Número de classes migradas quando se altera o índice do poder tampão do solo de argila para P-rem, (-) migra para classes de menor poder tampão (+) migra para classes de maior poder tampão; ⁽⁸⁾ Diferença entre as doses de P₂O₅ para produção de 6.000 kg ha⁻¹ de milho utilizando-se como índice o teor de argila e P-remanescente, respectivamente.

5.10 Possíveis limitações do uso do P-remanescente como índice do poder tampão do solo.

A determinação do P-remanescente, como qualquer análise química, está sujeita a erros de diversas naturezas. A quantificação analítica do fósforo é, dentre as análises de rotina, a que apresenta o maior coeficiente de variação

(Griebeler, 2012; Santos, 2013). A precisão das análises de dessorção de fósforo (Mehlich-1 e 3) que visam quantificar o “P disponível” às plantas, bem como das de adsorção (P-remanescente) é afetada por diversos fatores, sejam eles de origem mecânica, física ou química. A intensidade de moagem das amostras (Resende et al., 2007), formato de frasco (Santos, 2013), tempo de repouso (Gonçalves et al., 1985), velocidade de agitação das amostras (Barrow & Shaw 1976), tempo de reação para quantificação do P no extrato (Schlindwein, 1999) e temperatura ambiente (Sah & Mikkelsen, 1986; Huang et al., 2011; Zhang et al., 2011) são alguns fatores que podem afetar o teor de P na análise. Tendo em vista estas variações, será de extrema importância a padronização (intralaboratorial e interlaboratorial) do procedimento analítico e com isso assegurar a exatidão dos resultados, caso seja utilizado o valor de P-remanescente como índice do poder tampão para solos dos estados RS e de SC.

Em testes preliminares desenvolvidos neste estudo (dados não apresentados) foi verificado que amostras com menor granulometria adsorveram maiores quantidades de fósforo, que resultou em menores valores de P-remanescente. Isto se deu, provavelmente, pelo aumento da área superficial específica do solo pela moagem, que resultou em maior exposição dos sítios sortivos à solução contendo fósforo. Em virtude disso, a uniformização do processo de moagem e de coleta volumétrica de solo (cachimbagem) será determinante para minimizar possíveis variações nos resultados.

Por outro lado, independentemente da variabilidade analítica, existe a possibilidade de variação espacial e temporal do P-remanescente no solo. Diferentemente da determinação textural que não se altera em médio período de tempo, os valores de P-remanescente do solo são dinâmicos, pois esta medida reflete a capacidade sortiva do solo, a qual pode mudar no decorrer do tempo. Desse modo, práticas agrícolas que afetam os processos de sorção de P podem alterar os valores de P-remanescente, e a magnitude vai depender de características intrínsecas de cada solo. Sampaio et al. (2008) verificaram que os valores de P-rem de um solo argiloso de Minas Gerais cultivado com café aumentou, na média, de 13 para 28 mg L⁻¹ no decorrer de três anos, em função da adubação utilizada na lavoura. Fontana et al. (2008) avaliaram diferentes

sucessões de cultura sob plantio direto em um Latossolo Vermelho do Mato Grosso do Sul, e verificaram diferenças nos valores de P-rem de até 25 mg L⁻¹ entre os tratamentos. Do mesmo modo, a aplicação de altas doses de fertilizantes fosfatados (Sandim, 2012), a utilização de sistemas de manejo que aportam material orgânico lábil ao solo (Pereira et al. 2010) e a aplicação esterco de bovinos (Souza et al. 2000) aumentaram os valores de P-remanescente no solo. Por outro lado, Camargo et al. (2006) e Viviani (2006) verificaram diminuição nos valores de P-rem pelo aumento do pH-H₂O do solo em valores próximos a 7,0. Os autores creditaram essa diminuição à precipitação do fósforo adicionado com ao Ca proveniente do calcário. Já Rampim et al. (2013) aplicaram doses de gesso de até 5.000 kg ha⁻¹ e não constataron nenhuma alteração nos valores de P-rem do solo.

De modo geral, é possível constatar que práticas agrícolas que afetam potencial sortivo do solo podem alterar os valores do P-remanescente. O aumento/diminuição de 1 unidade de P no extrato de determinação de P-rem equivale a diminuição/aumento na capacidade de adsorção de P na ordem de 20 kg ha⁻¹ (46 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Deste modo, por este simples cálculo é possível presumir que as adubações fosfatadas, normalmente aplicadas, não alterariam substancialmente os valores de P-rem dos solos. Entretanto, esta hipótese precisa ser testada em solos do RS e SC, para se verificar a magnitude das alterações dos valores de P-rem em função das doses de fósforo aplicadas e do tempo de condução dos sistemas de cultivo. Isso porque, também se espera que os valores de P-rem mudem de acordo com a consolidação e evolução do sistema plantio direto. Sousa & Lobato (2003) sugerem que o P-rem seja determinado em solos em que não foram feitas adubações fosfatadas ou com grande potencial de resposta ao P. Os autores também sugerem não repeti-lo em anos subsequentes, até porque se espera que seu valor aumente em áreas antigas, bem adubadas com P.

Além disso, a CQFS-RS/SC (2004) recomenda duas profundidades para amostragem dos solos acordo com tempo de condução do sistema plantio direto (0 - 10 cm sistema consolidado; 0 - 20 cm sistema não consolidado). Como as adubações, de modo geral, são efetuadas na camada superficial do solo (0-10 cm), e é nessa camada que se dá o acumulo de matéria orgânica em virtude da evolução do sistema, é correto inferir que os valores de P-rem

serão diferentes quando se amostra o solo em diferentes profundidades. Por outro lado, para a maioria dos solos, não se esperam variações do teor de argila dos solos quando coletados em diferentes profundidades. Porém, com a evolução do sistema plantio direto, o método usual de determinação de argila pode subestimar os teores, pela não dispersão dos agregados estáveis formados com a matéria orgânica.

Neste contexto, vislumbra-se em longo prazo a possibilidade de aumento do P-rem dos solos, bem como a tendência de diminuição dos teores de argila pela subestimação do método usual de determinação. Com isso, os solos tenderiam a ser incluídos em classes de menor tamponamento. A implicação prática disso é a possibilidade de aumento do teor crítico dos solos no decorrer dos anos. Esta tendência vai de encontro com as recentes pesquisas (Souza et al., 2010) que têm verificado que os benefícios proporcionados pela evolução do sistema plantio direto estão permitindo a recuperação de quantidades de P cada vez mais próximas daquelas aplicadas via fertilizante, sem, contudo, alterar do teor crítico do nutriente no solo. Por outro lado, também é possível conjecturar que se os valores de P-rem aumentarem significativamente no decorrer dos anos, de tal modo que o solo seja enquadrado em outra classe, também é de se esperar que os teores de fósforo extraídos por Mehlich aumentem substancialmente no solo. Com isso, em ambas as situações, o solo seria classificado na mesma faixa de disponibilidade (Muito alto), e não haveria distinção quanto à dose de fertilizante fosfatado recomendado. Porém, há necessidade de verificação desta hipótese antes da adoção do P-rem como índice do poder tampão dos solos.

6. CONCLUSÕES

Foi observada relação significativa entre P-remanescente e argila; entretanto, a equação ajustada foi inadequada para propor teores críticos para o P-rem. Neste trabalho, foi verificado que o P-remanescente é um índice mais fidedigno do poder tampão dos solos do que o teor de argila. Os resultados mostraram que a divisão dos solos dos estados RS e de SC em classes de argila para estimar seu tamponamento de P não é o critério mais adequado e que deveria ser usado o P-remanescente, se há a intenção de se continuar utilizando tanto o Mehlich-1 como o Mehlich-3 para estimar a disponibilidade de P solo para as plantas no RS e SC.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFIF, E.; BARRÓN, V. TORRENT, J. Organic matter delays but does not prevent phosphate sorption by Cerrado soils from Brazil. **Soil Science**, Washington, v.159, p.207-211, 1995.

ALCÂNTARA, F. A.; FURTINI NETO, A.; RESENDE, A.V. Extraction methods for phosphorus and their relationship with soils phosphorus-buffer capacity estimated by the remaining-phosphorus methodology-a pot study with maize. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n.34, p.603-615, 2008.

ALLEN, B.L.; MALLARINO, A.P. Relationship between extractable soil phosphorus and phosphorus saturation after long-term fertilizer and manure application. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.70, p.454-463, 2006.

ALMEIDA, J.A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor do solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 985-1002, 2003.

ALVAREZ, V.H.; FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para a determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfato e para ensaios de casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, p.49-55, 1990.

ALVAREZ, V.H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C. et al. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5º aproximação**. Viçosa, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p. 25-32, 1999.

ALVAREZ, V.H. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.27-32, 2000.

AMARAWANSHA, E.A.G.S.; INDRARATNE, S.P. Degree of Phosphorous Saturation in Intensively Cultivated Soils in Sri Lanka. **Tropical Agricultural Research**, Sri Lanka, v.22, p.113-119, 2010.

AMER, T.; BOULDING, D.R.; BLACK C.A. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P32 equilibration. **Plant and Soil**, The Hague, v.6, p.391-408, 1955.

ANDRADE, F. V. et al. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1003-1011, 2003.

ANDRADE, F. et al. **Ecofisiología del cultivo de maíz**. [S.l.]: La Barrosa, 1996. 292 p.

ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.349-353, 1992.

ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. **Agronomy Journal**, Madison, v.72, n.4, p.685-688, 1980.

ANGHINONI, I.; BOHNEN, H. Avaliação da disponibilidade de fósforo através de métodos químicos. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.10, p.127-133, 1974.

ANGHINONI, I.; VOLKWEISS, S. J. Recomendações de uso de fertilizantes no Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1984, Brasília. **Anais...** Brasília: EMBRAPA, p.179-204, 1984.

ARIAS, J.S.; FERNANDEZ, P.G. Changes in phosphorus adsorption in a Paleixerult amended with limestone and/or gypsum. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.32, p.751-758, 2001.

BACHE, B.W.; WILLIAMS, E.G. A. Phosphate sorption index for soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.22, p.209-301, 1971.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanist approach**. New York: J. Wiley, 1984. 398 p.

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

BARBER, S.A.; CUSHMAN, J.H. Nitrogen uptake model for agronomic crops. In: ISKANDAR, I.K. (Ed.) **Modeling waste water renovation-land treatment**. New York: John Wiley Interscience, p.382-409, 1981.

BARROW, N. J. The four laws of soil chemistry: the Leeper lecture. **Australian Journal of Soil Science**, Oxford, v 37, p. 787-829, 1999.

BARROW, N. J.; SHAW, T.C. Sodium bicarbonate as an extractant for soil phosphate, I. Separation of the factor affecting the amount of phosphate displaced from soil from those affecting secondary adsorption. **Geoderma**, Amsterdam, v.16, p. 91-107, 1976.

BAYER, C.; AMARAL, A.S. Amenização da acidez de um Latossolo argiloso por extratos aquosos de plantas de cobertura de inverno. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.2, p.88-96, 2003.

BEEGLE, D. Assessing soil phosphorus for crop production by soil testing. In: SIMS, J. T. et al. (Ed.). **Phosphorus: agriculture and the environment**. Madison: SSSA, p.123-144, 2005.

BELDROCK, C. N.; CHESHIRE, M. V.; SHAND, C. A. The involvement of iron and aluminum in the bonding of phosphorus to soil humic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.28, p. 961-971, 1997.

BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; SUTILI, V.R. Relação entre temperatura e o aparecimento de fases fenológicas do milho (*Zea mays* L.). **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.20, p.111-132, 1984.

BIASI, J. A. **Avaliação do Fósforo relacionado a diversos extratores químicos em solos de Santa Catarina**. 1978. 181 f.. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1978.

BISSANI, C. A. et al. **Fertilidade do solo e manejo da adubação das culturas**. Porto Alegre: Gênese, 2004. 328 p.

BLACK, A.B. **Soil fertility evaluation and control**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. 746 p.

BONFIM, E.M.S.; FREIRE, F.J.; SANTOS, T.M.S. Níveis críticos de fósforo para *Brachiaria brizantha* e suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.281-288, 2004.

BORTOLON, L. **Fósforo em sistema plantio direto afetado pelo histórico de uso do solo e os efeitos agrônomo e ambiental**. 2010. 90 f. Tese de (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BORTOLON, L. GIANELLO, C.; SCHLINDWEIN, J.A. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para o milho pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3. **Scientia Agrária**, Curitiba, v.10, n.4, p.305-312, 2009.

BORTOLON, L. **Métodos de avaliação da disponibilidade de nutrientes para as plantas em solos do Rio Grande do Sul**. 2005. 111 f.. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BORTOLON, L. et al. Simultaneous extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils and potassium recommendations for crops in southern Brazil. **Pedosphere**, Beijing, v. 21, n. 3, p. 365-372, 2011.

BOSCHETTI, A.N.G.; QUINTERO, G.C.E.; BENAVIDEZ, Q.R.A. Caracterização do fator capacidade de fósforo em solos de Entre Rios, Argentina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.95-99, 1998.

BOUYOUCOS, G.J. The hydrometer as a new method for mechanical analysis of soils. **Soil Science**, Washington, v.23, n.5, p.343–352, 1927.

BRAIDA, J.A. et al. Comparação de métodos de determinação da disponibilidade de fósforo do solo para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.345-347, 1996.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de pesquisa Agropecuária. Divisão Pedológica. **Levantamento de Reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife: Ministério da Agricultura, 1973. 431p. (DNPEA. Boletim técnico, 30)

BREEUWSNA, A.; SILVA, S. **Phosphorus fertilization and environmental effects in The Netherlands and the Po region (Italy)**. Wageningen, The Netherlands : Agric. Res. Dep. the Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil, and Water Research, 1992.

BROGGI, F. et al. Adsorption and chemical extraction of phosphorus as a function of soil incubation time. **Revista Brasileira de Engenharia e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.1, p.32-38, 2010.

BROGGI, F. et al. Fator capacidade de fósforo em solos de Pernambuco mineralogicamente diferentes e influência do pH na capacidade máxima de adsorção. **Ciência e Agroecologia**, Santa Maria, v.35, n.1, p.77-83, 2011.

CAJUSTE, L. J.; KUSSOW, W. R. Use and limitations of the North Carolina method to predict available phosphorus in some oxisols. **Tropical Agriculture**, Oxford, v.51, p.246-252, 1974.

CALHEIROS, A.S. et al. Nível crítico de fósforo por diferentes extratores químicos em Neossolo Flúvico alcalino cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.7, p.590-596, 2012.

CAMARGO, M.S. et al. Fósforo em solos de cerrado submetidos à calagem. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 2, p. 187-194, 2010.

CATE, R.B.; NELSON, L.A. **Discontinuous models for rapid correlation, interpretation and utilization of soil analysis and fertilizer response data**. International soil fertility evaluation and improvement program. North Carolina,. 1973. 77 p. (Technical Bulletin, 7).

CESSA, R. M. A. et al. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, n.33, p.1153-1162, 2009.

CESSA, R.M.A. et al. Adsorção de fósforo em frações argila na presença de ácido fúlvico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n.5, p.1535-1542, 2010.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 2. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1989. 128 p.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3.ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT. 1995. 224 p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO- RS/SC (CQFS-RS/SC). **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

CORÁ, J. E. et al. Adição de areia para dispersão de solos na análise granulométrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.255-262, 2009.

CORDELL, D.; DRANGERT, J.O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, Guildford, v.19, p.292-305, 2009.

CORDELL, D.; S. WHITE. Sustainable Phosphorus Measures: Strategies and technologies for Achieving Phosphorus Security. **Agronomy** [on line], v.3, p.86-116, 2013. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2073-4395/3/1/86> Acesso em: 04 ago. 2013.

COREY, R.B. Soil test procedures: correlation. In: BROWN, J.R. (Ed) **Soil testing: sampling, correlation, calibration end interpretation..** Madison, Wisconsin: SSSA, 1987. p.15-22 (Special Publication, 21).

CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, C.W.A.; ROCHA, A.T. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.33, p.153-159, 2011.

COSTA, A.C.S.; BIGHAM, J.M. Óxidos de ferro. IN: MELO, V.; ALLEONI, L. (Ed.) **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: SBCS, 2009. p.505-572

CURI, N.; FRANZMEIER, D.P. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.48, p.341-346, 1984.

DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; FONTES, F. Fósforo remanescente em argila e silte retirados de latossolos após pré-tratamentos na análise textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1785-1791, 2008.

DONAGEMMA, G.K. et al. Dispersão de Latossolos em resposta à utilização de pré-tratamentos na análise textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.765-772, 2003.

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPS, 1997. 212 p. (Documentos,1).

ERNANI, P.R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages: O autor, 2008. 230 p.

FERNÁNDEZ, I.E. et al. Reversibilidade de fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbiana e química. Extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2319-2330, 2008.

FERREIRA, N. C. M.; MAGALHÃES, A. F. Adsorção de fósforo em solos do Rio Grande do Sul. Aplicabilidade da isoterma de Langmuir na descrição da adsorção de fósforo no solo. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.10, n.2, p.281-288,1974.

FINK, J.R. **Dinâmica de minerais pedogênicos e adsorção de fósforo em solos sob distintos usos e manejos**. 2012. 70 f.. Dissertação (Mestrado)– Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

FIXEN, P.E. The four rights within a global fertilizer best management practices framework. In: BOAS práticas para uso eficiente de fertilizantes. Piracicaba, v.1, 2010.

FIXEN, P.E.; GROVE, J.H. Testing Soil for phosphorus. In: WESTWERMANN, R.L. (Ed.). **Soil Testing and Plant Analysis**. Madison: Soil Science Society of America, p.141-180, 1990.

FOLE, D.A.; GRIMM, S.S. Avaliação do efeito residual do fósforo por meio de métodos de extração e modelos matemáticos no Oxissolo Passo Fundo. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.2, p. 205-221, 1973.

FONTANA, A. et al. Fósforo remanescente e correlação com as substâncias húmicas em um Latossolo vermelho sob diferentes sucessões de cultura em plantio direto. **Revista Brasileira Agrocência**, Pelotas, v.14, n.1, p.161-166, 2008.

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.

FONTES, M. P. F., CAMARGO, O. A. D., SPOSITO, G. Electrochemistry of colloidal particles and its relationship with the mineralogy of highly weathered soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, p.627-646, 2001.

FOX, R.L.; KAMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. **Proceedings of the American Society of Agronomy**, Washington, v.34, p.902-907, 1970.

FOX, R.L.; SEARLE, P.G.E. Phosphate adsorption by soils of the tropics. In: DROSDOFF, M. **Diversity of soils in the tropics**. Madison: American Society of Agronomy, 1978. p.97-119

FREIRE, F.J. **Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana de açúcar**. 2001. 144 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

GADIOLI, J.L.; DOURADO-NETO, D.; GARCIA, A.G.; BASANTA, M.V. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.57, p.377-383, 2000.

GALRÃO, E.Z. ; VOLKWEISS, S.J. Disponibilidade de fósforo do solo para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.5, p.11-8, 1981.

GAMA, M. A. P. **Dinâmica do fósforo em solo submetido a sistemas de preparo alternativos ao de corte e queima no uso**. 1999. 33 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

GARCÍA, J.H.; NÚÑEZ, D. El método del hidrómetro: influencia de los tiempos de lecturas en el cálculo de la distribución del tamaño de partículas en suelos de la Habana. **Cultivos Tropicales**, La Habana, v. 29, n.2, p. 21-26, 2008.

GARTLEY, K. L. et al. Comparison of soil test extractants used in Mid-Atlantic United States. **Communications in soil science and plant analysis**, New York, v.33, p.873-895, 2002.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle size analysis. In: **METHODS of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.383-41

GODFRAY, H. C. J et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. **Science**, Washington, v.327, n.5967, p.812-818, 2010.

GOLDBERG, S.; SPOSITO, G. On the mechanism of specific phosphate adsorption by hydroxylated mineral surfaces: a review. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.16, p. 801-821, 1985.

GONÇALVES, C.K. et al. Extratores de fósforo para o arroz irrigado em solos adubados com fosfato natural reativo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.11, n.3, p.196-204, 2012.

GONÇALVES, C.K. et al. Relação entre óxidos de ferro e de manganês e a sorção de fósforo em solos no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.1633-1639, 2011.

GONÇALVES, G. K.; MEURER, E. J. Disponibilidade de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado por alagamento no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2745-2750, 2008.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.9, p.107-111, 1985.

GRIEBELER, G. **Controle de qualidade de análises de solos da Rede ROLAS-RS/SC e procedimentos estatísticos alternativos**. 2012. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

GUILHERME, L.R.G. et al. Adsorção de fósforo em solos de várzea do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.27-34, 2000.

GUPPY, C.N. et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.43, p.189-202, 2005.

HART, M. R.; QUIN, B. F.; NGUYEN, M. L. Phosphorus runoff from agricultural land and direct fertilizer effects: a review. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.33. p.1954-1972, 2004.

HAYNES, R.J.; SWIFT, R.S. The effects of pH and drying on adsorption of phosphate by aluminium-organic matter associations. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.40, v.773-781, 1989.

HERNÁNDEZ, 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**, Viçosa, v.22, p.223-230, 1998.

HUANG, L. et al. Effect of temperature on phosphorus sorption to sediments from shallow eutrophic lakes. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v.37, p.1515-1522, 2011.

INDA JUNIOR, A.V.; KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 851-866, 2005.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. **Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo**. Santa Maria: NRS/SBCS, 1997. 31 p.(Boletim técnico, 3).

KAMPF, N. **Die Eisenoxidmineralogie einer Klimasequenz von Boden aus Eruptiva in Rio Grande do Sul, Brasilien**. 1981. 217 f. Tese (Doutorado) - Freising-Weiherstepfan, Technische Universität München, República Federal da Alemanha, 1981.

KER, J. C. et al. Adsorção de fósforo em alguns solos latossólicos: relação entre mineralogia e efeito da calagem. **Revista Ceres**, Viçosa, v.43, n.246, p.216-226, 1996.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.1, p.107-138, 2000.

KÄMPF, N.; REZENDE, M.; CURI, N. Iron oxides in Brazilian Oxisols. In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, 1986, Rio de Janeiro. **Proceedings**. Rio de Janeiro: EMBRAPA/ SNLCS, 1988. p.71-7.

KAUWENBERGH, S. Van. **World Phosphate Rock Reserves and Resources**. Washington, DC, USA: IFDC, 2010.

KLEBER, M. et al. Poorly crystalline mineral phases protect organic matter in acid subsoil horizons. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.56, p.717-725, 2005.

KOCHHANN, R.; ANGHINONI, I.; MIELNICZUK, J. Adubação fosfatada no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: ADUBAÇÃO fosfatada no Brasil. Brasília: p.29-60, 1982.

KONERT, M.; VANDENBERGHE, J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. **Sedimentology**, Oxford, v. 44, n.3, p. 523–535, 1997.

KROTH, P.L. **Disponibilidade de fósforo no solo para as plantas e fatores que afetam a extração por resina de troca em membranas**. 1998. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

LEITE, P.B. et al. Níveis críticos de fósforo, para eucalipto, em casa de vegetação, em função da sua localização no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33 n.5, p.1311-1322, 2009.

LEMUNYON, J.L.; R.G. GILBERT. The concept and need for a phosphorus assessment tool. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v.6, p.483-486, 1993.

LISBOA, B.B. et al. Potencial da determinação do fósforo remanescente como método alternativo à textura na indicação da classe de disponibilidade de fósforo em três solos do RS. REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 8, 2010, Santa Maria. **[Anais]**. Santa Maria, 2010. (CD-ROM).

LOPES, S. A. et al. **Sistema plantio direto**: bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: Associação Nacional para difusão de Adubos - ANDA, 2004. 110 p.

MACKAY, A. D.; BARBER, S.A. Soil Temperature Effects on Root Growth and Phosphorus Uptake by Corn. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.48, n.4, p.818-823, 1984.

MAGALHÃES, A. F. Uso de resina de troca aniônica na avaliação do fósforo “disponível” para as plantas. II – Estudo comparativo com a solução de Mehlich (Carolina do Norte). **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v.1, p.171-176, 1974.

MARCOLAN, A.L. **Suprimento e absorção de fósforo em solos submetidos a diferentes sistemas de preparo**. 2006. 107 f..Tese de (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MARIANO, I.O.S.; FERNANDES, L.A.; FAQUIN, V; ANDRADE, A.T. Phosphorus critical levels and availability in lowland soils cultivated with flooded rice. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, n.1, p.113-120, 2002.

MCBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soils**. New York : Oxford University Press, 1994.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina Soil Testing Laboratoris**. (mimeografado). 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.

MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.9, p.477-492, 1978.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Minerals**, Oxford, v.5, p.317-327, 1960.

METSON, S.G.; BENNET, E.M.; ELSER, J. The role of diet in phosphorus demand. **Environmental Research Letters**, Bristol, v.7, n.4, 2012.

MEURER, E. J. **Fundamentos de Química do Solo**. 4. ed. Porto Alegre, RS: EVANGRAF, 2010. 264 p.

MIELNICZUK, J. et al. **Estudos iniciais de calibração de análises para fósforo e potássio do solo com a cultura do trigo**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia e Veterinária da UFRGS, 1969. 10 p. (Mimeografado).

MILLER, J.C.; MILLER, J.N. **Statistics and chermometrics for analytical chemistry**. 5th ed. New York : Pearson Education Limited, 2005. 268 p.

MIOLA, G.R. **Extração de P, K, Ca e Mg do solo por diferentes métodos e avaliação da disponibilidade de fósforo para as plantas**. 1995. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

MIYAZAWA, M.; BARBOSA, G.M.C. Efeitos da agitação mecânica e matéria orgânica na análise granulométrica do solo. **Revista Brasileira de Engenharia e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.7, p.680–685, 2011.

MOREIRA, F. L. M. et al. Adsorção de fósforo em solos do Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.37, v.7-12, 2008.

MOTTA, P. E. F. **Adsorção, formas e disponibilidade de fósforo em Latossolos: influência da mineralogia e histórico de nordeste paraense**. 2002. 96 f.. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

MOZAMBANI, A.E.; BICUDO, S.J. Efeito da temperatura e da luz no desenvolvimento de plântulas de milho. **Nucleus**, Ituverava, v.6, n.1, 2009.

MUNIZ, A.S. et al. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.9, p.237-243, 1985.

NETTO, A.R. **Influência da mineralogia nas propriedades físico-químicas de solos brasileiros**. 1996, 144 f.. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

NORAMBUENA, P.V.; LUZIO, W.L.; VERA, E.W. Comparison between the pipette and bouyoucos methods and their relation with water retention in eight soils of the andean plateau. **Agricultura Técnica**, Santiago, Chile, v.62, n.1, 2002.

NOVAIS, R. F., NUNES, F. N.; ROLIM, M. V. Efeito da moagem do solo no teor de fósforo disponível por Mehlich-1, resina em esferas e em lâmina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1181-1190, 2008.

NOVAIS, R.F.; MELLO, J.W.V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R.F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.276-374

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

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-550.

NYE, P.H.; TINKER, P.B. **Solute movement in the soil-root system**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1977. 342 p.

OLIVEIRA, C.M.B. **Comportamento dos métodos Mehlich 1, Mehlich 3 e resina trocadora de ânions frente ao poder tampão do solo e à utilização de fosfatos naturais**. 2010. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2010.

OLIVEIRA, M. F. M. et al. Estimativa do potencial de perda de fósforo através da metodologia "P Index". **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.3, p.267-273, 2010.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, v 30, p. 01-46, 1978.

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

PEÑA, F.; TORRENT, J. Relationship between phosphate sorption and iron oxides in Alfisols from a river terrace sequence of Mediterranean Spain. **Geoderma**, Amsterdam, v.33, p.283-296, 1984.

PEREIRA, M. G. et al. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, p.508-514, 2010.

PINTO, F.A. **Sorção e dessorção de fósforo em solos de Cerrado**. 2012. 46 f.. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Campus Jataí, 2012.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.420 p.

RAIJ, B. van.; FEITOSA, C.T.; SILVA, N.M. Comparação de quatro extratores de solos. **Bragantia**, Campinas, v.43, p.17-29, 1984.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 2001. 284 p.

RAIJ, B. van. Bioavailable tests: alternatives to standard soil extractions. **Communications in Soil Science & Plant Analysis**, New York, v. 29, n.11-14, p. 1553-1570, 1998.

RAMOS, B. Z. **Métodos de extração de P fitodisponível numa perspectiva ambiental**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2009.

RAMPIM, L. LANA, M.C; FRANDOLOSO, J.F. Fósforo e enxofre disponível, alumínio trocável e fósforo remanescente em Latossolo Vermelho submetido ao gesso cultivado com trigo e soja. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 4, p.1623-1638, 2013.

RANNO, S.K. **Estimativa da disponibilidade de fósforo para a cultura do arroz irrigado em solos do RS**. 2004. 139 f.. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

RAVEN, P.H., EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. **Biologia Vegetal**, 7.ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 2007. 906 p.

REIN, T.A. **Estimativa do fluxo difusivo de fósforo nos solos e avaliação de sua disponibilidade às plantas**. 1991. 170 f.. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

RESENDE, M. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. rev. Lavras: Editora da UFLA, 2007. 322 p.

RHEINHEIMER, D.S. Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos. 2000. 210 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RHEINHEIMER, D.S. et al. Dessorção de fósforo em sistemas de manejo de solo avaliado por extrações sucessivas com resina trocadora de ânions. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.6, 2003a.

RHEINHEIMER, D.S. et al. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.41-49, 2003b.

RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.2, p.576-586, 2008.

ROLIM NETO, F.C. et al. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.953-964, 2004.

SAH, R. N.; MIKKELSEN, D. S. Effects of temperature and prior flooding on intensity and sorption of phosphorus in soil. **Plant and Soil**, The Hague, v.95, p.173-181, 1986.

SALET, R.L.; PAVINATO, A.; ALCÂNTARA, M.A.K. Métodos de avaliação da disponibilidade de fósforo em solos argilosos do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO SULBRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 1994, Pelotas, RS. **Anais**. Pelotas: Ed. Da EFPEL, 1994. p.31-32.

SAMPAIO, M.S. et al. Avaliação do comportamento da variabilidade espacial do fósforo remanescente no solo de lavoura cafeeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO , 15., 2011, Curitiba, PR. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2011.

SANCHES, P. A.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p.471-514

SANDIM, A.S. **Disponibilidade de fósforo em função da aplicação de calcário e silicatos em solos oxídicos**. 2012. 99 f.. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas, 2012.

SANTOS, L.S. **Variabilidade do fósforo extraído causada pela variação analítica nos métodos Mehlich-1 e 3**. 2013. 79 f. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2013.

SANYAL, S. K.; DATTA, S. K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. In: STEWART, B. A. **Advances in soil science**, New York, v.16, p.01-120, 1991.

SATO, S.; COMERFORD. N.B. Influence of soil pH on inorganic phosphorus sorption and desorption in a humid brazilian Ultisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.5, 2005.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, London, v.43, p.137-154, 2008.

SCHAEFER, C.E.G.R.; GILKES, R.J; FERNANDES, R.B.A. EDS/SEM study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v.123, p.01-33, 2004.

SCHLINDWEIN, J.A. **Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto**. 2003. 169 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SCHLINDWEIN, J.A. **Variabilidade da fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto**. 1999.110 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

SCHLINDWEIN, J.A.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, p.2037-2049, 2008.

SCHULZE, D. G. An introduction to soil mineralogy. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. Madison : SSSA, , 1989. p.1-34

SCHWERTMANN, U.; KODAMAN, H.; FISCHER, W. R. Mutual interactions between organic and iron oxides. In: HUANG, P. M.; SCHNITZER, M. **Interaction of soil minerals with natural organics and microbes**. Madison: Soil Science society of America,1986. p.223-250

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.) **Minerals in soils environments**. Madison: Soil Science Society of America, p. 379-438, 1989.

SHARPLEY, A.; FOY, B.; WITHERS, P. Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water: an overview. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.29, n.1, p.1-9, 2000.

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

SHIRVANI, M.; SHARIATMADARI, H.; KALBASI, M. Phosphorus buffering capacity indices as related to soil properties and plant uptake. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.28, p.537-550, 2005.

SIKORA, F.J. et al. Comparison of colorimetric and ICP determination of phosphorus in Mehlich3 soil extracts. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.36, n.5, p.875-887, 2005.

SILVA, E.M.B. et al. Níveis críticos de fósforo para Braquiaria brizantha e suas relações com características físicas e químicas em solos Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.2, p.323-328, 2004.

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.

SILVA, F.C.; RAIJ, B. van. Avaliação da disponibilidade de fósforo, por diversos extratores, em amostras de solo cultivados com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.83-90, 1996.

SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374

SILVA, J.T. A. et al. Critical levels for Brachiaria brizantha and Panicum maximum using different sources of phosphorus. **Idesia**, Arica, Chile, v.31, p.59-65, 2013.

SILVA, L. S. D. et al. Avaliação de métodos para estimativa da disponibilidade de fósforo para arroz em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.207-216, 2008.

SILVA, R.J.S. **Metodologia de avaliação da disponibilidade de fósforo em solos alagados**. 1996, 57 f.. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1996.

SIMS, J.T.; JOHNSON, G.V. Micronutrients soil tests. In: MORTVERDT, J.J. et al. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 427-472

SIQUEIRA, O.J.F.; SCHERER, E.E.; TASSINARI, G. **Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA/CNPT, 1987. 100p.

SOUSA NETO, E. L.; FIGUEIREDO, L. H. A.; BEUTLER, A. N. Dispersão da fração argila de um latossolo sob diferentes sistemas de uso e dispersantes. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.33, p.723-728, 2009.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado**: correção do solo e adubação. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 416 p.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. **Informações Agronômicas**, Piracicaba,102, 16p., 2003.

SOUSA, D.M.G. et al. Fósforo. In: BOAS práticas para uso eficiente de fertilizantes. Piracicaba : IPNI, 2010. 362 p.

SOUZA, R.F. et al. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.975-983, 2006.

STEINER, F. et al. Extraction methods and availability of phosphorus for soybean in soils from Paraná State, Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.33, p.1005-1014, 2012.

STEVENSON, F.J. **Cycles of soil**. New York: Wiley-Interscience Publication, 1986. 380p.

STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222p.

STUMM, W.; MORGAN, J.J. **Aquatic chemistry**. New York: Wiley-Interscience, 1981. 780p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TAVARES FILHO, J.; MAGALHÃES, F.S. Dispersão de amostras de latossolo vermelho eutroférico influenciadas por pré-tratamento para oxidação da matéria orgânica e pelo tipo de agitação mecânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, 2008.

TEDESCO, M.J. et al. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5).

TIRLONI, C. et al. Disponibilidade de fósforo em função das adições de calagem e de um bioativador do solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Santa Maria, v.33, p.977-984, 2009.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; BARRÓN, V. Phosphate sorption by natural hematites. **European Journal Soil Science**, Oxford, v.45, p.45-51, 1994.

TREMOCOLDI, W.A. Mineralogia dos silicatos e dos óxidos de ferro da fração argila de solos desenvolvidos de rochas básicas no Estado de São Paulo. **Revista Biociências**, Taubaté, v. 9, n. 1, p.15-22, 2003.

VARGAS, R.M.B.; MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. Mecanismos de suprimento de fósforo, potássio, cálcio e magnésio às raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.143-148, 1983.

VILAR, C.C. et al. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.4, 2010.

VILHEGAS, A.C.G. et al. Efeito de épocas de semeadura e estabilidade de híbridos de milho em plantios de safrinha no Noroeste do Paraná. **Bragantia**, Campinas, v.60, p.45-51, 2001.

VITORINO, A. C. T. et al. Uso de energia ultra-sônica e turbidimetria na análise textural de pequenas amostras de solo. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, La Habana, v.16, 2007.

VIVIANI, C.A. **Absorção de fósforo por plantas de soja, com o aumento do pH em latossolos argilosos**. 2006. 60 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Agronomia Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2006.

WADT, P.G.S; SILVA, L.M. Determinação do Fósforo Remanescente para a Avaliação da Disponibilidade de Fósforo em Solos do Estado do Acre. Rio Branco: EMBRAPA Acre, 2011. 5p. (Comunicado Técnico 178)

WILLETT, I.R.; HIGGINS, M.L. Phosphate sorption and extractable iron in soils during irrigated rice-upland crop rotations. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, East Melbourne, v.20, p.346-353, 1980.

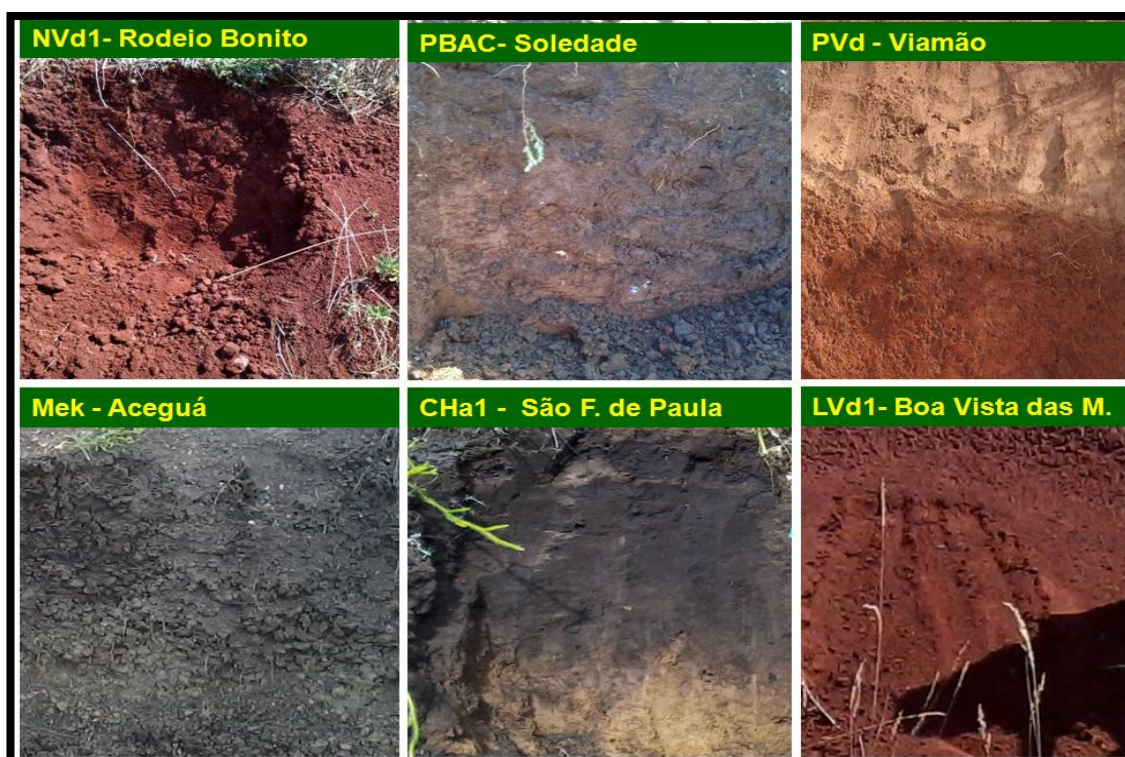
XUE, Q. et al. Deriving sorption indices for the prediction of potential phosphorus loss from calcareous soils. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, p.1-8, 2013.

ZHANG, L. et al. Adsorption characteristic studies of phosphorus onto laterite. **Desalination and Water Treatment**, Hopkington, v. 25, p.98-105, 2011.

8. ANEXOS



Anexo 1. Coleta de solos para desenvolvimento dos estudos.



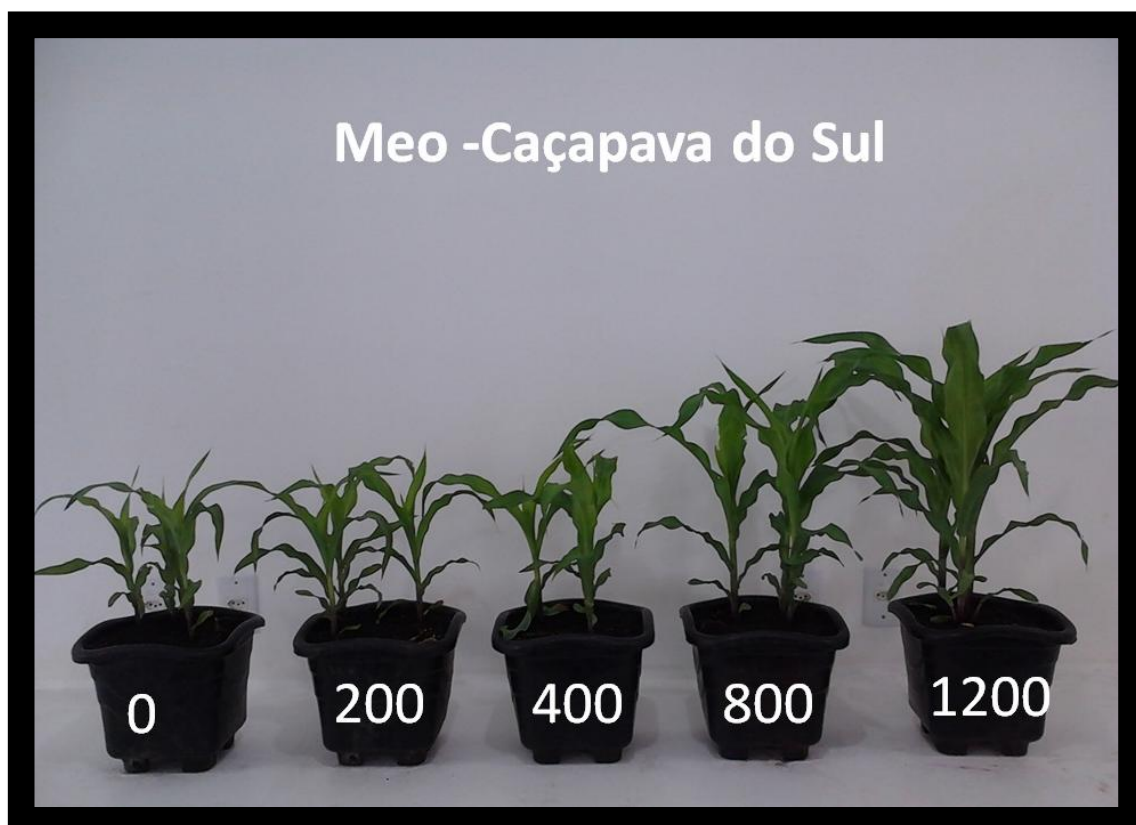
Anexo 2. Perfis de alguns solos utilizados nos experimentos.



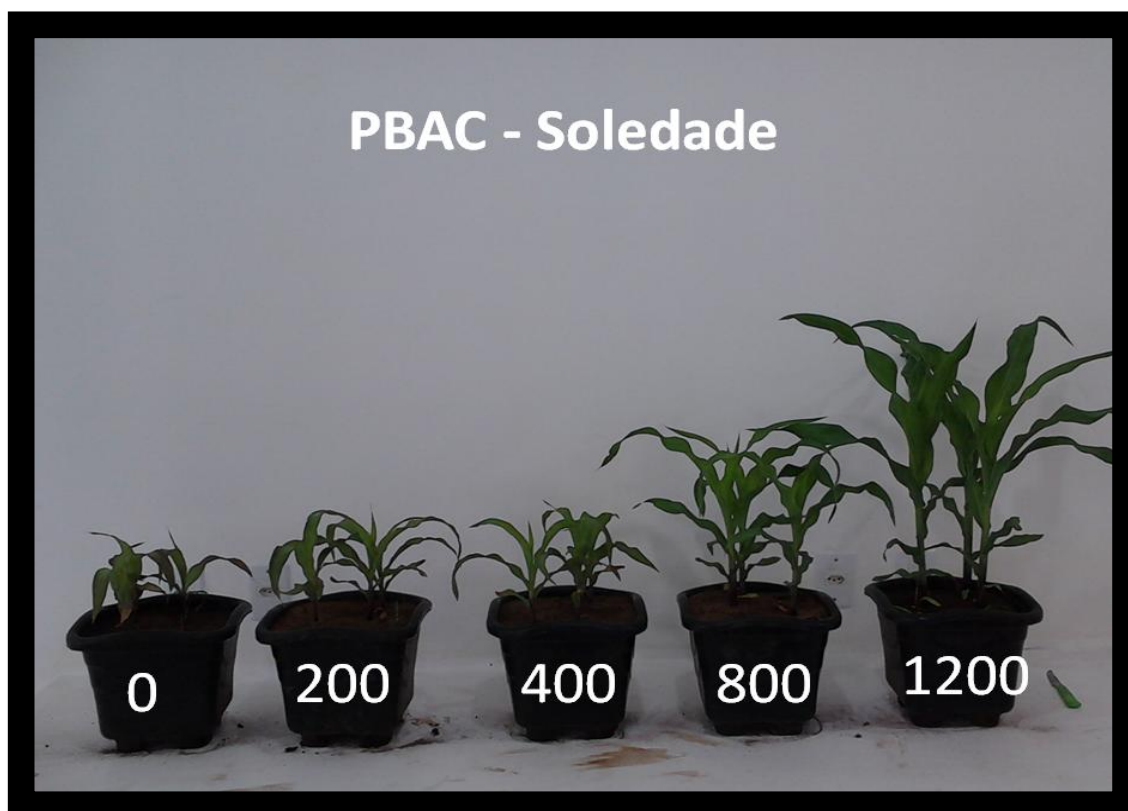
Anexo 3. Homogeneização e pesagem das unidades experimentais.



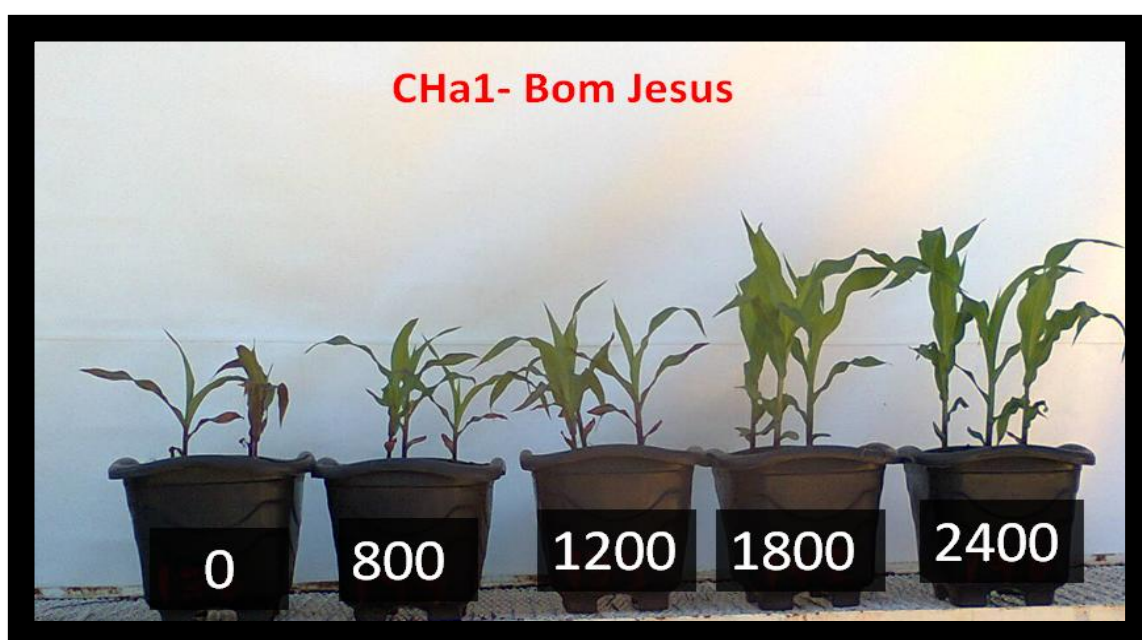
Anexo 4. Registro fotográfico das plantas em desenvolvimento dispostas na área experimental.



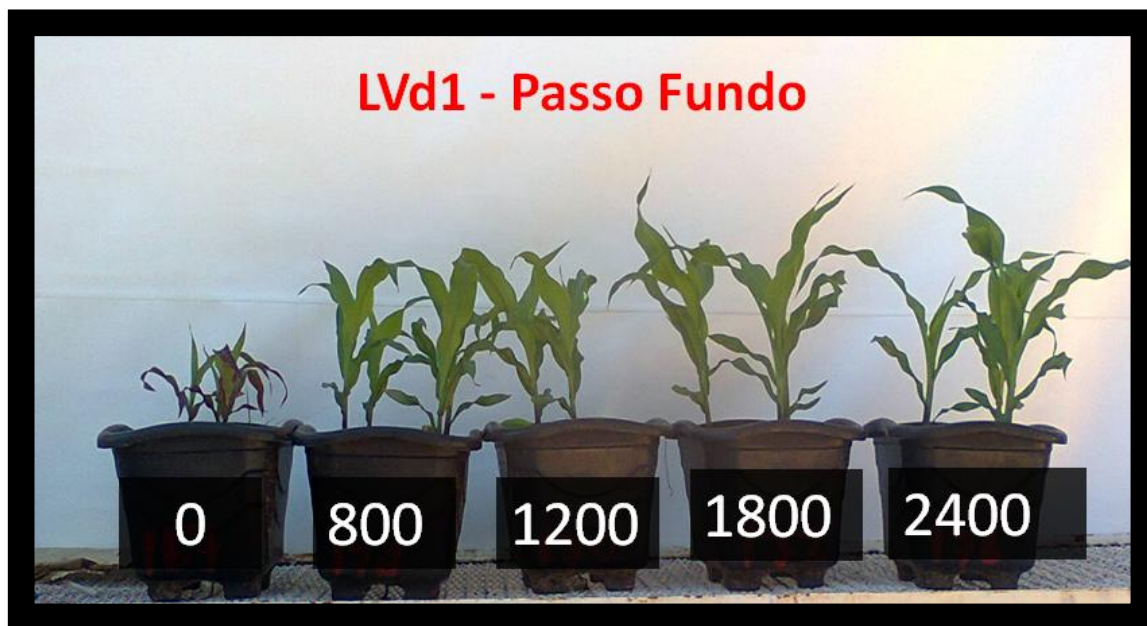
Anexo 5. Registro fotográfico das plantas antes colheita no segundo cultivo.



Anexo 5. Continuação...



Anexo 6. Registro fotográfico das plantas antes da colheita no terceiro cultivo



Anexo 6. Continuação...



Anexo 7. Amostras de solo coletadas para análise química.