



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO NO PERFIL DO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

Daiene Bittencourt Mendes Santos

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF
MARÇO/2009

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO NO PERFIL DO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO
DIRETO**

Daiene Bittencourt Mendes Santos

ORIENTADOR: Wenceslau J. Goedert
CO-ORIENTADOR: Djalma Martinhão Gomes de Sousa

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO: 002/2009

BRASÍLIA/DF
MARÇO/2009

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO NO PERFIL DO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO
DIRETO**

Daiene Bittencourt Mendes Santos

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À FACULDADE DE AGRONOMIA
E MEDICINA VETERINÁRIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
AGRONOMIA.**

APROVADA POR:

**Wenceslau J. Goedert, Professor Associado, PhD (Universidade de Brasília -
UnB)
(Orientador) CPF: 005799550-87 E-mail: goedert@unb.br**

**Sebastião Alberto de Oliveira, Professor Associado, Doutor (Universidade de
Brasília - UnB)
(Examinador Interno) CPF: 052361771-20 E-mail: oliveira@unb.br**

**Lúcio José Vivaldi, Professor Associado, Doutor (Universidade de Brasília -
UnB)
(Examinador Externo) CPF: 098739617-04 E-mail: vivaldi@unb.br**

BRASÍLIA/DF, 18 de MARÇO de 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Daiene Bittencourt Mendes

Distribuição do fósforo no perfil do solo sob sistema plantio direto. / Daiene Bittencourt Mendes Santos; orientação de Wenceslau J. Goedert; co-orientação de Djalma M. G. de Sousa – Brasília, 2009. 81 p. : il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2008.

1. Adubação fosfatada 2. Fontes de fósforo 3. Modos de aplicação de fósforo 4. Extratores de fósforo do solo. 5. Cerrado I. Goedert, W. J. II. PhD.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, D. B. M. **Distribuição do fósforo no perfil do solo sob sistema plantio direto**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2009, 81 p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Daiene Bittencourt Mendes Santos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Distribuição do fósforo no perfil do solo sob sistema plantio direto.

GRAU: Mestre ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Daiene Bittencourt Mendes Santos

CPF 000985391-08

Condomínio Residencial Mônimo, Quadra 11, Casa 15, Lago Sul.

71680-601 - Brasília/DF - Brasil

(61) 3335-0737/9115-7715 e daienebms@pop.com.br

Dedico à minha família, que sempre esteve ao meu lado. Em especial, aos meus pais, que foram meus pontos de apoio e de equilíbrio.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela luz que me ilumina, pela família maravilhosa, pelos amigos, pela inteligência e perseverança, pelas oportunidades, pela força e coragem para aproveitar cada oportunidade e pela vida, da qual não tenho o que reclamar.

Aos meus pais Edir Pereira dos Santos e Mariane Bittencourt Mendes Santos, pelo apoio e incentivo ao longo de meus estudos. Pela educação e ensinamentos diários, que sempre me ajudaram na hora das decisões. Por todo amor que dedicam a mim. Por serem tão importantes na minha vida, como proteção, como suporte, como estímulo e como modelos de luta e de perseverança.

À minha irmã Daiane Bittencourt Mendes Santos, pelo companheirismo, carinho, ajuda e apoio.

Aos meus avós Edgar Pereira dos Santos e Adi Alves dos Santos, por toda ajuda, apoio e força. Pelo amor e dedicação. Por acreditarem no meu potencial e serem um estímulo para que eu vá cada dia mais longe, sempre empenhando o meu melhor.

Ao meu orientador Wenceslau J. Goedert, pela oportunidade de poder trabalhar com ele, o que me rendeu muitos conhecimentos. Pelos ensinamentos, confiança e liberdade para expressar meus pensamentos e para agir.

À Djalma Martinhão Gomes de Sousa, por seu empenho contínuo em me ajudar, por sua atenção e paciência. Por compartilhar comigo seus conhecimentos e experiências, dentro e fora do laboratório. Por ser um exemplo de determinação e ética. Por ter se tornado um amigo sem igual, pelo companheirismo e bom humor constante.

Aos companheiros de trabalho do laboratório de química de solos e dos campos experimentais: Almir Pereira de Brito, Euzino Rodrigues, Robson Santos Alves, Vanessa dos Anjos Queiroz, João Neres da Silva, Pedro das Neves, José Ailson Rodrigues, Neandro José da Silva, Valmir Vieira de Sousa, pela amizade, convivência e por partilharem diversos momentos de tensão e alegria comigo dentro do trabalho.

Aos meus professores e amigos da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, pelos momentos agradáveis que passamos juntos em diversas aulas, trabalhos, seminários e saídas de campo, compartilhando experiências e conhecimentos.

À Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília pela oportunidade de cursar o mestrado em Agronomia e realizar esse sonho.

À Embrapa Cerrados, em Planaltina-DF, por disponibilizar suas instalações e material para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

Capítulos/Sub-capítulos	Página
2. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Distribuição do P no solo sob Sistema plantio direto	3
2.2. Modo de aplicação do P	7
2.3. Fontes de P.....	13
2.4. Métodos de avaliar a disponibilidade de P no solo.....	17
3. OBJETIVOS E HIPÓTESES	24
3.1. Objetivo Geral.....	24
3.2. Objetivos Específicos.....	24
3.3. Hipóteses.....	25
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
CAPÍTULO ÚNICO	34
1. INTRODUÇÃO	37
2. MATERIAL E MÉTODOS	38
2.1. Histórico do experimento.....	39
2.2. Seleção dos tratamentos e amostragem do solo	41
2.3. Procedimentos analíticos	43
2.4. Análises estatísticas	44
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
3.1. Distribuição do P extraível no perfil do solo	48
3.1.1. Efeito das fontes de fertilizante fosfatado	49
3.1.2. Efeito dos modos de aplicação dos fertilizantes fosfatados	51
3.1.3. Distribuição vertical e horizontal do P no solo.	51
3.1.4. Interações.....	54
3.1.4.1. Interação entre fontes de fertilizante fosfatado e modos de aplicação do fertilizante	54
3.1.4.2. Interação entre modos de aplicação do fertilizante fosfatado e distribuição vertical avaliada até 30 cm.....	54
3.1.4.3. Interação entre fontes de fertilizante fosfatado e distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade.....	56
3.1.4.4. Interação entre modos de aplicação do fertilizante fosfatado e distribuição horizontal do P correspondente ao espaçamento da cultura do milho	57
3.1.4.5. Interação entre fontes de fertilizante fosfatado e distribuição horizontal de P correspondente ao espaçamento da cultura do milho.....	58
3.1.4.6. Interação entre distribuição vertical do P avaliada até 30 cm de profundidade e distribuição horizontal de P correspondente ao espaçamento da cultura do milho.....	59
3.1.4.7. Interação entre fontes de fertilizante fosfatado, modos de aplicação do fertilizante e distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade.....	60

3.1.4.8. Interação entre fontes de fertilizante fosfatado, modos de aplicação do fertilizante e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho	63
3.1.4.9. Interação entre fontes de fertilizante fosfatado, distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho.....	65
3.1.4.10. Interação entre modos de aplicação do fertilizante, distribuição vertical avaliada até a profundidade de 30 cm e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho.....	67
3.2. Correlações entre os extratores	68
3.3. Distribuição do P no solo e o rendimento de grãos	72
4. CONCLUSÕES.....	78
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela		Página
CAPÍTULO ÚNICO		
Tabela 01.	Análise química e granulométrica do solo antes da implementação do experimento, na camada de 0 cm a 20 cm ⁽¹⁾	39
Tabela 02.	Características químicas dos fertilizantes fosfatados utilizados no experimento ⁽¹⁾	40
Tabela 03.	Tratamentos selecionados no experimento da Embrapa Cerrados, conduzido sob sistema plantio direto.....	42
Tabela 04.	Teores de P no solo avaliado por três extratores para a profundidade de 0 a 30 cm, obtida com média aritmética de todas as amostras por tratamento, independente da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade e da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, coletados após o oito anos de cultivo da área.....	47
Tabela 05.	Resultados do teste de hipótese de Student (t) para os teores de P extraídos por Mehlich I, Bray 1 e Resina em todos os tratamentos analisados.....	48
Tabela 06.	Resultado da análise estatística com estrutura fatorial, relacionando dois modos de aplicação do fertilizante fosfatado, lanço e sulco, duas fontes de P, ST e FNR, distribuição vertical avaliada até 30 cm (Prof) e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho (Horiz), para os três métodos de extração de P do solo.	49
Tabela 07.	Teores de P do solo, avaliados por três extratores, para as duas fontes de P aplicadas ao solo, Superfosfato triplo e Fosfato natural reativo, independentes da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade, da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e do modo como o P foi aplicado ao solo.....	50
Tabela 08.	Teores de P do solo, avaliados por três extratores, para os dois modos de aplicação do fertilizante fosfatado, a lanço na superfície do solo e no sulco de semeadura, independentes da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade, da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e das fontes de P aplicadas ao solo.....	51

Tabela 09.	Distribuição do P extraído por Mehlich I, Resina e Bray 1 no sentido horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, independente da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade, do modo de aplicação e da fonte de fertilizante fosfatado..	53
Tabela 10.	Teores de P do solo, avaliados pelos três extratores, para as duas fontes de P e os dois modos de aplicação do fertilizante, independente da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura milho e da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade..	54
Tabela 11.	Equações de regressão linear e coeficientes de correlação entre os valores de P extraível obtidos pelos diferentes extratores Mehlich 1, Bray 1 e Resina, dos tratamentos que receberam adubação fosfatada com Superfosfato Triplo (ST) e Fosfato Natural Reativo (FNR).....	68
Tabela 12.	Fósforo extraível da camada de 0 cm a 30 cm do perfil do solo, e distribuição relativa de P extraído contido na camada de 0 cm a 10 cm , avaliados pelos extratores Mehlich I , Bray 1 e Resina nos tratamentos que receberam adubação fosfatada com diferentes fontes de fósforo e modos de aplicação desse fertilizante ao solo.	75
Tabela 13.	Rendimento total acumulado dos oito cultivos da área, para diferentes fontes de fósforo e modo de aplicação do fertilizante ao solo ^{(1), (2)}	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
CAPÍTULO ÚNICO		
Figura 01.	Esquema de amostragem do solo, com sete pontos distribuídos transversalmente em relação à linha de plantio e em cinco diferentes camadas.	43
Figura 02.	Distribuição do P no solo nos sentidos vertical avaliado até 30 cm de profundidade e horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, extraído por Mehlich I, para o tratamento onde não se aplicou P (sem P) e para a média dos tratamentos que receberam adubação fosfatada, como superfosfato triplo ou fosfato natural reativo, aplicados a lanço na superfície do solo ou no sulco de semeadura (com P)..	47
Figura 03.	Distribuição vertical avaliada até 30 cm do P extraído por Mehlich I, Resina e Bray 1, independentes da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, fontes de fertilizantes fosfatados e modo de aplicação do adubo ao solo.....	52
Figura 04.	Distribuição vertical do P no solo até 30 cm de profundidade, extraído por Mehlich I, Resina e Bray 1, para dois modos de aplicação do fertilizante fosfatado e independente da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e das fontes de fertilizante fosfatado, após 8 anos de estabelecido o SPD..	56
Figura 05.	Distribuição vertical do P avaliada até a profundidade de 30 cm, extraído por Mehlich I, Resina e Bray 1, para as duas fontes de fertilizantes fosfatados (superfosfato triplo- ST e fosfato natural reativo – FNR), independentes do modo de aplicação e distribuição horizontal do P correspondente ao espaçamento da cultura do milho..	57
Figura 06.	Distribuição do P extraído por Mehlich I, Bray 1 e Resina no sentido horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, em função do modo de aplicação do fertilizante, se a lanço ou no sulco de semeadura, independentemente da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade e da fonte de fertilizante fosfatado utilizada.	68
Figura 07.	Distribuição horizontal do P correspondente ao espaçamento da cultura do milho, extraído por Mehlich I, Resina e Bray 1 em função da fonte de P, se o Superfosfato triplo (ST) ou o Fosfato natural reativo (FNR), independentes da distribuição vertical avaliada até 30 cm e do modo de aplicação do fertilizante fosfatado.	59

Figura 08.	Distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e vertical avaliada até a profundidade de 30 cm do P extraído por Mehlich I, independentemente da fonte de fertilizante fosfatada e do modo de aplicação.	60
Figura 09.	Distribuição vertical avaliada até 30 cm profundidade do P extraído por Mehlich I, Bray 1 e Resina para fontes de P (ST ou FNR) e modos de aplicação do fertilizante (Lanço ou Sulco), independentemente da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho.	62
Figura 10.	Distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho do P extraído por Mehlich I, Bray 1 e Resina para fontes de P (ST ou FNR) e modo de aplicação do fertilizante (lanço ou sulco), independentemente da distribuição vertical avaliada até 30 cm.....	64
Figura 11.	Distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e vertical avaliada até 30 cm de profundidade do P extraído por Mehlich I, Bray 1 e Resina para fontes de P (ST ou FNR), independentemente do modo de aplicação do fertilizante.....	66
Figura 12.	Distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e distribuição vertical avaliada até a profundidade de 30 cm do P extraído por Mehlich I para diferentes modos de aplicação do fertilizante, se a lanço ou no sulco de semeadura, independentemente da fonte de fertilizante fosfatado.	67
Figura 13.	Correlação entre os extratores Mehlich I e Resina ⁽¹⁾ , considerando apenas os teores de P extraível por Mehlich I até 42 mg dm ⁻³ e até 10 cm de profundidade nos solos, e considerando, em conjunto e separados, os tratamentos que receberam adubação fosfatada com Superfosfato Triplo (ST) e os com Fosfato Reativo (FNR)..	70
Figura 14.	Correlações entre os extratores Mehlich I e Bray 1 ⁽¹⁾ , considerando apenas os teores de P extraível por Mehlich I até 42 mg dm ⁻³ e até 10 cm de profundidade nos solos, e considerando, em conjunto e separados, os tratamentos que receberam adubação fosfatada com Superfosfato Triplo (ST) e os com Fosfato Reativo (FNR).	71
Figura 15.	Distribuições do P extraível pelos métodos Mehlich I, Bray 1 e Resina, nos sentidos horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e vertical avaliada até a profundidade de 30 cm, para diferentes fontes de P, se Superfosfato triplo (ST) ou Fosfato natural reativo (FNR), e diferentes modos de aplicação do fertilizante, se a lanço ou no sulco de semeadura	73

ÍNDICE DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Al – alumínio
C – carbono
°C – grau Celsius
Ca – Cálcio
cm – centímetro
cmol_c – centimol carga
CTC – capacidade de troca catiônica
cv – cultivar
DAP – fosfatos diamônicos
dm³ – decímetro cúbico
Fe - ferro
FNR – fosfato natural reativo
FRG – fosfato natural reativo de Gafsa
g – grama
ha – hectare
IEA – índice de eficiência agronômica
K - potássio
kg – quilograma
L – litro
m – metro
M – molar
MAP – fosfatos monoamônicos
mg – miligrama
mL – mililitro
mm - milímetro
MO – Matéria orgânica
N – normal
nm – nanômetro
NS – não significativo
NT – no-tillage system
OM - organic matter
P – Fósforo
pH – potencial hidrogeniônico
RTA – resina trocadora de ânions
S - enxofre
SPC – Sistema plantio convencional
SPD – Sistema plantio direto
SS – superfosfato simples
ST – superfosfato triplo
t – tonelada

DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO NO PERFIL DO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

RESUMO GERAL

O Cerrado, mesmo com solos de baixa fertilidade, vem crescendo em importância dentro do cenário agrícola brasileiro, graças ao planejamento do uso e manejo da terra, associado à adoção do Sistema Plantio Direto (SPD) e ao uso de corretivos e fertilizantes. A aplicação de fertilizantes em SPD é feita predominantemente no sulco de semeadura, o que leva ao acúmulo de nutrientes nas camadas superficiais do solo, como de fósforo (P), devido ao não revolvimento do mesmo. Esse aumento da concentração de P na camada superficial do solo sob SPD teria estreita relação com o teor de matéria orgânica (MO) depositada na superfície do solo e varia com o tipo de solo e o tempo de adoção do SPD. Alguns autores citam a distribuição estratificada do P no perfil dos solos sob SPD. A localização do fertilizante fosfatado em relação às raízes das plantas também influenciaria na distribuição do P no solo. A interação de uma série de fatores como dose e solubilidade do fertilizante, espaçamento e distribuição do sistema radicular das culturas, as características químicas e físicas do solo e o sistema de plantio adotado influenciam na resposta das plantas aos diferentes modos de aplicação dos fertilizantes. Com relação a escolha da fonte de P a ser utilizada, ela normalmente se baseia tanto na sua eficiência em suprir as plantas como no custo da unidade de P_2O_5 posto na propriedade. Os superfosfatos simples e triplo são fontes solúveis de P de reconhecida e elevada eficiência agrônômica, para quaisquer condições de solo e de cultura no Cerrado. A utilização de fontes alternativas mais baratas, como os fosfatos naturais reativos (FNR) na forma farelada vêm aumentando, embora estes produtos apresentem baixa solubilidade em água, quando comparados aos fosfatos solúveis. Condições de maior CTC e, particularmente, de maiores teores de MO, como ocorre em SPD, favorecem a dissolução dessas fontes de P. A análise de solo é um dos instrumentos mais utilizados para a recomendação de adubação, a qual baseia-se na relação existente entre os teores de nutrientes no solo e o rendimento das culturas, assim como na relação entre doses de P aplicadas e o rendimento de grãos. Para avaliar a disponibilidade de P no solo existe uma grande variedade de métodos, classificados segundo seus modos de ação, como, por exemplo, os de dissolução ácida (Mehlich 1), os de troca iônica (Resina) e os de complexação de cátions (Bray 1). O método Mehlich 1 tem como grande vantagem a simplicidade de extração.

Entretanto, há a extração preferencial de compostos de Ca, que levam a valores de P disponível superestimados em solos que possuem os fosfatos de Ca como mineral primário ou que receberam adubação com fosfatos naturais. A extração do P do solo feita pela Resina, apesar de corrigir ou minimizar os problemas de subestimar ou superestimar o P disponível, é considerada pouco adequada para análise de rotina, principalmente pelo longo período de agitação do solo com resina em suspensão aquosa e pela etapa laboriosa de separação da resina do solo após a agitação. O caráter menos ácido do Bray 1 e, de modo particular, a ausência de SO_4^{2-} como ânion de troca mais efetiva com o fosfato, faz com que a indesejável extração preferencial de P-Ca não ocorra. Uma limitação do extrator Bray 1 está na presença de CaCO_3 em grandes quantidades no solo, dando um valor subestimado da disponibilidade de P, o que pode acontecer em análises de solo com SPD, onde a calagem é feita em superfície, sem incorporação. Saber a diferença entre o que é e o que não é extraído em cada método de extração e para cada situação pode ser uma fonte de informação importante. Diante dessas abordagens, este trabalho objetivou caracterizar o resultado da adubação fosfatada em um Latossolo Vermelho do Cerrado a oito anos sob SPD, no que diz respeito a distribuição do P no perfil do solo, levando em consideração duas fontes de P e dois modos de aplicação do adubo no solo, para as culturas de soja e milho. Para tal, foram utilizados três métodos de extração de P disponível no solo: o Mehlich 1, o Bray 1 e a Resina.

Termos de Indexação: adubação fosfatada, fontes de fósforo, modos de aplicação de fósforo, extratores de fósforo do solo, Cerrado.

PHOSPHORUS DISTRIBUTION IN THE SOIL UNDER NO-TILL SYSTEM

GENERAL ABSTRACT

The Cerrado, even with soils of low fertility, has been increasing in importance within the Brazilian agricultural scenario, by planning the use and management of land, with the adoption of no-tillage system (NT) and the use of correctives and fertilizers. The application of fertilizers in NT is all done on the soil surface, which leads to the accumulation of nutrients on the soil surface, such as phosphorus (P), due to non-revolving of the soil. This increased concentration of P in surface soil under NT has close relationship with the content of organic matter (OM) deposited on the surface, varying with the soil type and time of adoption of the NT. Some authors cite the stratified distribution of P in the soil under NT. The location of phosphate fertilizer in relation of the roots of plants is also have influence in P distribution in the soil. The interaction of a number of factors such as dose and solubility of fertilizers, spacing and distribution of root crops, the physical and chemical characteristics of soil and tillage system adopted influence the response of plants to different ways of application of fertilizers. With respect to the choice of the source of P to be used, it is usually based on their efficiency in both supply the plant and the unit cost of P_2O_5 put on the property. Superphosphates simple (SS) and triple (ST) are soluble sources of P and high agronomic efficiency for any conditions of soil and crop in the Cerrado. The use of cheaper alternative sources such as natural reactive phosphate (FNR) in mash form is increasing, although these products have low solubility in water, when compared to soluble phosphates. Conditions of higher CTC and higher levels of OM, as in NT, favors the dissolution of these sources of P. The analysis of soil is one of the most used tools for the recommendation of fertilization, which is based on the relationship between the levels of nutrients in the soil and yield of crops as well as the relationship between levels of P applied and grain yield. To assess the availability of P in soil, there is a variety of methods, classified according to their ways of action, such as the acid dissolution (Mehlich 1), the ion exchange (Resin) and the complexation of cations (Bray 1). The Mehlich 1 method has as advantage the simplicity of extraction. However, there is a preferential extraction of compounds of calcium, leading to overestimated values of available P in soils that have the phosphates of Ca like primary mineral or that received fertilization with natural phosphates. The P extraction made by Resin, despite correct or minimize the problems of underestimate or overestimate the available P, the method is not suitable for routine analysis, mainly by the long period of shaking the soil with

resin in aqueous suspension and the laborious step of separating the resin from the soil after shaking. The less acid character of the Bray 1 and, in particular, the absence of SO_4^{2-} like most effective anion-exchange with the phosphate, makes the undesirable preferential extraction of Ca-P does not occur. A limitation of the Bray 1 extractant is in the presence of CaCO_3 in large quantities in the soil, giving a value underestimated the availability of P, which can happen in analysis of soil under NT, where the application of lime is done on surface without incorporation. Learn the difference between what is and is not extracted by each method of extraction to each situation can be a source of important information. In view of these approaches, this study aimed to characterize the results of phosphate fertilization in an Oxisol of the Cerrado eight years under NT, as regards the distribution of P in the soil, taking into account two different P sources and two ways of application of fertilizer in the soil, for soybean and corn crops. To meet this objective, we used three methods for extraction of available P in soil: Mehlich 1, Bray 1 and Resin.

Index Terms: phosphate fertilization, P sources, ways of P application, P extractors of the soil, Cerrado.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Cerrado ocupa, aproximadamente, 24 % do território brasileiro. Essa região é formada por diferentes classes de solos e formações geológicas, que combinados com as condições climáticas, de duas estações bem definidas e incidência de veranicos na estação chuvosa, são capazes de gerar variações consideráveis nas comunidades vegetais. É formada, em sua maioria, por solos muito intemperizados, os Latossolos (46 % da região), que apresentam boa drenagem, sem grandes impedimentos a mecanização agrícola e baixa fertilidade natural, corrigida com a aplicação de corretivos e fertilizantes (Bernardi et al., 2003; Costa e Olszewski, 2008).

Entretanto, mesmo com solos de baixa fertilidade, a região do Cerrado vem crescendo em importância dentro do cenário agrícola brasileiro. Sua participação na produção de grãos, como milho e soja, é enorme, chegando a possuir uma média de produção maior que a nacional (Sousa e Lobato, 2004). Parte desse sucesso se deu graças o planejamento do uso e manejo da terra, associado à adoção do sistema conservacionista, o Sistema Plantio Direto (SPD), já na década de 90, que visavam o bom uso dos recursos naturais da região (Sousa e Lobato, 2000; Cervi, 2003).

O SPD é a forma de manejo conservacionista que envolve um conjunto de técnicas integradas visando otimizar a expressão do potencial genético de produção das culturas com simultânea melhoria das condições ambientais (água-solo-clima). No SPD, o cultivo é feito com o revolvimento mínimo do solo, restrito à cova ou sulco de plantio, há biodiversidade pela rotação de culturas e os restos culturais são deixados na superfície. É um sistema de cultivo que, além de proporcionar economia de tempo, energia e trabalho manual nas operações de campo, funciona como uma medida de conservação do solo, uma vez que os resíduos de plantas deixados na superfície do solo formam uma proteção contra a erosão, evitando a perda de água, de solo e de nutrientes, refletindo diretamente na melhoria da fertilidade.

O aumento de matéria orgânica (MO) no solo pode ser considerado um dos melhores benefícios do SPD, pois traz melhorias para as características físicas, químicas e biológicas do solo. Fisicamente, a presença da MO aumenta a quantidade de agregados de maior estabilidade, melhorando a estrutura do solo e, conseqüentemente a porosidade, a aeração, a drenagem e a retenção de umidade. Biologicamente, sua função é fornecer carbono como fonte de energia para os microrganismos, aumentando sua população e,

conseqüentemente, a ciclagem de nutrientes. Suas funções químicas são atuar como trocador de íons (CTC), estocar nutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S), e liberar compostos orgânicos, na sua decomposição, que ocupam sítios de adsorção de P, reduzindo a capacidade de retenção desse nutriente pelo solo (Sá, 2004), disponibilizando-o para as plantas.

Pode-se entender melhor a influência do SPD no aumento da eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados quando se faz uma análise dos efeitos do sistema de plantio convencional (SPC). Quando o fertilizante é aplicado e o solo é revolvido, como acontece no SPC, há exposição de novos sítios de adsorção, contribuindo para a retenção de P com maior energia. Assim, para manter a disponibilidade de P adequada no solo, a dose necessária de fertilizante a ser aplicada torna-se maior que a demandada pela planta. Do mesmo modo, a incorporação dos resíduos vegetais aumenta a velocidade de decomposição pelos microrganismos, dificultando o acúmulo de MO e de P orgânico. Pela pulverização do solo e ausência de cobertura vegetal, a erosão é significativa, havendo perdas de nutrientes nos sedimentos transportados. Por isso, em sistemas com maior proteção do solo, como o SPD, onde não há revolvimento e os resíduos permanecem na superfície, a eficiência da adubação fosfatada é melhorada (Gatiboni, 2003).

Dentre os nutrientes necessários às plantas, o P é o que mais limita a produtividade na maioria dos solos do Cerrado em função dos baixos teores naturalmente presentes nesses solos em condições naturais (Sousa et al., 2004). Além disso, a fração argila desses solos é constituída principalmente por caulinita (argilas 1:1) e por óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), ou seja, minerais que possuem um alto poder de adsorção de P. Desse modo, adotar um manejo que reduza a capacidade do solo de fixar o P aplicado via fertilizante é uma opção para melhorar a qualidade desses solos. A diminuição da retenção de P pode ser obtida com calagem e pelo aumento da MO. Portanto, o SPD é uma solução, ao manter uma cobertura permanente no solo, contribuindo para o aumento da MO, o que possivelmente torna mais eficiente o uso de fertilizante fosfatado aplicado a esses solos.

Frente a grande participação da região do Cerrado na produção de grãos do Brasil, mesmo possuindo solos muito pobres em nutrientes, com destaque para o P, pode-se ressaltar a importância do uso de corretivos e fertilizantes para a obtenção desses resultados. Assim, o uso de doses adequadas de fertilizantes e de tecnologias sustentáveis de produção, visando a melhora da eficiência desses fertilizantes, vem se tornando uma rotina no campo, sendo um dos fatores mais importantes para o aumento da produção e da produtividade.

Cabe ressaltar também que, como as reservas mundiais de P são finitas, a utilização do nutriente deve obedecer a uma filosofia de maximização da sua eficiência, com adições mínimas e redução das perdas. Para isto, o monitoramento do "status" do P no solo é fundamental para o manejo adequado da adubação fosfatada (Gatiboni, 2003).

Diante dessas abordagens, este trabalho objetivou caracterizar o resultado da adubação fosfatada em um Latossolo Vermelho do Cerrado a oito anos sob SPD com as culturas de soja e milho, no que diz respeito a distribuição do P no perfil do solo, levando em consideração diferentes fontes de P e modos de aplicação do adubo no solo. Para tal, foram utilizados três métodos de extração de P disponível no solo: o Mehlich I, usado como padrão na maior parte do território brasileiro; o Bray 1, indicado para as fontes apatíticas de P; e Resina, usado como padrão no sul do Brasil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Distribuição do P no solo sob Sistema plantio direto

A aplicação de fertilizantes em Sistema Plantio Direto (SPD) é toda feita na camada superficial do solo, predominantemente no sulco de semeadura e, em algumas situações, a lança na superfície, sem incorporação, o que leva ao acúmulo de nutrientes, como de P e potássio (K). Esse acúmulo também é causado pela liberação de P durante a decomposição dos resíduos vegetais, baixa mobilidade do P, (Costa, 2008; Lopes et al., 2004; Duiker e Beegle, 2006; Bravo et al., 2007) e pela menor erosão superficial, que evita a perda do P adsorvido aos sedimentos transportados. Isso foi constatado por Pavan e Chaves (1996), que observaram aumento das frações de P lábeis com o controle da erosão do solo proporcionada pelo adensamento de cafeeiros.

Efeitos indiretos do SPD, provocados pelo aumento da atividade microbiana nas camadas superficiais, pelo menor contato dos resíduos culturais com o solo (sem incorporação) e pela maior umidade proporcionada pela presença da matéria orgânica (MO) (Bravo et al., 2007), também podem influenciar no acúmulo de P na superfície do solo, pois proporcionam maior disponibilidade potencial do P às plantas, já que formam estoque de P microbiano no solo, liberam o P orgânico através da decomposição dos resíduos vegetais deixados na superfície (Lopes et al., 2004), proporcionam menor retenção de P pelo solo e

reduzem a velocidade de decomposição pela biomassa microbiana, resultando na mineralização gradual e parcial dos compostos de carbono, aumentando o conteúdo de matéria orgânica e P orgânico (Rheinheimer, 2000).

Para Conte (2001), Costa (2008), Sá (1993), Sá et al. (2001) e Selles et al. (1997), o aumento da concentração de P na camada superficial do solo sob SPD tem estreita relação com o teor de MO aí depositada. Selles et al. (1997), em seus estudos, observaram que o acúmulo e distribuição de P lábil na superfície do solo sob SPD acompanhavam o modelo de distribuição dos resíduos orgânicos. Isso explicou o fato de eles terem encontrado mais P lábil, extraível por métodos comuns de análise de fertilidade de solos, na camada entre 7 cm e 10 cm do solo sob SPD, do que do solo sob SPC, após cinco anos de experimento. As maiores concentrações de P extraível nos solos sob SPD ocorreram entre 0 cm e 6 cm, com redução drástica do teor entre 6 cm e 10 cm.

Inúmeros estudos têm mostrado uma distribuição estratificada das formas lábeis de P devido o tempo de adoção do SPD. De Maria et al. (1999), em um experimento conduzido por 12 anos, observou que o SPD mostrou ter efeito na capacidade do solo de acumular P e K, sendo este efeito mais evidente na camada mais superficial do solo. Para o P, houve aumento considerável do teor na camada mais superficial do solo, já na primeira amostragem, três anos após a instalação do ensaio. Selles et al. (1997), após cinco anos de experimento, detectou a interação significativa ($P < 0,05$) entre sistema de manejo do solo e distribuição do P em profundidade e um aumento de 15 % na concentração de P nos dez primeiros centímetros de um Latossolo conduzido sob SPD, em relação ao conduzido sob SPC. Rheinheimer e Anghinoni (2001), em experimento com mais de quinze anos de duração, encontraram cerca de quatro vezes mais P na camada de 0 cm a 2,5 cm de um Latossolo Vermelho distrófico sob SPD que de um sob SPC. Já Duiker e Beegle (2006) encontraram cerca de 0,5 vezes mais P na camada de 0 cm a 5 cm do solo sob SPD que do sob SPC, num experimento de vinte e cinco anos. Por fim, estudo realizado por Sá (1993) em Campos Gerais do Paraná demonstra o acúmulo de P na camada de 0 cm a 2,5 cm em diferentes unidades pedológicas com tempos de adoção do SPD entre quatro e dezesseis. Os solos mais argilosos apresentaram maiores concentrações de P nessa camada que os solos arenosos. Portanto, vale salientar que a mobilidade e estratificação do P no solo sob SPD também varia com o tipo de solo, além do tempo de adoção do sistema.

Segundo Costa (2008), de modo geral, não se pode fixar o tempo necessário para que haja a redistribuição de P no solo, mas, o que se verifica é uma tendência de incremento na magnitude deste comportamento com o decorrer do tempo. Este autor, em seu estudo,

verificou a interação ($P < 0,05$) entre ano e profundidade de P no solo, independentemente do sistema de cultivo adotado, havendo, então, efeito dos anos nas profundidades analisadas. Para o autor, as diferentes informações existentes na literatura sobre a profundidade de acúmulo de P em solos sob SPD é efeito do tempo e da adição contínua e em excesso do adubo ao solo, assim como do tipo de solo.

Apesar do P ter mobilidade muito baixa no solo, esse apresenta grande mobilidade no interior das plantas, após ter sido absorvido pelas raízes. Assim, em SPD, a planta pode acabar atuando como um redistribuidor do P no solo, pois, uma vez que os resíduos culturais não são removidos e não há o revolvimento do solo, as raízes contendo o P são mantidas no lugar e ao se decomporem acabam liberando formas orgânicas e inorgânicas de P em regiões mais profundas do solo (Sá, 2004).

Segundo Tucker et al. (1995), o P tende a deslocar-se mais rapidamente para a região de interface raiz/solo após vários anos de implementação do SPD. Ainda segundo esses autores, pesquisas têm mostrado que as plantas que crescem nos solos sob SPD podem absorver nutrientes localizados bem próximos da superfície do solo. Portanto, as plantas ao absorverem o P acumulado na superfície, acabam tendo a possibilidade de redistribuí-lo em profundidade através de suas raízes. Entretanto, para Costa (2008) o contrário também ocorreria, ou seja, as raízes retirariam P das camadas mais profundas e depositariam nas camadas mais superficiais do solo sob SPD ao longo do tempo.

Ainda considerando a participação das raízes das plantas na redistribuição do P no perfil do solo, a escolha das culturas que compõem a rotação no SPD também é importante. O uso de plantas com sistemas radiculares fasciculados, como o milho, por exemplo, podem resultar em uma reciclagem mais intensa do P no solo (Duiker e Beegle, 2006). Raízes mais densas e com crescimento vertical no solo, podem transportar e depositar o P, após sua decomposição, nas camadas mais profundas.

Portanto, ao mesmo tempo em que o manejo no SPD proporciona o acúmulo de P na camada superficial do solo também pode proporcionar uma redistribuição desse nutriente em profundidade, resultando na distribuição estratificada de P no solo.

Esse comportamento específico do P, de acúmulo nas camadas superficiais em solos sob SPD, tem implicações no manejo da adubação fosfatada, principalmente em áreas já estabilizadas e com muitos anos de adoção desse sistema. Para Duiker e Beegle (2006), os resultados de seus estudos sugeriram que poderia haver menor necessidade de adubação fosfatada de correção em áreas sob SPD por longo período de tempo, devido a alta concentração de P na camada de 0 cm a 5 cm do solo, onde a semente normalmente é

semeada. Também, para esses mesmos autores, nas recomendações de adubação fosfatada, haveria a possibilidade de realização de amostragens mais superficiais em solos sob SPD por um longo período de tempo, uma vez que as amostragens de hoje, na camada de 0 cm a 20 cm, não revelam o verdadeiro status de P na superfície do solo, devido sua diluição no solo de maior profundidade. Entretanto, novas curvas de calibração para o SPD ainda devem ser desenvolvidas. Schlindwein e Gianello (2008) corroboram com a essas idéias, mas complementam informando que a análise de solo sob SPD baseada apenas da camada de 0 cm a 10 cm de profundidade proporciona valores maiores de P, sem que necessariamente ocorra aumento de rendimento das culturas e que, por isso, o teor crítico de P considerado deve ser maior nessa camada que na de 0 cm a 20 cm. Concluíram que, dependendo do tipo de solo, do tempo de adoção do SPD, das doses e dos modos de aplicação de fertilizantes, fatores que influem na estratificação do P no solo, o usuário desse sistema de manejo poderia amostrar o solo nas profundidades de 0 cm a 10 cm ou 0 cm a 20 cm.

Segundo Lopes et al. (2004), é bastante provável, que na fase inicial (cinco primeiros anos) de implantação do SPD, o P seja imobilizado nos novos compartimentos de matéria orgânica, havendo, portanto, imobilização e acúmulo do P na camada superficial do solo. Em áreas com mais de 6 anos de implantação do sistema, ou seja, nos locais onde já ocorreu um aumento e estabilização dos estoques de matéria orgânica do solo, é bastante provável que haja um uso mais eficiente de P pelas plantas, em função da menor fixação do P e da maior disponibilização do P-lábil. Com o tempo, isso poderia representar uma diminuição na aplicação de P nas áreas de SPD, em relação às quantidades aplicadas em áreas sob SPC, ou, pelo menos, a possibilidade de obtenção de produtividades maiores em SPD, considerando a mesma quantidade de fertilizante aplicada nos dois sistemas. Bravo et al. (2007), em seus estudos, também aludiu a possibilidade de redução nas aplicações anuais de P em solos sob SPD.

Como conseqüência ruim, o acúmulo de P na superfície do solo pode resultar na saturação da capacidade de retenção de P do solo, deixando parte do nutriente livre para ser levado pela água que sai do sistema, podendo inclusive contribuir para o crescimento excessivo de algas e a eutrofização de águas superficiais (Rheinheimer et al., 2003; Pellegrini, 2005; Lima, 2005). Outras desvantagens, uma vez o P concentrado na camada superficial do solo, seriam a maior possibilidade de perda por erosão e a concentração das raízes da planta nessa camada, reduzindo sua área de exploração por outros nutrientes e por água. Tudo isso poderia ser agravado por um manejo inadequado do SPD, como, por exemplo, o não uso de rotação de culturas, de curvas de nível, de plantas de cobertura e pelo plantio morro abaixo.

Nesses casos, a perda de solo superficial e, conseqüentemente, de P poderia ser maior que no sistema de plantio convencional (SPC).

Assim, visando reduzir o impacto ambiental e manter uma eficiência máxima de uso dos fertilizantes fosfatados, o SPD deve ser freqüentemente monitorado, conjugando a utilização dos fertilizantes com o poder de reciclagem biológica de culturas de cobertura e da rotação e corrigindo suas eventuais dificuldades para manter o sistema produtivo e sustentável (Sousa e Lobato, 2002; Martinazzo e Kaminski, 2006). A recomendação da adubação passa a considerar o sistema, e não as culturas de forma individual.

2.2. Modo de aplicação do P

A localização do fertilizante fosfatado em relação às raízes das plantas também é considerada fator determinante para a absorção de P, crescimento e produtividade de muitas culturas. Assim, umas das opções para aumentar a eficiência de fertilizantes fosfatados é sua aplicação de modo adequado no solo. A escolha dessa prática dependerá do solo, da fonte de P, da espécie a ser cultivada, do sistema de preparo e do clima. As formas mais utilizadas para adicionar fósforo ao solo são: a lanço, na superfície, com ou sem incorporação, e no sulco de plantio, em cova e em faixas (Sousa et al., 2004). Pode-se ainda utilizar a aplicação em cobertura (Goedert et al., 1986).

Quando fertilizantes fosfatados são aplicados ao solo, após a sua dissolução, praticamente todo o P é retido na fase sólida do solo, formando compostos menos solúveis. Todavia, grande parte do P retido é aproveitada pelas plantas (Sousa e Lobato, 2004). Diversos fatores determinam a magnitude desse reaproveitamento, dentre eles, o modo de aplicação.

A interação de uma série de fatores como dose e solubilidade, espaçamento e distribuição do sistema radicular das culturas e as características químicas e físicas do solo que afetam o suprimento de nutrientes, influenciam na resposta das plantas aos diferentes modos de aplicação dos fertilizantes (Pavinato e Ceretta, 2004).

Segundo um estudo de campo feito por Yost et al. (1979), quanto maior foi a dose de P aplicada, maior a produção do milho, em SPC, sendo que no primeiro cultivo a aplicação de P a lanço resultou em uma maior produção de milho que a aplicação no sulco, nas doses de 160 e 320 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Nos três cultivos subseqüentes, as maiores produções ocorreram quando o P foi aplicado no sulco de semeadura, resultando, no final de quatro cultivos, na similaridade de produção total de milho e de P absorvido entre os dois modos de aplicação,

para as mesmas quantidades de P aplicada. Concluíram que o maior rendimento de grãos inicial quando o P foi aplicado a lanço (só por ocasião do primeiro cultivo) pode ter sido devido à distribuição mais uniforme do nutriente por volume de solo, e o maior rendimento nos cultivos subseqüentes quando o P foi aplicado no sulco a cada cultivo, por reduzir a possibilidade passagem para formas mais estáveis na fase sólida do solo.

O efeito da localização do fertilizante na disponibilidade do P também depende de sua solubilidade em água. Lawton et al. (1956), num estudo em casa de vegetação, constataram que, se menos de 40-45% do P aplicado era solúvel em água, a porcentagem do P absorvido era maior quando o fertilizante, em pó, era aplicado a lanço e misturado ao solo que quando aplicado no sulco, próximo a semente. Já com fertilizantes de alta solubilidade em água, a porcentagem de P absorvido era maior quando aplicado no sulco de semeadura. Em outro estudo, feito a campo, Webb e Pesek (1959) demonstraram que a solubilidade em água não foi um fator determinante na eficiência do fertilizante para o crescimento do milho em solos ácidos, com baixo ou muito baixo teor de P disponível e sob SPC, num intervalo de doses entre 22,5 kg ha⁻¹ e 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅, independentemente de ter sido aplicado a lanço ou no sulco. Entretanto, fontes de P com solubilidade muito baixa em água tendem a ser menos efetivas. Em solos corrigidos com calcário, o aumento da solubilidade em água do fertilizante fosfatado aplicado a lanço representou uma ligeira vantagem para o crescimento do milho (Webb et al., 1961).

Para fontes de P de baixa solubilidade em água, como os fosfatos naturais reativos farelados, o ideal seria a aplicação a lanço, incorporando-os ao solo, pois isso acelera seu processo de solubilização (Sousa e Lobato, 2004).

Saber se determinada localização de P no solo é vantajosa ou não, depende de como essa localização vai afetar o P total absorvido pela planta. Segundo Anghinoni (1979), para desenvolver um sistema de fertilização fosfatada eficiente para uma determinada cultura, é necessário compreender as características da absorção de P pelo sistema radicular assim como os fatores que controlam a adsorção de P pelo solo. Com relação ao sistema radicular, pode-se dizer que a absorção de P pelas raízes depende da área total da raiz que está em contato com o fertilizante e da taxa de absorção por unidade de área. Entretanto, a quantidade de P em contato com a superfície radicular é em função da taxa de crescimento da raiz e do volume de solo que recebeu o fertilizante (modo de aplicação). Com relação à adsorção de P pelo solo, a taxa de retenção de P diminui com o aumento da concentração de P no solo, o que ocorre em aplicações localizadas. Isso também foi observado em estudos de Sousa (1980) e de Shelton e Coleman (1968), onde os resultados mostraram que a capacidade de retenção de P

pode, em alguns casos, ficar saturada, resultando numa menor taxa de declínio de P disponível e um esperado longo valor residual proveniente de pesadas aplicações de P.

A quantidade de P fornecida para a planta determina a taxa de P absorvida por ela e o total absorvido será diretamente proporcional ao tamanho da área superficial das raízes. Ou seja, o volume de solo fertilizado também acaba afetando grandemente a distribuição de raízes no solo, como demonstrado por Costa (2008) em seu estudo. Assim, quando a quantidade de P no solo é muito baixa e, conseqüentemente, a taxa de P na planta diminui, ela tenta compensar essa deficiência com o crescimento em comprimento das raízes. Os pêlos radiculares também têm sido apontados como causa do aumento da taxa de P absorvido por plantas, principalmente em solos com baixas concentrações de P, por aumentarem a área superficial das raízes, onde a difusão, principal mecanismo de nutrição das raízes, ocorre (Anghinoni, 1979). Portanto, características do sistema radicular das plantas também podem influir na escolha do modo de aplicação do fertilizante fosfatado.

Levando em consideração as características químicas e físicas do solo, Sleight et al. (1984), num estudo em casa de vegetação, constataram que em um solo siltoso de pH 8,4, em ambas as doses de 4,4 mg e 2,2 mg de P por kg de solo, a produção de aveia e o P absorvido foram maiores quando os pontos de aplicação do P foram mais afastados, enquanto que em um solo arenoso de pH 5,9 nenhuma relação foi encontrada entre o espaçamento de aplicação do fertilizante e o P absorvido pela cultura, pois nesse solo o próprio movimento de P e a baixa capacidade de retenção aumentou a probabilidade de ocorrer o contato entre a raiz e o fertilizante. Concluíram então que em solos com alta capacidade de retenção de P o fertilizante deve ser aplicado no sulco, pois o importante é aumentar a probabilidade de encontro entre a raiz e o fertilizante, para garantir a eficiência de uso do fertilizante nas primeiras semanas de crescimento da cultura. Entretanto, essa importância vai desaparecendo com o tempo e com o desenvolvimento das culturas, devido a distribuição do P no solo e o crescimento das raízes.

Segundo Welch et al. (1966) e Costa (2008), a eficiência relativa da aplicação do fertilizante fosfatado a lanço versus no sulco parece estar relacionada ao teor de P inicial no solo. Quanto mais deficiente em P foi o solo, melhor e maior foi a resposta em rendimento de grãos do milho ao P aplicado de forma localizada. Mas, assim que o teor de P no solo foi aumentando, essa eficiência da aplicação no sulco foi diminuindo. Ainda segundo Welch et al. (1966), a aplicação do fertilizante no sulco é particularmente importante para a germinação a baixas temperaturas, para culturas que crescem mais a baixas temperaturas e para solos com baixo P disponível e alta capacidade de retenção de P. Corroborando com essas idéias, Alessi

e Power (1980) afirmaram que a alta concentração de P pode aliviar o efeito adverso das baixas temperaturas no solo.

O sistema de plantio adotado também influencia nas respostas das plantas ao local de aplicação do fertilizante. Model e Anghinoni (1992), em experimento avaliando resposta do milho a modos de aplicação de adubos e tipos de preparo de solo, demonstraram que, estatisticamente, não houve diferença no rendimento do milho entre os modos de aplicação dos adubos. Entretanto, o SPD apresentou o rendimento de grãos de milho estatisticamente diferente e superior ao SPC. No modo de aplicação a lanço, o rendimento de milho na área de SPD foi $1,10 \text{ t ha}^{-1}$ (18 %) maior, quando comparada com a resposta do milho em SPC, apesar de não apresentar diferença estatística. No modo de aplicação no sulco, essa diferença se reduziu a metade, mas o SPD ainda se mostrou superior na produtividade. A maior resposta da cultura no SPD deve-se, em parte, ao melhor aproveitamento do K e P proporcionado pelos benefícios do manejo do sistema de semeadura direta. Nesse experimento, os autores concluíram que os efeitos benéficos das aplicações mais localizadas dos adubos no crescimento do milho foram detectados apenas até o florescimento da cultura e que a diferença entre os dois sistemas foi só no rendimento de grãos, onde o SPD foi superior ao SPC.

Howard et al. (2002) também avaliando a resposta do milho aos modos de aplicação em dois sistemas de manejo, observaram que as produções foram maiores no SPC que no SPD em 5 dos 11 anos de cultivo e foram incrementadas com taxas de P acima de 39 kg ha^{-1} , enquanto que para o SPD os incrementos na produção foram obtidos com taxas acima de 20 kg ha^{-1} . O aumento da taxa de P aplicado a lanço possibilitou incremento de rendimento de milho em ambos os sistemas de manejo. Já as respostas do milho nos tratamentos com aplicação de P no sulco foram inconsistentes ao longo dos anos, nos dois sistemas e nas diferentes taxas aplicadas. Nos tratamentos em que o P foi aplicado no sulco e a lanço, independentemente do sistema de manejo, os rendimentos de milho foram similares àqueles obtidos apenas com aplicações a lanço para a mesma taxa de P. A quantidade de P extraível aumentou com o aumento da taxa de fertilizante aplicada a lanço, além de ter apresentado uma distribuição estratificada em profundidade em ambos os sistemas. Essa estratificação de P aplicado a lanço no solo em SPD também foi observada por Bordoli e Mallarino (1998), que a justificaram como resultado da não incorporação do fertilizante e dos restos culturais ao solo e da ciclagem dos nutrientes das camadas mais profundas para a superfície do solo por meio do nutriente absorvido pelas raízes.

Segundo Sousa e Lobato (2004), em áreas com SPD, após os primeiros anos de aplicação de calcário na superfície do solo, deve-se evitar a adubação fosfatada a lanço, em especial em áreas com algum potencial de resposta a P. A produtividade das culturas pode ser prejudicada, pois o $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$ na superfície do solo pode atingir valores próximos a 7, o que pode reduzir a disponibilidade de fontes solúveis de P ou retardar a dissolução de fosfatos naturais reativos. Entretanto, estudos de Sousa e Volkweiss, (1987c) indicam que o uso do SPD pode proporcionar efeito residual do ST granulado diferenciado quando comparado ao SPC em que são feitas lavrações e gradagens no solo, se fatores como facilidade de penetração de raízes e outros não forem limitantes.

Um aspecto importante que determina a magnitude do efeito dos modos de aplicação do adubo fosfatado e a sua interação com os sistemas de preparo do solo na dinâmica do P, é o espaçamento entre linhas de semeadura, pois determina o volume de solo fertilizado (Costa, 2008). Para uma mesma dose de adubo aplicada no sulco de semeadura, quanto menor o espaçamento entre linhas, maior seria o volume de solo fertilizado, e vice-versa.

Sousa e Lobato (2002), em suas recomendações para o cerrado, afirmam que a aplicação de fertilizantes fosfatados a lanço deve ser utilizada para doses superiores a 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 . No caso de doses inferiores a estas, serem aplicadas em culturas anuais, recomenda-se à localização em sulcos, o que possibilitará melhor uso do P do fertilizante solúvel em água pelas plantas, além da praticidade da operação conjunta com a semeadura. Corroborando com essa idéia, Anghinoni (1992) em experimento realizado com a cultura do milho a campo para avaliar o aproveitamento de P (doses de 0 a 320 kg ha^{-1} de P_2O_5) por esta cultura, de acordo com a fração do solo (de 6,25% a 100% do volume da camada arável) fertilizada com fosfato solúvel, verificou que, para pequenas doses de adubação, a maior eficiência no aproveitamento do P pelo milho ocorreu quando da mistura do fertilizante com pequenas frações de solo (aplicação localizada). À medida que as doses aumentaram, aplicações que submetiam o P a um maior contato com o solo também passaram a ser mais eficientes. Já para doses elevadas, a forma de localização do fertilizante passou a não ser importante.

A alta capacidade dos solos de reterem P, associada ao alto custo dos adubos fosfatados, levou ao desenvolvimento de métodos de localização dos mesmos no solo, visando maior eficiência de utilização pelas plantas (Sousa e Lobato, 1988). A aplicação de fertilizantes fosfatados de forma localizada apresenta como vantagens permitir a aplicação de doses menores do que a aplicação a lanço, para alcançar os mesmos níveis de produção em

solos de baixa fertilidade; diminuir a retenção de P (Sleight et al., 1984; Lopes, 1998); e colocar o P em posição disponível para o sistema radicular ainda reduzido das plântulas em início de desenvolvimento (Welch et al. 1966; Sleight et al., 1984). Já a aplicação de fertilizantes a lanço, em pré-semeadura, também permite uma série de vantagens, como doses maiores poderem ser aplicadas sem o risco de ocorrer injúrias às plantas (Welch et al. 1966); possibilidade de aplicação de fertilizantes à taxa variável, utilizando a tecnologia de Agricultura de Precisão e, com isso, poder-se buscar uma redução na desuniformidade dos teores de P existentes dentro de um mesmo talhão; possibilidade de aplicação de doses maiores de P visando principalmente à correção de P (fosfatagem) em áreas onde a disponibilidade desse elemento é baixa; poder ser feita em épocas que não sejam de muito trabalho (Lopes, 1998); proporcionar um maior volume de solo com boas condições para as raízes se nutrirem e desenvolverem, o que resulta em maior quantidade de P absorvido, como também em maior extração de água e outros nutrientes pelas plantas (Sousa e Lobato, 1988).

A grande parte dos fertilizantes fosfatados solúveis é comercializada na forma de grânulos. A granulação, além de facilitar sua aplicação na lavoura, limita a quantidade de solo que entra em contato com o fertilizante, diminuindo a retenção de P no solo, sendo então uma forma de localizá-lo mesmo em aplicações feitas a lanço (Sousa et al., 2004; Sousa e Volkweiss, 1987c).

A aplicação do fertilizante na forma de grânulos pode ser comparada ao modo de aplicação no sulco, uma vez que também restringe o contato do fertilizante com o solo. Já a aplicação do fertilizante em pó pode ser comparada ao modo de aplicação a lanço, pois aumenta a superfície de contato com o solo (Sousa, 1980).

A afirmação acima pode ser comprovada por Sousa e Volkweiss (1987a) em experimento onde estimaram o volume de solo com o qual o fertilizante fosfatado reage de acordo com o tamanho do grânulo do fertilizante. Nesse trabalho, verificaram que, para a dose de 87 kg ha^{-1} de P (200 kg ha^{-1} de P_2O_5) aplicada a lanço, 121 dias depois de incorporada, o volume de camada arável do solo ocupado com P foi de 25%, 15% e 9,5%, para grânulos de 2, 4 e 6 mm, respectivamente. Portanto, para determinada dose, quanto maior o diâmetro do grânulo, menor o volume do solo ocupado pelo fertilizante.

O P absorvido por unidade de área de raiz do milho aumenta com a granulação devido ao aumento da concentração de P na solução do solo na região ao redor dos grânulos, que favorece o movimento de P por difusão para a superfície das raízes (Sousa e Volkweiss, 1987b). Esse mesmo resultado foi observado para a aplicação de fertilizante fosfatado no sulco de semeadura (Welch et al. 1966; Alessi e Power, 1980; Yost et al., 1979).

A partir do exposto, nota-se a dificuldade de recomendar o melhor modo de aplicação de adubos fosfatados, uma vez que não existe um único método que se adéque as diversas situações. A recomendação de um melhor manejo da adubação fosfatada se torna mais difícil quando se considera o cultivo do solo por longo tempo em plantio direto (Costa, 2008).

2.3. Fontes de P

A escolha da fonte de P normalmente se baseia tanto na sua eficiência em suprir as plantas como no custo por unidade de P_2O_5 (Goedert et al., 1986). As principais fontes de P utilizadas hoje na agricultura são obtidas industrialmente pelo tratamento de rochas fosfáticas com ácidos e apresentam alta solubilidade em água, como os superfosfatos e os fosfatos de amônia. Praticamente toda a adubação fosfatada aplicada no sulco de semeadura é realizada com fontes solúveis em água.

Os superfosfatos simples (SS) e triplo (ST) (ambos fosfatos monocálcicos), os fosfatos monoamônicos (MAP) e diamônico (DAP) e alguns fertilizantes complexos (N, P e K no mesmo grânulo) são fontes solúveis de P, utilizados principalmente na forma de grãos, com finalidade de diminuir o volume de solo com qual reagem, reduzindo o processo de retenção do P, além de facilitar o manuseio e a aplicação. São produtos de reconhecida e elevada eficiência agronômica, para quaisquer condições de solo e de cultura no Cerrado, correspondendo a mais de 90% de P_2O_5 utilizado na agricultura brasileira (Sousa et al., 2004; Sousa e Volkweiss, 1987c).

A eficiência agronômica dos fosfatos solúveis é influenciada por propriedades do próprio fertilizante, propriedades do solo, pelas práticas de manejo e pela cultura. A composição química, solubilidade e granulometria do fertilizante podem determinar sua capacidade de eliminar ou minimizar outros efeitos limitantes à resposta ao P aplicado. O pH, capacidade de retenção do P e o teor de matéria orgânica do solo influenciam na quantidade de P que será potencialmente disponibilizado pelo fertilizante para as plantas. Dentro de práticas de manejo, a forma de aplicação também tem ligação direta com a eficiência do fosfato solúvel. Normalmente, recomenda-se a aplicação no sulco para culturas anuais em adubações de manutenção, entretanto, para aplicação de doses elevadas recomenda-se a aplicação a lanço para uma maior eficiência do fertilizante. As culturas influenciam apenas por causa de suas diferentes capacidades de extrair o P do solo (Prochnow et al., 2004).

A utilização de fontes alternativas mais baratas, como os fosfatos naturais reativos (FNR) na forma farelada vêm aumentando, embora estes produtos apresentem baixa solubilidade em água, quando comparados aos fosfatos solúveis (Horowitz & Meurer, 2004). Esses FNR não sofrem moagem e apresentam, conseqüentemente, granulometrias grosseiras, com a maior parte das partículas entre 0,15 mm e 0,5 mm (Sousa et al., 1999a). A aplicação dessas fontes de custo mais baixo vem obtendo um grande sucesso em pastagens e tem sido também eficiente em culturas anuais, apresentando resultados equivalentes ao do ST. Além disso, alguns FNR de maior reatividade, como o Gafsa e Norte Carolina, têm-se mostrado tão ou mais eficientes para suprir P para plantas de ciclo curto quanto as formas mais solúveis, como os superfosfatos (Novais et al., 2007). Nos últimos anos, houve aumento da utilização dos FNR na adubação principalmente de solos cultivados sob SPD (Schlindwein e Gianello, 2008).

A baixa reatividade de fosfatos naturais brasileiros, em relação aos de melhor qualidade (FNR), faz com que, comparados ao ST, tenham comportamento insatisfatório como fonte de P para as culturas anuais, embora melhor para cultivos de longa duração. Segundo Sousa e Lobato (1988), em culturas perenes como a *Brachiaria humidicola*, os fosfatos naturais têm mostrado bons resultados, sendo comparáveis à fonte solúvel de P, 4 anos após a sua aplicação ao solo, o que pode ser atribuído, de acordo com Goedert et al. (1991), à menor exigência em P da pastagem estabelecida, maior espaço de tempo favorecendo a solubilização destes materiais no solo e a acidificação do solo decorrente de processos naturais e/ou de elevadas aplicações de nitrogênio amoniacal. Um estudo desses mesmos autores ainda indicou a necessidade de utilizar maior quantidade de P₂O₅ total quando se aplicam fosfatos naturais no solo do que quando se utilizam fontes solúveis, provavelmente para compensar a baixa reatividade, dependendo muito também do sistema de produção utilizado.

Para os fosfatos menos reativos, insolúveis em água, é necessário o suprimento de acidez para que alguma dissolução se inicie, podendo ser pela adição de ácido sulfúrico ou ácido fosfórico, formando, respectivamente, o SS e o ST. O suprimento pode, também, ocorrer ao se aplicar o fosfato natural em solos mais ácidos, ou pode ser fornecido pela própria planta e microorganismos rizosféricos (Novais et al., 2007). Em solos da região dos Cerrados, valores de pH em água até 6, ou seja, saturação por bases do solo de até 50%, não comprometem significativamente a eficiência dos FNR (Sousa et al., 1999a). Num estudo desenvolvido por Chien e Menon (1995), os ácidos orgânicos secretados por espécies de *Rhizobium* e *Bradyrhizobium*, usadas na inoculação de sementes de leguminosas, foram os

principais fatores influenciadores da dissolução do fosfato de Mussorie, por meio da complexação do cálcio proveniente da rocha fosfática, enquanto o pH teve menor importância.

Goedert et al. (1991), em condições de campo, durante quatro cultivos consecutivos de soja, avaliaram as eficiências relativas de diversos fosfatos naturais brasileiros inclusive parcialmente acidulados, tomando como referência uma curva de resposta do ST. Os dados de eficiência agrônômica dos fosfatos naturais brasileiros foram bastante baixos e a solubilidade e a eficiência agrônômica dos fosfatos parcialmente solubilizados foram diretamente proporcionais à taxa de acidulação. Entretanto, a acidulação parcial não foi agronomicamente vantajosa, considerando que apenas a fração de P_2O_5 solubilizada foi aproveitada pela planta, não havendo aumento de eficiência desses produtos com o tempo. Já em outro estudo dos mesmos autores, uma outra fonte alternativa de P, o fosfato de uréia, apresentou, na média de quatro cultivos de milho, uma eficiência relativa de 121%, superior, portanto, ao ST.

Sobre os fosfatos naturais brasileiros, por possuírem baixa eficiência agrônômica, Goedert et al. (1986) definiram que sua aplicação *in natura* somente seria válida em condições específicas, como em aplicações a lanço, de forma moída e misturada ao maior volume possível de solo, favorecendo o máximo contato com as partículas do solo, em utilização preferencial para pastagens e culturas perenes e em solos com maior acidez, desde que o calcário fosse aplicado para suprir o cálcio e o magnésio.

Segundo Sousa et al. (1999a), além da reatividade, estimada por meio da solubilidade em extratores, a eficiência agrônômica dos FNR é afetada pela sua granulometria, tendo a eficiência aumentada com a moagem até cerca de 0,15 mm; propriedades do solo, onde a dissolução do FNR aplicado é afetada pelo pH, concentrações de Ca e P, capacidade de retenção de P e CTC; espécie vegetal, onde a eficiência do FNR vai variar entre cultura anual, cultura perene e pastagem; e modo de aplicação do fertilizante e sistema de preparo do solo adotado, que determinam a grandeza do contato do fertilizante com o solo, influenciando, conseqüentemente, na taxa de reação entre eles.

Sousa et al. (1999b), num estudo sobre o índice de eficiência agrônômica (IEA) do fosfato natural reativo de Gafsa (FRG - 28,2% de P_2O_5 total), em diferentes doses, em um latossolo argiloso do cerrado, em um período de quatro anos com a cultura da soja (cv. Savana), tendo o ST granulado como fonte referência, aplicações feitas a lanço no primeiro cultivo e em SPC, encontraram efeito significativo de fonte e dose ($P < 0,05$) em todos os cultivos. O FRG teve rendimento de grãos inferior no primeiro cultivo, com IEA de 59%.

Encontraram também a interação ($P < 0,05$) entre fonte e dose no primeiro cultivo, sendo que a resposta menor foi ao FRG nas doses mais elevadas, indicando dissolução mais lenta dessa fonte quando em altas doses. Isso sugere que não é possível aplicar uma dose maior do fertilizante para compensar a menor eficiência obtida por ocasião do primeiro cultivo. Nos três cultivos seguintes, devido o efeito residual superior do FRG, os IEAs ultrapassaram 100%. Considerando os rendimentos totais de grãos, as duas fontes apresentaram resultados semelhantes. Os autores constataram também que até a dose de 240 kg ha^{-1} de P_2O_5 , todo o FRG já havia dissolvido após o terceiro cultivo. Concluíram então que essa menor eficiência inicial e maior efeito residual do FRG devem ser considerados no seu uso, assim como o sistema de cultivo adotado.

Com relação aos modos de aplicação dentro SPC, há uma baixa eficiência inicial dos FNR em relação ao ST quando aplicados no sulco de semeadura em relação à aplicação a lanço, principalmente em áreas com teores muito baixos de P. Isso pode ser explicado pela maior concentração do FNR por volume de solo obtida com a aplicação no sulco, o que leva a uma dissolução mais lenta. Essa eficiência é aumentada nos cultivos subsequentes, o que pode ser atribuído ao preparo do solo antes de cada cultivo no SPC, que acaba misturando o fertilizante aplicado no cultivo anterior a um volume maior de solo. Entretanto, Sousa et al. (1999a) mostrou em seu estudo que sem o preparo do solo, como no SPD, a eficiência dos FNR foi inferior nos quatro cultivos sucessivos de soja, independente se a aplicação foi feita no sulco ou a lanço em um solo com teor de P extraível muito baixo (Sousa et al., 1999a).

Motomiya et al. (2004), num estudo sobre os efeitos de métodos de aplicação e fontes de adubo fosfato no SPD na produção de grãos de soja, num Latossolo Vermelho distroférico argilo-arenoso, concluiu que as misturas de ST e FRG, quando aplicadas no sulco de semeadura, apresentam menor eficiência agrônômica, se comparadas ao ST puro. Concluiu também que o FRG, quando aplicado a lanço, equivale ao ST e que não é eficiente para a cultura da soja quando aplicado no sulco de semeadura.

A dissolução mais lenta dos FNR quando em alta concentração no solo foi explicado por Novais et al. (2007) como consequência do aumento da concentração de Ca e de P nas vizinhanças das partículas, tendendo a um equilíbrio e restringindo a dissolução do FNR. A retirada ou diminuição desses produtos da dissolução faria com que o equilíbrio fosse quebrado, aumentando a taxa de dissolução. Essa retirada do Ca e do P da região próxima às partículas do FNR ocorre, portanto, em condições de maior dreno para o Ca^{2+} e para o H_2PO_4^- , ou seja, em condições de maior CTC e, particularmente, de maiores teores de matéria orgânica, como ocorre em SPD, assim como pela maior absorção de Ca pelas plantas e a

maior difusão e lixiviação de Ca do que de P. Já em relação às plantas, estas podem ser fontes de prótons, ao acidificar sua rizosfera, como também podem ser dreno de P e de Ca, com grandezas variáveis entre genótipos.

Ainda segundo Novais et al. (2007), o tempo de contato do FNR com o solo também é um importante fator de controle de sua dissolução. Embora haja maior solubilização do FNR com o aumento do tempo de contato com o solo, os produtos formados (P não-lábil) apresentam-se mais estáveis que o original. Quanto mais reativo for o fosfato, mais prejudicial será o efeito do tempo de contato com o solo sobre sua disponibilidade de P para as plantas, dada a mais rápida formação de P não-lábil.

No caso de fontes pouco reativas, como os fosfatos naturais apatíticos de origem ígnea, a lenta solubilização ao longo do ciclo da planta faz com que haja menos P em solução para tornar-se não-lábil. Mesmo com os FNR, isso pôde ser observado por Sousa et al. (2008), que ao compararem diversos FNR, uns mais e outros menos solúveis em ácido cítrico ou ácido fórmico, com o ST, num estudo de campo, em SPC por seis anos com a cultura da soja (cv. Conquista), concluíram que em meio prazo, ou seja, em cultivos sucessivos de mais de 3 anos, o efeito residual dos FNR de menor solubilidade foi equivalente ou mesmo um pouco superior em relação ao ST e aos FNR mais solúveis. Assim, o efeito de tempo, diminui a eficiência de modo menos pronunciado para fosfatos naturais pouco reativos e FNR com menor solubilidade em ácido cítrico ou ácido fórmico do que para as fontes solúveis.

Em geral, a eficiência dos fosfatos industriais solúveis em água é maior em curto prazo, enquanto a eficiência dos FNR aumenta com o tempo decorrido da sua aplicação ao solo. As eficiências de ambas as fontes de P estão relacionadas, entre outros fatores, com o modo de aplicação e com o sistema de preparo do solo adotado. Portanto, com o aumento do uso do SPD, novas técnicas de aplicação para essas fontes necessitam ser avaliadas, já que a adoção desse sistema resulta em mudanças no ambiente edáfico (Motomiya et al., 2004).

2.4. Métodos de avaliar a disponibilidade de P no solo

Para avaliar a disponibilidade de nutrientes no solo para as plantas, faz-se a análise desse solo e, detectando alguma deficiência, pode-se estimar a quantidade a aplicar de corretivos e fertilizantes de modo racional e econômico (Schlindwein e Gianello, 2008). Para a avaliação do P disponível no solo às plantas, são geralmente utilizadas soluções extratoras, ou agentes de troca iônica, que visam a quantificação de P em solução e de formas capazes de repô-lo à solução quando da absorção das plantas (P-lábil). Entretanto, os métodos atualmente

utilizados para avaliação do P disponível extraem quantidades que muitas vezes não refletem aquela que o solo pode realmente fornecer às plantas. Como a avaliação da disponibilidade de P nos solos para as plantas é necessária para embasar as recomendações de adubação fosfatada, os resultados das adubações acabam perdendo em qualidade.

As recomendações de quantidades de adubos a aplicar dependem, em grande parte, da qualidade da diagnose do grau de deficiência de determinado elemento no solo, proporcionada pelo método de análise (Silva e Raij, 1999), pois essas recomendações baseiam-se na relação existente entre os teores de nutrientes no solo e o rendimento das culturas, assim como na relação entre doses de P aplicadas e o rendimento em solo com diferentes teores de P. Por meio de experimentos de campo, com diversas culturas, são estabelecidas as respectivas doses de maior retorno econômico (Sousa et al., 2004). Portanto, uma das condições para que os resultados da análise de solo e sua interpretação sejam válidos é que existam correlações entre os valores obtidos por um determinado método de extração e a resposta de culturas à adubação ou calagem em condições de campo (Freire et al., 2002).

Segundo Novais e Smyth, (1999), as extrações de P disponível fornecem valores que variam entre intensidade (P em solução) e quantidade (P adsorvido), até mesmo partes do P não-lábil, dependendo das propriedades do extrator e das condições de extração, sem informar sobre o fator capacidade. Esse fator, definido pela razão de equilíbrio entre a quantidade de P retido na fase sólida e o P em solução, é conhecido como poder-tampão de fosfato, que é uma medida da capacidade do solo em manter um nível determinado de P na solução, levando em conta o fato de as plantas absorverem apenas o P que se encontra na solução do solo (Silva e Raij, 1999; Raij, 2004).

Na verdade, a quantidade extraída vem quase toda do P adsorvido uma vez que o P em solução é, em condições normais, extremamente baixo. Portanto, apesar de o P-disponível, em diferentes extratores, ser considerado medida de quantidade, o P extraído é, na verdade, apenas uma fração desse fator, podendo essa fração variar de um solo para o outro (Novais et al., 2007).

Existe uma variedade muito grande de métodos de extração de P, classificados segundo seus modos de ação. Existem os de dissolução ácida, os de troca iônica, os de complexação de cátions e os de hidrólise de cátions (Gatiboni, 2003, Raij, 2004), mas nenhum deles é satisfatório para um grande número de diferentes tipos de solos.

Os extratores de dissolução ácida extraem mais P ligado a cálcio (Ca) no solo e apenas pequena proporção ligado a alumínio (Al) e ferro (Fe). Contudo, em solos ácidos e ricos em caulinita e óxidos de Fe e Al, como é o caso da maioria dos solos brasileiros, os

produtos de reação do P no solo são fosfatos de Fe e Al. Dessa maneira, segundo Raij (2004), os extratores ácidos não deveriam ser a melhor opção para extrair esse nutriente de tais solos. Na prática essa afirmação se confirma, sendo comum a obtenção de resultados excessivamente baixos de P em certos solos argilosos que vêm sendo adubados e nos quais as culturas produzem bem e pouco respondem à adubação fosfatada. O nível crítico de P medido pelo Mehlich I é influenciado pelo teor de argila do solo, sendo muito baixo em solos argilosos (Lins, 1987).

No Brasil, o extrator Mehlich I, de dissolução ácida, é utilizado praticamente em todos os laboratórios de rotina do país, exceto nos laboratórios do Estado de São Paulo, que utiliza o método da resina trocadora de íons, extrator de troca iônica.

O extrator Mehlich I, composto por H_2SO_4 0,025N e HCl 0,05 N (duplo ácido) em contato com o solo analisado, provoca a dissolução ácida dos compostos fosfatados de baixa energia, pela alta concentração de H^+ , tendo maior efeito sobre os fosfatos de Ca, seguido dos ligados ao Al e, por último, dos ligados a Fe. Provoca também um efeito secundário de troca iônica, onde o íon sulfato (SO_4^{2-}) do extrator ocupa o lugar dos fosfatos adsorvidos nas superfícies dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Lins, 1987; Gatiboni, 2003).

O método Mehlich I de extração de P tem como grande vantagem a extrema simplicidade de extração. Contudo, essa vantagem é apenas para o laboratório e para a determinação considerada de forma isolada, pois a eficiência de extração do P por esse método sofre grande influência da capacidade tampão de fosfatos do solo. Por isso, na interpretação da disponibilidade de P, são usadas características que estão relacionadas com a capacidade tampão, como o teor de argila ou o valor do P remanescente (Freire et al., 2002). Outra desvantagem é a extração preferencial de compostos de Ca, que levam a valores de P extraível superestimados em solos que possuem os fosfatos de Ca como mineral primário, em solos com pH mais elevado, ou em solos que receberam adubação com fosfatos naturais (Novais e Smyth, 1999; Gatiboni, 2003, Sousa et al., 1999a, Schlindwein e Gianello, 2008).

Para solos ácidos, onde o P adsorvido à parte sólida do solo, em equilíbrio com o P da solução, encontra-se ligado principalmente aos óxidos de Fe e Al e às argilas, o método Mehlich I é bastante apropriado (Galvão, 1976). Entretanto, devido à ação do pH ácido (entre 2 e 3) do extrator, pode ocorrer a readsorção do P extraído, subestimando-o (Galvão, 1976; Rein, 1991), efeito que varia de um solo para outro e que vem a dificultar a avaliação mais precisa do P extraível do solo. Também, em solos argilosos, o montante de P extraído pelo Mehlich I é menor (Schlindwein e Gianello, 2008), pois com o aumento do teor de argila a acidez é mais tamponada, elevando o pH do extrator e fazendo sua capacidade extrativa

diminuir, devido ao consumo de íons H^+ e SO_4^{2-} do extrator pelos grupos funcionais não ocupados pelo P nos colóides inorgânicos e também pela readsorção de P aos colóides durante a extração. Assim, em solos argilosos, os valores de P encontrados são menores do que nos arenosos (Galvão, 1976; Gatiboni, 2003; Novais et al. 2007; Sousa e Lobato, 2004; Sousa et al., 1987d).

O problema dos extratores ácidos, como Mehlich I, dissolverem resíduos de fosfatos naturais aplicados ao solo tornou-se mais importante recentemente pela aplicação dos chamados fosfatos naturais reativos (FNR) na superfície do solo no SPD e para culturas perenes. Nessas condições, o fosfato aplicado na superfície do solo, onde em geral o pH apresenta-se elevado pela aplicação de calcário também na superfície, encontra condições precárias de dissolução. Dessa forma, as amostras de solo encaminhadas ao laboratório podem conter partículas de fosfato natural que, no processo de análise do solo, serão dissolvidas pelo extrator Mehlich-1, fornecendo resultados altos, mesmo em condições de deficiência de P no solo (Raij, 2004).

A interferência de maiores teores de P-Ca no solo, superestimando, por alguns extratores ácidos, o que realmente há de absorvível pela planta, não foi, ainda, adequadamente quantificada. Teoricamente, a utilização da Resina de Troca Aniônica (RTA) na determinação de P extraível de um solo corrige ou minimiza os problemas de subestimar ou superestimar o disponível (Novais et al., 2007, Sousa et al., 1999a). No entanto, o método é considerado pouco adequado para análise de rotina, principalmente pelo longo período de agitação do solo com resina em suspensão aquosa, em geral de 16 horas, e pela etapa laboriosa de separação da resina do solo após a agitação (Galvão, 1976; Silva e Raij, 1999).

A resina é um material sintético, orgânico, poroso, constituído de esferas sólidas de diâmetro médio de 1 mm ou menos e com estrutura matricial tridimensional. Existem resinas que são trocadoras de ânions e outras que são trocadoras de cátions. No primeiro caso, a resina é tipo base forte, contendo grupos químicos com cargas positivas em sua estrutura, enquanto que a resina trocadora de cátions é do tipo ácido forte, contendo grupos químicos com cargas negativas. Normalmente, são utilizadas juntas nas análises de solo (Resina Trocadora de Íons), pois dariam assim uma visão mais realística do que ocorre no sistema solo-planta, uma vez que as plantas absorvem cátions e ânions do solo (Lins, 1987).

Por sua natureza química, a RTA encontra-se dissociada em qualquer valor de pH e são suas cargas positivas as responsáveis pela adsorção dos ânions $H_2PO_4^{-1}$ da solução aquosa em contato com o solo durante a agitação do conjunto solo, resina e água por 16 horas

(Silva e Raij, 1999; Raij, 2004). Depois da agitação, há a separação da resina do solo com o uso de peneiras, a extração do P da resina e a determinação analítica.

O método da resina apresenta boa fundamentação teórica, pois o processo de adsorção de P pela resina é muito similar ao processo de absorção de P do solo pela planta. A resina tem uma função semelhante à da raiz de uma planta que, ao absorver o P da solução, baixando ai sua concentração, rompe o equilíbrio existente entre o P da solução e o P da fase sólida do solo, promovendo a dissolução ou a dessorção de fosfato da fase sólida, cuja taxa depende da capacidade tampão do solo. Os sítios de adsorção de P no solo são ocupados pelo OH, silicatos ou algum outro ânion específico disponível na solução. Enquanto o dreno de P no solo é a raiz, o dreno na análise do solo é a resina, e em nenhum momento da transferência de P do solo para a resina são usados reagentes químicos, somente água destilada (Raij, 2004; Lins, 1987). Por outro lado, a aquisição de P de forma P-Ca, não em equilíbrio com o P-solução, por raízes de plantas que solubilizam essa forma de P pode fazer com que a RTA subestime o P absorvido por essas plantas (Novais et al., 2007).

As principais vantagens do método da resina são a extração contínua, em meio aquoso, de forma similar ao que ocorre no sistema solo-planta; não é utilizado nenhum reagente químico que poderia dissolver fosfatos não disponíveis para a planta; o pH da suspensão solo-resina é um pouco menor que 7, coincidindo com a faixa de maior disponibilidade dos fosfatos do solo; a presença de bicarbonato mantém o tamponamento da suspensão, favorecendo a reprodutibilidade de resultados e tornando-os menos influenciados por mudanças nas relações entre quantidades de solo, resina ou água; e a presença de resina catiônica retira os cátions de maior valência da solução e reduz a força iônica do meio, o que favorece a dissolução do fosfato lábil. Assim, a RTA tem propriedades que permitem a avaliação apenas do P-lábil (Raij, 2004), o que é considerado, por Rein (1991), uma limitação do método, por considerar apenas o fator lábil da disponibilidade de P.

Silva e Raij (1999), em uma revisão da literatura sobre extratores de P, através de correlações lineares e contraste de médias (teste t), chegaram à conclusão de que o método da resina foi estatisticamente superior aos demais, pois era o que apresentava valores de coeficientes de determinação, para a correlação entre P absorvido por plantas e P no solo, consistentemente superiores aos dos demais métodos na maior parte dos 72 trabalhos revisados, além de ser o que mais se adaptava a diferentes tipos de solos. O método Mehlich1 veio em terceiro e Bray 1 em seguida, apresentando valores de coeficientes de determinação ainda mais baixos. (Raij, 2004).

Ainda na revisão feita por Silva e Raij (1999) viu-se que o método da resina pode ser usado tanto em solos ácidos como alcalinos, o que não é o caso para outros extratores importantes; que ele pode revelar, adequadamente, o efeito da calagem no aumento da disponibilidade de P para as plantas, o que não acontece com os métodos Mehlich I, Bray 1 e Olsen; que ele não superestima, como os extratores ácidos, a disponibilidade de P em solos tratados com fosfatos naturais; e é o que apresenta o melhor embasamento teórico para a determinação do chamado fator quantidade de P em solos, que é o mais importante índice da disponibilidade do nutriente.

A eficiência de extração de P feita pela resina pode sofrer influência do pH, pois quando usada em suspensões com valores de pH mais baixos, torna-se ineficaz para extrair o P do solo, mesmo com 16 horas de agitação. Já em valores mais elevados de pH e com ação do íon bicarbonato, a extração de P é mais elevada. Este é um detalhe do método de extração de P com resina que deve ser considerado e está relacionado com o aumento da solubilidade de fosfatos de Fe e Al em valores mais elevados de pH (Raij,2004).

O poder tampão e o conteúdo de água no solo, quando incluídos em equações de regressão múltipla com os valores de P extraído pelos métodos Mehlich I, Bray 1 e Olsen, por Galvão (1976), não aumentaram a capacidade destes em avaliar a disponibilidade de P para as plantas, em trabalho conduzido em casa de vegetação. Lins (1987), em ensaios de campo, chegou a resultados que indicaram que os métodos Mehlich I e 3 e Bray 1 eram mais sensíveis ao poder tampão do solo que o método da resina, mas que também em nenhum deles a inclusão de propriedades do solo que estimassem o poder tampão melhorou a capacidade de avaliar o P disponível. Entretanto, Rein (1991) afirmou que a interpretação dos valores de P nos solos associados a um índice do seu poder tampão ou do teor de argila melhora significativamente a capacidade preditiva do método de resina.

Santos e Kliemann (2005), num estudo feito em casa de vegetação, com solos de cinco municípios da região do Cerrado, concluíram que os extratores Mehlich I, Mehlich 3 e resina extraem quantidades equivalentes de P disponível no solo, quando este elemento é aplicado na forma de ST. No entanto, uma constatação de que o método de resina pode ser melhor que outros métodos de avaliação de P no solo em determinadas situações foi feita por Raij (2004) quando, comparando os resultados para superfosfato aplicado no plantio com o adubo aplicado com antecedência, constatou que a resina detectou a tendência de queda na disponibilidade de P com o aumento de tempo de incubação e a queda na absorção de P, resultados não detectados pelos extratores Mehlich I e Bray 1. Esse mesmo autor, em experimento em casa de vegetação com rocha fosfática Alvorada como fonte de P, viu que os

métodos de resina e Bray 1 foram capazes de detectar a tendência de baixa absorção de P devido a baixa eficiência agrônômica da fonte, enquanto que o extrator Mehlich I superestimou o valor de P disponível no solo.

O caráter menos ácido do Bray 1 e, de modo particular, a ausência de SO_4^{2-} como ânion de troca mais efetiva com o fosfato, comparativamente ao cloreto, em relação ao Mehlich-1, faz com que a indesejável extração preferencial de P-Ca não ocorra com esse extrator (Novais et al., 2007). Assim, esse extrator seria o mais indicado em casos de solos menos intemperizados (pH elevado) ou com aplicações de fosfatos naturais com pequena reatividade.

O extrator Bray 1, formado por solução ácida com íon complexante, é a mistura de HCl e NH_4F , com concentrações finais de 0,025 N e 0,03 N, respectivamente. O íon fluoreto (F^-) forma um forte complexo com íons Al^{3+} , liberando, assim, o P ligado ao metal (Raij, 2004; Lins, 1987). O P presente no solo como fosfato de cálcio, também é extraído, com a precipitação de fluoreto de cálcio. Tal extrator tem sua ação, na extração de P, baseada na presença do íon fluoreto e na acidez da solução (Silva e Raij, 1999).

Uma limitação do extrator Bray 1 está na presença de CaCO_3 em grandes quantidades no solo, levando a formação de CaF_2 , que em alta concentração readsorve o P extraído, dando um valor subestimado da disponibilidade de P (Galvão, 1976). É o que pode acontecer em análises de solo com SPD, onde a calagem é feita em superfície, sem incorporação, ficando muito CaCO_3 no solo. Outra limitação, citada por Lins (1987), é que a capacidade de extração de P do extrator Bray 1 diminui substancialmente com o aumento do teor de argila do solo acima de 20 %, devido a exaustão do extrator pela sua reação com a própria argila.

O método de Bray 1 tem, em alguns casos, apresentado coeficientes de correlação mais elevados em solos ácidos do que o método de Mehlich I. Em solos ácidos e argilosos, a capacidade de extração de P diminui com o aumento do conteúdo de argila, devido a reação do extrator ou, mais provavelmente, do próprio P extraído com outros minerais do solo (Galvão 1976).

Saber a diferença entre o que é e o que não é extraído em cada método de extração em cada situação pode ser uma fonte de informação importante. Essa estratégia foi usada no experimento desenvolvido por Sousa et al., (1999b), que através das análises de P no solo pelos métodos Mehlich I, que dissolve P apatítico, e Bray 1, que não dissolve P apatítico, viram que a dissolução completa do fosfato natural de Gafsa ocorreu após o terceiro cultivo, até a dose de 240 kg ha^{-1} de P_2O_5 , pois na dose de 480 kg ha^{-1} de P_2O_5 , parte do fosfato não

havia dissolvido, fato constatado pelo valor de teor de P no solo ter sido maior pelo método Mehlich I que pelo Bray 1.

Não importa se entre os diversos métodos utilizados, como os de Mehlich I, Bray 1 e Resina, as quantidades de P extraídas não sejam as mesmas, como de fato acontece. Os valores do P disponíveis considerados níveis críticos (NCs) serão também variáveis entre esses métodos. Torna-se evidente a necessidade de saber qual o extrator utilizado em uma análise de solo para interpretar o valor do P disponível encontrado e qual o NC para esse extrator (Novais et al., 2007).

Assim, o planejamento do uso e manejo da terra, associado à adoção de sistemas conservacionistas como o SPD e a adoção de práticas que visem aumentar a eficiência de uso insumos são essenciais à manutenção do frágil equilíbrio entre a necessidade de produção de alimentos e a preservação ambiental (Bernardi et al., 2003).

3. OBJETIVOS E HIPÓTESES

3.1. Objetivo Geral

Analisar a distribuição do fósforo extraível do solo sob sistema plantio direto, em experimento conduzido pelo período de oito anos com as culturas de soja e milho, localizado na Embrapa Cerrados, em Planaltina-DF.

3.2. Objetivos Específicos

1. Comparar o efeito de dois modos de aplicação de fertilizantes fosfatados ao solo (lanço na superfície do solo x sulco de semeadura);
2. Comparar o efeito de duas fontes de fósforo (superfosfato triplo x fosfato natural reativo);
3. Avaliar a possível interação, entre o modo de aplicação do adubo fosfatado e a fonte de fósforo, na distribuição de fósforo extraível no perfil de solo sob plantio direto.
4. Comparar três procedimentos analíticos para avaliar a disponibilidade de fósforo no solo (Bray 1 x Mehlich I x Resina).

3.3. Hipóteses

1. Ocorre a redistribuição do fósforo aplicado via fertilizantes no solo sob sistema de plantio direto por longo período, mesmo os íons fosfato tendo baixa mobilidade no solo;

2. O padrão de distribuição de fósforo no solo é, em longo prazo, independente do modo de aplicação do fertilizante fosfatado ao solo (a lanco na superfície do solo ou no sulco de semeadura); e

3. Os efeitos de diferentes fontes de fósforo (superfosfato triplo ou fosfato natural reativo) na sua distribuição no perfil do solo sob sistema plantio direto são semelhantes.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALESSI, J.; POWER, J. F. Effects of banded and residual fertilizer phosphorus on dryland spring wheat yield in the Northern Plains. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 792-796, 1980.

ANGHINONI, I. A method for predicting the most efficient phosphate placement for corn using a simulation model. 1979. 170 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Purdue University, 1979.

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, n. 3, p. 349-353, 1992.

BERNARDI, A. C. C.; MACHADO, P. L. O. A.; FREITAS, P. L.; COELHO, M. R.; LEANDRO, W. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. P.; OLIVEIRA, R. P.; SANTOS, H. G.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. C. S. Correção do solo e adubação no sistema de plantio direto nos cerrados. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 22 p.

BORDOLI, J. M.; MALLARINO, A. P. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. **Agronomy Journal**, 90:27-33, 1998.

BRAVO, C.A.; GIRALDEZ, J.V.; ORDOÑEZ, R.; GONZALEZ, P.; TORRES, F. Perea. Long-term influence of conservation tillage on chemical properties of surface horizon and legume crops yield in a vertisol of Southern Spain. **Soil Science**. 172(2):141-148, 2007.

CERVI, E. V. A Revolução da Palha. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, nº 73, p. 8-12, 2003.

CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application **Fertilizer Research**, v.41, p.227-234, 1995.

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

COSTA, S. E. V. G. de A. Distribuição de fósforo, de potássio e de raízes e rendimento de milho em sistemas de manejo de solo e da adubação em longo prazo. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2008. 106p.

COSTA, L. M. da; OLSZEWSKI, N. Caracterização da paisagem do Cerrado. In: Savanas – Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais / editores técnicos Fábio Gelape Faleiro, Austeclínio Lopes de Faria Neto. - Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, p. 363-378, 2008.

DE MARIA, I.C.; NNABUDE, P.C. & CASTRO, O.M. de. Long-term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferralsol in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, 51(1- 2): 69-77. 1999.

DUIKER, S. W.; BEEGLE D. B. Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. **Soil and Tillage Research**, 88:30-41, 2006.

FREIRE, F. M.; PITTA, G. V. E.; ALVES, V. M. C.; FRANÇA, G. E.; COELHO, A. M. Cultivo do Milho: Interpretação de resultados de análise de solo. Comunicado Técnico n. 43, Sete Lagoas – MG, dez. 2002.

GALRÃO, E. Z. Avaliação da disponibilidade de fósforo para as plantas. Dissertação de Mestrado em Agronomia - Solos, Porto Alegre: UFRGS, 1976, 67 p.

GATIBONE, L.C. Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003. 247 p.

GOEDERT, W. J.; REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. Avaliação Agronômica de Fontes de Fósforo para a Região dos Cerrados. In: Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1985-1987. Planaltina, DF: EMBRAPA – CPAC, 1991.

GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Fósforo. In: Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo / Wenceslau J. Goedert (editor). São Paulo: Nobel; Brasília: EMBRAPA, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, p. 129-166, 1986.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência Agronômica dos Fosfatos Naturais. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S. R. e (Ed.). Fósforo na Agricultura Brasileira. Piracicaba – SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p. 665-687, 2004.

HOWARD, D. D.; ESSINGTON, M. E.; LOGAN, J. Long-term broadcast and banded phosphorus fertilization of corn produced using two tillage systems. **Agronomy Journal**, 94:51-56, 2002.

LAWTON, K.; APOSTOLAKIS, C.; COOK, R. L.; HILL, W. L. Influence of particle size, water solubility, and placement of fertilizers on the nutrient value of phosphorus in mixed fertilizers. **Soil Science**, 82:465-476, 1956.

LIMA, M. A. S. da. Águas acumuladas em açudes e barragens na região de Santa Maria e flutuações em seus atributos físico químicos. 2005. 83f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

LINS, I. D. G. Improvement of soil test interpretations for phosphorus and zinc. Ph. D. thesis. Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 1987. 317 p.

LOPES, A.S., SILVA, C. A. P. da, BASTOS, A. R. R. Reservas de fosfatos e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S. R. e (Ed.). Fósforo na Agricultura Brasileira. Piracicaba – SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p.13-34, 2004.

LOPES, A.S. Manual Internacional de Fertilidade do Solo. Piracicaba: Potafos, 1998. 177p.

MARTINAZZO, R.; KAMINSKI, J. Diagnóstico Da Fertilidade De Solos Em Áreas Sob Plantio Direto Consolidado. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, 2006. 84 p.

MODEL, N.S.; ANGHINONI, I. Resposta do milho a diferentes modos de aplicação de adubos e técnicas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Campinas, v.16, p.55-59, 1992.

MOTOMIYA, W. R.; FABRÍCIO, A. C.; MARCHETTI, M. E.; GONÇALVES, M. C.; ROBAINA, A. D.; NOVELINO, J. O. Métodos de aplicação de fosfato na soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.4, p.307-312, abr. 2004.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1999. 399 p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). Fertilidade do solo. SBCS, Viçosa, 2007. 1017 p.

PAVAN, M. A.; CHAVES, J. C. D. Alterações nas frações de fósforo no solo associadas com a densidade populacional de cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v 20, p. 251-256, 1996.

PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A. Fósforo e Potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.6, p.1779-1784, nov-dez, 2004.

PELLEGRINI, J. B. R. Fósforo na água e no sedimento na Microbacia Hidrográfica do Arroio Lino – Agudo/RS. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005. 85 p.

PROCHNOW, L. I.; ALCARDE, J. C.; CHIEN, S. H. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. e (Ed.). Fósforo na Agricultura Brasileira. Piracicaba – SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p. 605-663, 2004.

RAIJ, B. van. Métodos de Diagnose de Fósforo no Solo em Uso no Brasil. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. e (Ed.). Fósforo na Agricultura Brasileira. Piracicaba – SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p.563-587, 2004.

REIN, T. A. Estimativa do fluxo difusivo de fósforo nos solos e avaliação de sua disponibilidade. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Solos, Porto Alegre: UFRGS, 1991. 137 p.

RHEINHEIMER, D. S. Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos. Tese de Doutorado em Agronomia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. 210 p.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.1, p.151-160, jan. 2001.

RHEINHEIMER, D. S.; GONÇALVES, C. S.; PELLEGRINI, J. B. R. Impacto das atividades agropecuárias na qualidade da água. **Ciência & Ambiente**, v. 27, p. 85-96, 2003.

SÁ, J. C. M. Manejo da fertilidade do solo no plantio direto. Castro: Fundação ABC, 1993. 96p.

SÁ, J. C. D. M. Adubação fosfatada no Sistema Plantio Direto. In: YAMADA, T., ABDALLA, S. R. S. Anais do Simpósio sobre Fósforo na Agricultura Brasileira: Fósforo na Agricultura Brasileira. Piracicaba – SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p.201-222, 2004.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; LAL, R.; DICK, W. A.; VENZKE FILHO, S. P.; PICCOLO, M.; FEIGL, B. Organic matter dynamics and sequestration rates for a tillage cronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 1486-1499, 2001.

SANTOS, E. A. & KLIEMANN, H. J. Disponibilidade de fósforo de fosfatos naturais em solos de cerrado e sua avaliação por extratores químicos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 35 (3): 139-146, 2005.

SHELTON, J. E.; COLEMAN, N. T. Inorganic phosphorus fractions end their relationship to residual value of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, 32:91-94, 1968.

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**, 32:2037-2049, 2008.

SELLES, F.; KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; ZENTNER, R. P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian oxisol under different tillage systems. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v 44, p. 23-34, 1997.

SILVA, F. C.; RAIJ, B. V. Disponibilidade De Fósforo Em Solos Avaliada Por Diferentes Extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.34, n.2, p.267-288, fev. 1999.

SLEIGHT, D. M.; SANDER, D. H.; PETERSON, G. A. Effect of fertilizer phosphorus placement on the availability of phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, 48:336-340, 1984.

SOUSA, D. M. G. de. Reações de grânulos de superfosfato triplo em solos e seus efeitos imediatos e residuais sobre as culturas. 1980. 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Solos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.

SOUSA, D. M. G. de; VOLKWEISS, S. J. Reações do superfosfato triplo em grânulos com solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 11:133-140, 1987a.

SOUSA, D. M. G. de; VOLKWEISS, S. J. Rendimento de matéria seca e conteúdo de fósforo da parte aérea de milho influenciados pela adubação com superfosfato triplo em pó e em grânulos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 11:127-1132, 1987b.

SOUSA, D. M. G. de; VOLKWEISS, S. J. Efeito residual do superfosfato triplo aplicado em pó e em grânulos no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 11:141-146, 1987c.

SOUSA, D.M.G. de; MIRANDA, L.N. de; LOBATO, E. Interpretação de análise de terra e recomendação de adubos fosfatados para culturas anuais nos Cerrados. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1987d. 7 p. (EMBRAPA-CPAC. Comunicado Técnico, 51).

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. Adubação Fosfatada. In: Simpósio sobre o cerrado; savanas. Alimento e energia. 6., Brasília, DF, 1982. Planaltina, EMBRAPA – CPAC, p.33-60, 1988.

SOUSA, D. M. G. de; REIN, T. A.; LOBATO, E.; SOARES, W. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na região dos cerrados. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 27, Brasília-DF, Ciência do solo e qualidade de vida: anais. Planaltina: Embrapa Cerrados. CD-ROM. 1999a.

SOUSA, D. M. G. de; REIN, T. A.; LOBATO, E. Eficiência agronômica do fosfato natural de Gafsa em um latossolo de cerrado com a cultura da soja. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 27, Brasília-DF, Ciência do solo e qualidade de vida: anais. Planaltina: Embrapa Cerrados. CD-ROM. 1999b.

SOUSA, D. M. G. de ; LOBATO, E. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: experiência no Cerrado. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 2000, Santa Maria. Biodinâmica do solo Fertibio 2000: anais CD-ROM, 2000.

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

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). Cerrado: Correção do solo e Adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. p.147-168, 2004.

SOUSA, D. M. G de.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. In: YAMADA, T., ABDALLA, S. R. S. Anais do Simpósio sobre Fósforo na Agricultura Brasileira: Fósforo na Agricultura Brasileira. Piracicaba – SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p.157-200, 2004.

SOUSA, D. M. G. de; REIN, T. A.; LOBATO, E. Solubilidade e eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos avaliados com a cultura da soja em um latossolo de cerrado. In: IX Simpósio Nacional Cerrado e II Simpósio Internacional Savanas Tropicais. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2008.

TUCKER, M. R.; MESSICK, J. K.; YARBOROUGH, B., MCBRIDE, T. Soil Fertility Note 16: Gearing up for Conservation Tillage. February, 1995. Disponível em: www.ncagr.com/agronomi. Acesso em: 09/01/2009.

WEBB, J. R.; PESEK JR, J. T. An evaluation of phosphorus fertilizers varying in water solubility: II. Broadcast applications for corn. **Soil Science Society of America Proceedings**, 23:381-384, 1959.

WEBB, J. R.; EIK, K.; PESEK JR, J. T. An evaluation of phosphorus fertilizers applied broadcast on calcareous soils for corn. **Soil Science Society of America Proceedings**, 25:232-236, 1961.

WELCH, L. F.; MULVANEY, D. L.; BOONE, L. V.; MCKIBBEN, G. E.; PENDLETON, J. W. Relative efficiency of broadcast versus banded phosphorus for corn. **Agronomy Journal**, v. 58, p. 283-287, 1966.

YOST, R. S.; KAMPRATH, E. J.; LOBATO, E.; NADERMAN, G. Phosphorus Response of Corn on an Oxisol as Influenced by Rates and Placement. **Soil Science Society of America Journal**, v. 43, p. 338-343, 1979.

CAPÍTULO ÚNICO

DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO NO PERFIL DO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição do fósforo (P) extraível de um Latossolo sob SPD por longo período. O estudo foi realizado em área experimental da Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF, em um experimento com oito anos de cultivo com as culturas de soja e milho. Foram coletadas amostras de solo em parcelas que haviam recebido adubação fosfatada anual na dose de 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅, em dois modos de aplicação, a lanço na superfície do solo e no sulco de semeadura, e mediante duas fontes de fertilizante, superfosfato triplo (ST) e fosfato natural reativo (FNR), e um tratamento sem adubação fosfatada. A amostragem foi realizada em sete pontos distribuídos transversalmente em relação à linha de semeadura do milho e em cinco camadas de solo. Foi analisado o teor de P extraível adotando-se os extratores de Mehlich I, Bray 1 e Resina. Os resultados foram analisados estatisticamente para comparações quanto à distribuição do P no perfil do solo, com diferentes fontes de P e modos de aplicação. Observou-se a distribuição, nos sentidos vertical e horizontal, do P extraível no perfil do solo adubado anualmente, independente do modo de aplicação e das fontes de P, avaliado pelos três extratores. Essa distribuição do P extraível foi até 10 cm de profundidade dos solos adubados anualmente. Quanto ao modo de aplicação do fertilizante ao solo observou-se diferença na distribuição do P extraível, tanto no sentido vertical como no horizontal, para os três extratores. Para a aplicação a lanço na superfície do solo, a distribuição horizontal apresentou altos valores nas camadas superficiais, enquanto que no sulco de semeadura os maiores valores obtidos do P extraível foram no local de aplicação do fertilizante. Foi observado também diferença na distribuição do P extraível no perfil do solo quando da utilização do SFT ou FNR, sendo que no segundo caso as quantidades de P acumuladas nas camadas analisadas entre 0 cm e 5 cm foram superiores. Já as correlações entre os extratores Mehlich I, Bray 1 e Resina foram altamente significativas, independentemente da fonte de P utilizada. Entretanto, o método de Bray 1 foi o único dos três capaz de demonstrar coerência entre o P extraível do solo e o rendimento acumulado de grãos das culturas, quando a fonte de P foi o FNR.

Palavras Chaves: adubação fosfatada, fontes de fósforo, modos de aplicação de fósforo, extratores de fósforo do solo, Cerrado.

PHOSPHORUS DISTRIBUTION IN THE SOIL UNDER NO-TILL SYSTEM

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the distribution of extractable phosphorus (P) in a Oxisol under NT for a long period. This study was conducted in the experimental area in the Embrapa Cerrados, in Planaltina, DF, in an experiment conducted for a period of eight years with corn and soybean crops. It was collected soil samples in plots that received annually phosphate fertilization in the dose of $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$, with two ways of application, banded or broadcast, and according two sources of P, triple superphosphate (ST) or reactive phosphate rock (FNR), and in a control plot, without fertilization. Soil samples were taken from seven points distributed transversely in relation to the line of sowing maize and in five layers. Was performed in all samples of soil, the analyses of extractable P by Bray 1, Mehlich I and Resin. The results were analyzed statistically to compare the P distribution in soil, with different sources of P and application ways. There was a distribution, in vertical and horizontal directions, of extractable P in the soil fertilized annually after eight years under NT, regardless of the way of application and of P sources, measured by the three extractors. This extractable P distribution was until 10 cm depth in the soils fertilized annually. Regarding the application mode of fertilizer in the soil, it was observed difference in the distribution of extractable P, in both vertical and the horizontal direction, for the three extractors. To the broadcast application in the soil surface, the horizontal distribution showed high values in surface layers, while in banded mode the higher values of extractable P were in the area of application of fertilizer. Difference was observed in the distribution of extractable P in the soil according the use of ST or FNR, and at the second case the quantities of P evaluated between 0 cm and 5 cm were higher. The correlations between Mehlich I, Bray 1 and Resin extractors were highly significant, regardless of the P source used. However, the method of Bray 1 was the only procedure able to demonstrate the difference between the extractable P in the soil and grain yield of soybeans and corn amassed crops, when the source of P was the FNR.

Keywords: phosphate fertilization, P sources, ways of P application, P extractors of the soil, Cerrado.

1. INTRODUÇÃO

Embora se deva reconhecer o extraordinário avanço em termos de adaptação e geração de conhecimentos e tecnologias em fertilidade do solo para o sistema plantio direto (SPD), restam ainda muitos desafios a serem equacionados. Um deles é que, devido à impossibilidade de incorporação do fertilizante nos solos sob SPD, a aplicação de fertilizantes fosfatados em área total tem sido realizada em superfície. Percebe-se então, como primeira consequência deste método de aplicação, uma maior concentração de P na camada superficial do solo, devido a baixíssima mobilidade deste nutriente. Outro é a escassez de estudos de longo prazo sobre a possibilidade de redistribuição do P no solo sob SPD, principalmente do Cerrado, incluindo variações como modos de aplicação e diferentes fertilizantes fosfatados (fontes de P). Segundo Selles et al. (1997), a mudança no manejo dos resíduos culturais, devido a adoção do SPD, tem o potencial de alterar a concentração e a distribuição do P na superfície do solo.

Existe certa oposição entre as idéias de baixíssima mobilidade do P e sua distribuição no perfil de solos. Entretanto, explicações fundamentadas para o deslocamento de P aplicado superficialmente, em SPD, também podem ser encontradas, como, por exemplo, o controle da mobilidade do P inorgânico pelo tipo e conteúdo de argilominerais e sesquióxidos de Fe e Al no solo e a movimentação livre do P orgânico no solo como constituinte de células microbianas e outros colóides orgânicos. Alguns estudos ainda relatam a redistribuição de P inorgânico ao longo do perfil em condições especiais, como em solos arenosos com baixa capacidade de adsorção, com aplicações massivas de fontes solúveis de P e submetidos a intensas precipitações. Segundo Sá (2004), as raízes das culturas também serviriam como veículo de distribuição de P no perfil do solo, aumentando a disponibilidade desse nutriente em camadas mais profundas. Conclui-se então que esse deslocamento do P dependeria fundamentalmente do tipo de solo, do manejo adotado e das culturas.

O conhecimento da distribuição do P no perfil do solo é importante para ajustes ou modificações nas metodologias de diagnose da disponibilidade de P no solo e para recomendações de manejo da prática de adubação fosfatada para o SPD, especialmente no que se refere ao modo de aplicação. Os procedimentos de recomendação de adubação no Brasil foram desenvolvidos para solos sob SPC. Existem recomendações de adubação para SPD para a Região Sul do Brasil, como as de Schindwein e Gianello (2008), porém ainda são incipientes as recomendações para a região dos Cerrados.

Diante do exposto, este trabalho objetivou analisar a distribuição do P extraível de um Latossolo Vermelho do Cerrado sob SPD, em profundidade e no sentido transversal a linha de semeadura do milho, em experimento conduzido pelo período de oito anos com as culturas de soja e milho, localizado na Embrapa Cerrados, em Planaltina-DF. Essa distribuição foi analisada também em função da fonte de P usada, se ST ou FNR, e em função do modo de aplicação do adubo fosfatado, se no sulco de semeadura ou a lanço na superfície do solo. Para tal, foram utilizados três procedimentos analíticos de avaliação de disponibilidade de P no solo, Mehlich I, Bray 1 e Resina, cujos resultados finais foram correlacionados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na área experimental da Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF (latitude 15°36'S e longitude 47°42'W), altitude de 1.014m, com clima Cwa, precipitação média anual de 1.570 mm e temperatura média anual de 21,3 °C. O relevo caracteriza-se como plano e a vegetação natural é de Cerrado. Trata-se de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso, em área sob condições naturais, onde foi instalado um experimento em junho de 1999, tendo como objetivo principal a avaliação agrônômica de três fontes de P aplicadas na dose de 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato triplo granulado - STg, fosfato natural reativo - FNR e mistura na proporção 1:1 de P do superfosfato triplo microgranulado com fosfato natural reativo - STmg + FNR), em dois modos de aplicação (lanço na superfície do solo e sulco de semeadura) e em três condições iniciais de P no solo (condição natural, corrigido com FNR e com STg, na dose de 240 kg ha⁻¹ de P₂O₅ total), sendo adotado o sistema plantio direto (SPD) como sistema de cultivo.

2.1. Histórico do experimento

Cultivou-se soja (*Glycine max*) nos dois primeiros anos e nos seguintes houve a rotação entre soja e milho (*Zea mays*), começando com a soja, sendo sempre utilizado o milheto (*Pennisetum glaucum*) como cobertura de inverno. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com três repetições (três blocos) e com estrutura fatorial completa. As dimensões das parcelas experimentais foram de 11 m x 4,5 m (49,5 m² de área), com espaçamento entre linhas de 0,45 m para a soja, 0,75 m para o milho e 0,20 m para o milheto.

Antes da instalação do experimento na área, foi realizada a análise química e granulométrica do solo (Tabela 01), representados pela média de doze parcelas, tendo sido demarcadas quatro parcelas em cada um dos três blocos, e em cada parcela foi retirada uma amostra composta de 20 subamostras na camada de 0 cm a 20 cm. Com esses valores médios foi calculada a necessidade de calcário para atingir a saturação por bases de 50 % e feita a adubação corretiva de potássio (K). Também, foram avaliadas as propriedades químicas das fontes de P usadas no experimento quanto a solubilidade em relação ao P₂O₅ total em ácido cítrico e ácido fórmico. (Tabela 02).

Tabela 01. Análise química e granulométrica do solo antes da implementação do experimento, na camada de 0 cm a 20 cm.⁽¹⁾

pH_{H2O}	Al³⁺	Ca²⁺	Mg²⁺	H + Al	CTC	K_{Mehlich I}
----- cmol _c dm ⁻³ -----						
4,5	1,4	0,2	0,2	8,1	8,6	0,1
V	Argila	Silte	Areia grossa	Areia fina	P_{Mehlich I}	Matéria orgânica
----- % -----					mg dm ⁻³	g kg ⁻¹
5,6	54	5	12	29	1,2	28

⁽¹⁾ Segundo os métodos descritos em Embrapa (1997)

Por ocasião do primeiro cultivo, em junho de 1999, foram aplicados a lanço e incorporados calcário dolomítico com PNRT de 65% (para elevar a saturação por base a 50 %), micronutrientes (100 kg ha⁻¹ FTE BR-12), potássio (90 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio) e enxofre (75 kg ha⁻¹ de S na forma de gesso), segundo Sousa e Lobato (2002). Nesse mesmo mês, foi semeada a mucuna, que foi dessecada em outubro. Seguindo a distribuição dos tratamentos, o solo de algumas parcelas do experimento foi corrigido com

STg e FNR (incorporação feita com grade aradora) em novembro de 1999 e feito o primeiro cultivo de soja.

Tabela 02. Características químicas dos fertilizantes fosfatados utilizados no experimento⁽¹⁾.

Fonte de fósforo	Fósforo total P ₂ O ₅	Solubilidade em relação ao P ₂ O ₅ total	
		Ac. cítrico 2% (1:100)	Ac. fórmico 2% (1:100)
		----- % -----	
FNR ⁽²⁾	28,5	38	67
ST	43,4	92	93

⁽¹⁾ Análises efetuadas com amostras moídas (< 0,063 mm).

⁽²⁾ Procedência de Marrocos.

Os cultivos receberam irrigação suplementar por aspersão em situações de veranico, definidas a partir da leitura de 45 cbar nos tensiômetros instalados nas parcelas na profundidade de 20 cm.

As sementes de soja foram inoculadas anualmente, juntamente com aplicação de cobalto e molibdênio. Também foram efetuadas adubações anuais de manutenção a lanço com 80 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio, além de, para o milho, 30 kg ha⁻¹ de N no sulco de semeadura e duas coberturas de 60 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia, segundo Sousa e Lobato (2002).

Por ocasião do quarto cultivo (julho de 2003) até o sexto cultivo (outubro de 2005), foi aplicado anualmente 1 t ha⁻¹ de gesso (15 % S), totalizando 3 t ha⁻¹, o que é recomendado para que esse solo tenha seu perfil corrigido até 60 cm de profundidade. Antes do cultivo de 2006 foram aplicados 20 kg ha⁻¹ de S e em 2007 foram aplicados 15 kg ha⁻¹ de S, na forma de gesso (Sousa e Lobato, 2002).

Para aplicação dos fertilizantes fosfatados, foram abertos sulcos no solo utilizando-se da plantadeira de plantio direto, retirando-se os carrinhos que cobrem os sulcos. Os fertilizantes fosfatados dos tratamentos com aplicação no sulco de semeadura eram então distribuídos em cada linha com máquinas portáteis de alta precisão, cobrindo-se com um pouco de terra. Em seguida, todo o experimento era semeado manualmente (milho) ou utilizando-se semeadora de parcela. Após cobrir as sementes de toda a área com terra, distribuía-se então os fertilizantes fosfatados nos tratamentos com aplicação a lanço, processo efetuado manualmente por operários rurais treinados para essa atividade. Para o milheto, foi utilizada semeadora tratorizada de plantio direto, pois nessa etapa não se utilizavam fertilizantes.

As semeaduras foram feitas com a ajuda de máquina semeadora portáteis para a soja ou manual para o milho, com densidade para o milho de 4 sementes por metro (54.500 plantas por hectare) e para a soja de 17 a 20 sementes por metro (340.000 a 400.000 plantas por hectare), dependendo da cultivar utilizada, Raimunda ou Milena, respectivamente. Para a cultura do milho foi semeado sempre o dobro de sementes e, após a germinação, procedia-se o desbaste. A soja foi semeada sempre com uma taxa de 10 % acima da densidade pretendida e não se realizava o desbaste. Para o milheto, foi utilizada a plantadeira de plantio direto, pois nessa etapa não foram aplicados fertilizantes.

Em junho de 2006 foi reaplicado calcário para atingir saturação por bases no solo de 50 %. A dose utilizada foi de 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico com PRNT de 90%, distribuído a lanço na superfície do solo.

A colheita era realizada quando a soja e o milho, respectivamente, chegavam aos estágios R8 e R6 e o teor de umidade dos grãos estava próximo de 13 %.

Para avaliar o rendimento de grãos anualmente, na soja era feita a colheita das 6 linhas centrais de 7 m de comprimento (18,90 m²) e no milho das 4 linhas centrais de 7 m de comprimento (21 m²), descartando as bordas das parcelas. A umidade dos grãos de cada parcela era medida (medidor portátil de umidade de grãos MULTI-GRAIN, da DICKEY-john), os grãos eram então pesados e o peso corrigido para a umidade de 13%, expressos em toneladas por hectare (t ha⁻¹).

2.2. Seleção dos tratamentos e amostragem do solo

Para a realização deste trabalho foram selecionadas cinco parcelas experimentais (Tabela 03), todas no oitavo ano de cultivo, com três repetições de cada, as quais alocavam aleatoriamente os tratamentos fósforo natural reativo aplicado no sulco de semeadura, fósforo natural reativo aplicado a lanço, superfósforo triplo aplicado no sulco de semeadura, superfósforo triplo aplicado a lanço, todos na dose de 80 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅, e testemunha, sem adubação fosfatada. Todas as parcelas selecionadas foram sob condição natural de P no solo, ou seja, não receberam adubação fosfatada corretiva antes do primeiro cultivo.

As amostras de solo foram retiradas com trado, após a colheita do milho, no oitavo ano de cultivo (junho de 2007), de sete pontos distribuídos transversalmente em relação à linha de semeadura do milho, distantes 12,5 cm um do outro, e em cinco camadas: 0-2,5 cm, 2,5-5,0 cm, 5,0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm (Figura 01). Foram feitas seis amostras simples, três em cada uma das duas linhas centrais de plantio de milho, as quais

formaram a amostra composta que representou a parcela, totalizando 525 amostras compostas (cinco tratamentos x três repetições x cinco camadas x sete pontos transversais em relação à linha de semeadura).

Tabela 03. Tratamentos selecionados no experimento da Embrapa Cerrados, conduzido sob sistema plantio direto.

Tratamento	Solo	Adubação de 80 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ de P ₂ O ₅	
		Fonte	Modo de aplicar
1	Natural	-	-
2	Natural	ST	Lanço
3	Natural	ST	Sulco
4	Natural	FNR	Lanço
5	Natural	FNR	Sulco

Depois de coletadas, as amostras foram secadas ao ar e passadas em peneira de 2 mm. A fração retida na peneira foi macerada e novamente peneirada. Em todas as amostras de solo, foi realizada a determinação do P extraível pelos extratores Bray 1 (HCl 0,025N + NH₄F 0,03 N), Resina trocadora de íons e Mehlich I (H₂SO₄ 0,0125 M L⁻¹ + HCl 0,05 M L⁻¹), segundo os métodos descritos em Embrapa (1997) e Raij e Quaggio (2001).

Linha de Semeadura

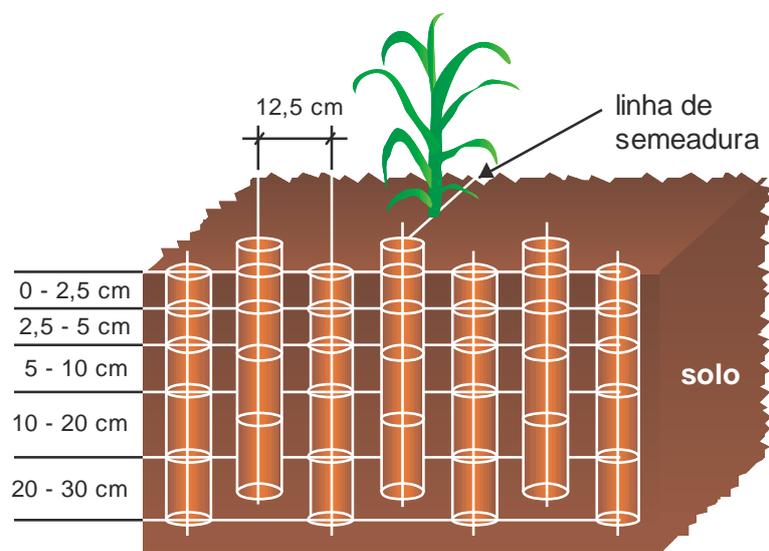


Figura 01. Esquema de amostragem do solo, com sete pontos distribuídos transversalmente em relação à linha de plantio e em cinco diferentes camadas.

2.3. Procedimentos analíticos

No método Mehlich I, à 5 cm³ de cada amostra de solo foi adicionado 50 mL de solução extratora (H₂SO₄ 0,0125N + HCl 0,05 N), passando então por uma agitação de 5 minutos. Após um repouso de 16 horas para decantação do solo, foram misturados 5 mL da solução com 5mL de água e 10 mL de “solução de trabalho” (1 g de ácido ascórbico + 300 mL de molibdato de amônio). Os teores de P foram determinados por espectrofotometria a 820 nm.

No método Bray 1, a 5 cm³ de cada amostra de solo foi adicionado 40ml de solução extratora (HCl 0,025N + NH₄F 0,03 N), passando então por uma agitação de 1 minuto. As soluções foram imediatamente filtradas em papel filtro Quantitativo JP42 Faixa

Azul de 11 cm de diâmetro. Foram misturados 5 mL do filtrado com 5 mL de água destilada e 15 mL de solução redutora B (0,88 g de ácido ascórbico + 10 mL de solução de molibdato de amônio + H₂O deionizada q.s.p. 300 mL). Após 40 minutos de repouso, os teores de P foram determinados por espectrofotometria a 680 nm.

No método de Resina trocadora de íons, 2,5 cm³ de cada amostra de solo foi degradado por agitação com bolinha de vidro em 25 mL de água destilada por 15 minutos. Em seguida, a bolinha foi retirada e acrescentados 2,5 cm³ da resina, colocada então para agitar por 16 horas com o solo. Após esse período, a resina foi separada do solo com o uso de peneiras e, após repouso de 30 minutos em 50 mL da solução extratora NH₄Cl 0,8 N com HCl 0,2 N, foi colocada para agitar por mais 1 hora para extração do P da resina. Depois de diluir 4 mL do extrato com 16 mL da solução diluída de molibdato de amônio e aguardar 15 minutos, foram feitas as leituras em espectrofotômetro a 660 nm.

As análises de P das amostras de solo foram realizadas no Laboratório de Química do Solo da Embrapa Cerrados, em Planaltina - DF.

2.4. Análises estatísticas

Os resultados obtidos em cada método de extração foram analisados estatisticamente para comparações quanto à distribuição do P no perfil do solo sob plantio direto (profundidade e horizontalidade), com diferentes fontes e modos de aplicação e com os teores de P extraível determinados por diferentes extratores, Mehlich I, Bray 1 e Resina trocadora de íons. Para tanto, foram utilizados dois modelos mistos com dados repetidos no espaço e o Método de Máxima Verossimilhança Restrita, via PROC MIXED do SAS 9.1. Esse método foi escolhido, pois estima os componentes de variância de forma independente para os efeitos fixos e aleatórios (Oliveira et al., 2006) e por tratar-se de um experimento casualizado.

O primeiro modelo, com delineamento em blocos ao acaso e envolvendo todos os tratamentos, foi:

$$y_{ijkm} = \mu + t_i + b_j + (tb)_{ij} + p_k + (tp)_{ik} + (bp)_{jk}(t_i) + h_m + (th)_{im} + (ph)_{km} + (tph)_{ikm} + \varepsilon_{ijkm}$$

(Modelo 1)

onde os efeitos aleatórios são bloco (b_j), bloco x tratamento ($(tb)_{ij}$), bloco x profundidade no tratamento ($(bp)_{jk}(t_i)$) e o erro (ε_{ijkm}). os demais efeitos, média da população (μ), tratamento

(t_i), profundidade (p_k), tratamento x profundidade ($(tp)_{ik}$), horizontalidade (h_m), tratamento x horizontalidade ($(th)_{im}$), profundidade x horizontalidade ($(ph)_{km}$) e tratamento x profundidade x horizontalidade ($(tph)_{ikm}$), são fixos. Com esse modelo foi feita uma análise inicial comparando todos os tratamentos e análises comparando o tratamento testemunha com cada um dos outros tratamentos, onde foram utilizados Análise de Variância (ANOVA) e, nos casos de análise de significância, o teste de hipótese de Student (t) ($P < 0,05$).

O segundo modelo, com delineamento em blocos ao acaso com estrutura fatorial e excluindo o tratamento testemunha, foi:

$$y_{aijkm} = \mu + F_a + M_i + (FM)_{ai} + b_j + (FMb)_{aij} + p_k + (Fp)_{ak} + (Mp)_{ik} + (FMP)_{aik} + (bp)_{jk}(FM)_{ai} + h_m + (Fh)_{am} + (Mh)_{im} + (FMh)_{aim} + (ph)_{km} + (Fph)_{akm} + (Mph)_{ikm} + (FMph)_{aikm} + \varepsilon_{aijkm}$$

(Modelo 2)

onde os efeitos aleatórios são bloco (b_j), fonte x modo x bloco ($(FMb)_{aij}$), bloco x profundidade em fonte x modo ($(bp)_{jk}(FM)_{ai}$) e o erro (ε_{aijkm}). Os demais efeitos, média da população (μ), fonte (F_a), modo (M_i), fonte x modo ($(FM)_{ai}$), profundidade (p_k), fonte x profundidade ($(Fp)_{ak}$), modo x profundidade ($(Mp)_{ik}$), fonte x modo x profundidade ($(FMP)_{aik}$), horizontalidade (h_m), fonte x horizontalidade ($(Fh)_{am}$), modo x horizontalidade ($(Mh)_{im}$), fonte x modo x horizontalidade ($(FMh)_{aim}$), profundidade x horizontalidade ($(ph)_{km}$), fonte x profundidade x horizontalidade ($(Fph)_{akm}$), modo x profundidade x horizontalidade ($(Mph)_{ikm}$) e fonte x modo x profundidade x horizontalidade ($(FMph)_{aikm}$), são fixos. Com esse modelo foi feita uma análise comparando somente os tratamentos que receberam aplicações de P e uma análise com estrutura fatorial 2 x 2, em relação aos dois métodos, lanço e sulco, e as duas fontes, ST e FNR.

Outras análises estatísticas, tanto entre os rendimentos de grãos acumulado nos oito anos de experimento e médios dos cinco cultivos de soja e três cultivos de milho e as variáveis fonte de P e modo de aplicação do fertilizante quanto as correlações entre os métodos de extração, foram realizadas usando ANOVA do SAS 9.1.

Devido aos altos teores de P extraível observado nas camadas até 10 cm de profundidade como também no local do sulco de semeadura, para os tratamentos onde o adubo foi aplicado no sulco, a escala utilizada na confecção da maioria das figuras foi a logarítmica, para melhorar a estética e visualização dos dados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Originalmente, o solo da área onde foi implementado o experimento apresentava teor de $P_{\text{Mehlich I}}$ de $1,2 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 0 cm a 20 cm (Tabela 1), teor considerado muito baixo, segundo Sousa et al. (2004). Portanto, era esperado o aumento do teor de P no solo e a resposta das culturas, milho e soja, à adubação fosfatada, principalmente nos tratamentos escolhidos para realização deste trabalho, onde o solo não foi corrigido com P antes do primeiro cultivo.

A análise estatística dos teores de P extraídos na camada de 0 cm a 30 cm para o tratamento onde não se aplicou P e para os tratamentos com aplicação de fertilizantes fosfatados, a lanço na superfície ou no sulco de semeadura, teores esses obtidos a partir da média aritmética dos valores da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e vertical até 30 cm de profundidade, para os três extratores e após o oitavo ano de cultivo, demonstrou que a aplicação de fertilizantes fosfatados aumentou o teor de P extraído do solo, de forma significativa a 5%, com duas exceções (Tabela 04). Quando se utilizou o extrator de Mehlich I, o contraste entre o tratamento sem P e o tratamento com aplicação anual do ST a lanço só foi significativo a 10% e, para o extrator Bray 1, o contraste do tratamento sem P com aplicação anual do FNR a lanço e no sulco foram significativos a 10% e 15%, respectivamente. Isso evidencia que a aplicação do fertilizante fosfatado alterou a disponibilidade do P no solo avaliado pelos três extratores estudados.

Para se ter uma idéia da alteração do teor de P no solo para os tratamentos onde foram aplicados fertilizantes fosfatados em relação ao tratamento sem P, foi feita a média de todos os tratamentos onde foi aplicado fertilizante fosfatado para a distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade e para a distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, pelo extrator da Mehlich I (Figura 2).

No tratamento sem P, todos os valores obtidos são considerados muito baixos ou baixos (Figura 2). Já para a média dos tratamentos onde foram aplicados fertilizantes fosfatados são observados teores altos para camada até 5 cm de profundidade, baixo a adequado para camada de 5 cm a 10 cm e baixo e muito baixo para camada entre 10 cm e 30 cm, segundo Sousa et al. (2004). Comportamento semelhante foi observado também com os extratores Bray 1 e Resina.

Tabela 04. Teores de P no solo avaliados por três extratores para a profundidade de 0 a 30 cm, obtida com média aritmética de todas as amostras por tratamento, independente da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade e da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, coletados após o oitavo ano de cultivo da área.

Fonte de Fósforo	Modo de aplicação	Dose kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ ano ⁻¹	Extratores		
			Mehlich I	Bray 1	Resina
-	-	0	1	1,5	3
ST	lanço	80	6	8*	17**
ST	sulco	80	8*	10*	18**
FNR	lanço	80	31**	3	34**
FNR	sulco	80	25**	3	30**

* Significativo a 5%

** Significativo a 1%

Com base nos dados apresentados na tabela 04 e na figura 02, conclui-se que essa área apresenta teor de P extraível muito baixo, avaliado pelos três extratores, para o tratamento onde não se aplicou fertilizante fosfatado, e que ao aplicar-se o fertilizante por oito anos sucessivos, apresentou um gradiente de distribuição horizontal em relação ao espaçamento da cultura do milho e um forte gradiente na distribuição vertical do P até 30 cm de profundidade.

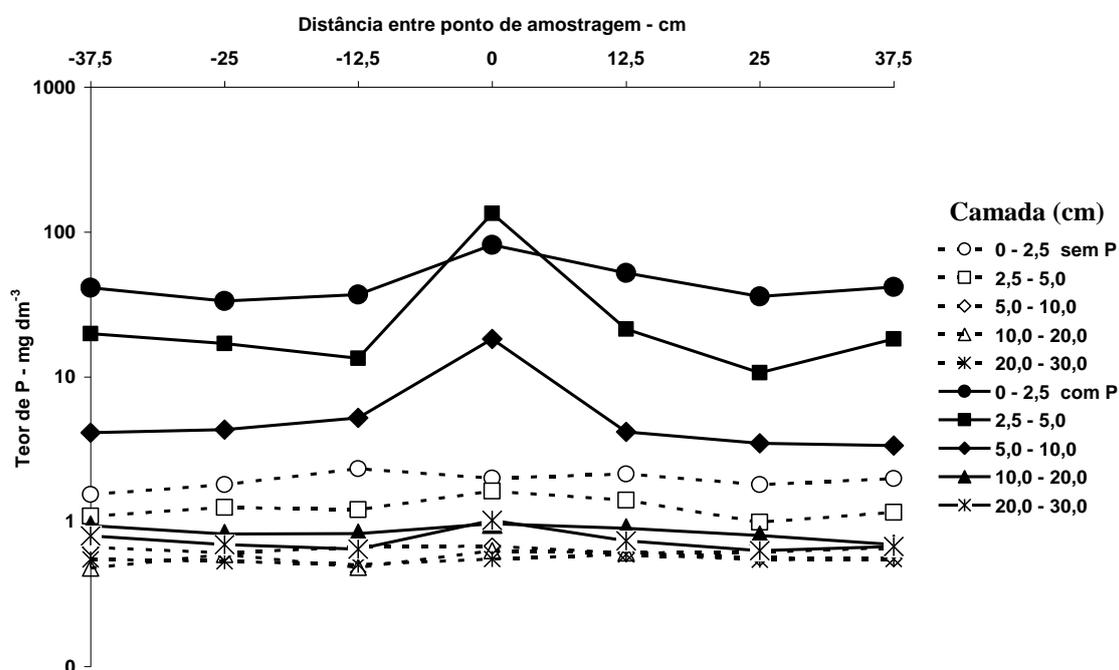


Figura 02. Distribuição do P no solo nos sentidos vertical avaliada até 30 cm de profundidade e horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, extraído por Mehlich I, para o tratamento onde não se aplicou P (sem P) e para a média dos tratamentos que receberam adubação fosfatada, como superfosfato triplo ou fosfato natural reativo, aplicados a lanço na superfície do solo ou no sulco de semeadura (com P).

3.1. Distribuição do P extraível no perfil do solo

Segundo a análise de variância (ANOVA) utilizando o Modelo 1, de blocos ao acaso e com todos os tratamentos, inclusive a testemunha, houve efeito altamente significativo ($P < 0,0001$) das variáveis tratamento (modo de aplicação e fonte de P), profundidade e horizontalidade e suas interações duplas e triplas analisadas em relação aos teores de P extraível pelos três métodos de extração, Mehlich I, Bray 1 e Resina. Esse resultado evidencia o efeito significativo da adubação fosfatada, feita por oito anos sucessivos no experimento, no teor de P distribuído no solo.

Nos testes de hipótese de Student (t), para os teores de P extraídos por Mehlich I, Bray 1 e Resina, todos os tratamentos, com exceção da testemunha, demonstraram-se significativos (Tabela 05), sendo que os tratamentos que receberam o FNR como adubação fosfatada foram altamente significativos para Mehlich I, enquanto que para Bray 1 foram os que receberam o ST. Para Resina, todos os tratamentos que receberam FNR ou ST foram altamente significativos.

Tabela 05. Resultados do teste de hipótese de Student (t) para os teores de P extraídos por Mehlich I, Bray 1 e Resina em todos os tratamentos analisados.

Tratamento	Mehlich I	Bray 1	Resina
1	0,6309	0,0726	0,1940
2	0,0120	< 0,0001	< 0,0001
3	0,0026	< 0,0001	< 0,0001
4	<0,0001	0,0039	< 0,0001
5	< 0,0001	0,0062	< 0,0001

Esses resultados estatísticos podem ser comparados aos teores de P extraídos pelos três extratores na camada de 0 cm a 30 cm, já apresentados na tabela 04. Os tratamentos que foram altamente significativos ($P < 0,0001$) pelo teste de hipótese de Student (t), apresentaram teores de P bem maiores, se comparados aos teores do tratamento TEST. Como Mehlich I extraiu mais P do solo nos tratamentos que receberam o FNR, Bray 1 nos que receberam o ST e a Resina em ambas as fontes, concluí-se que quanto mais P foi extraído, maior foi a significância do tratamento e de sua diferença em relação a testemunha.

Seguindo o objetivo desse trabalho, de avaliar a distribuição do P no sentido horizontal em relação ao espaçamento da cultura do milho e vertical até a profundidade de 30 cm, para duas fontes de fertilizantes fosfatados e dois modos de aplicação dessas fontes, foi feita a análise de variância (ANOVA) utilizando o Modelo 2, com estrutura fatorial e excluindo o tratamento testemunha (Tabela 06).

Dentre as variáveis analisadas e independentemente do extrator utilizado, a fonte de P (Fonte), a distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade (Prof) e a distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho (Horiz), apresentaram efeito altamente significativo ($P < 0,01$) na distribuição de P extraível do solo dos tratamentos adubados, conduzido sob SPD e avaliado após oito anos de cultivo da área.

Observa-se também uma série de interações significativas ou altamente significativas, destacando-se para o objetivo desse trabalho as interações triplas.

Tabela 06. Resultado da análise estatística com estrutura fatorial, relacionando dois modos de aplicação do fertilizante fosfatado, lanço e sulco, duas fontes de P, ST e FNR, distribuição vertical avaliada até 30 cm (Prof) e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho (Horiz), para os três métodos de extração de P do solo.

Efeito	Mehlich I	Resina	Bray 1
	Pr > f		
Fonte	< 0,0001	0,0011	< 0,0001
Modo	0,4456	0,6198	0,1543
Horiz	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Prof	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fonte x Horiz	< 0,0001	0,5762	< 0,0001
Fonte x Prof	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fonte x Modo	0,1516	0,2816	0,0827
Modo x Prof	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Modo x Horiz	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Prof x Horiz	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fonte x Modo x Prof	< 0,0001	0,0327	< 0,0001
Fonte x Modo x Horiz	< 0,0001	0,0408	< 0,0001
Fonte x Prof x Horiz	< 0,0001	0,6876	< 0,0001
Modo x Prof x Horiz	< 0,0001	< 0,001	< 0,0001
Fonte x Modo x Prof x Horiz	< 0,0001	0,8055	< 0,0001

3.1.1. Efeito das fontes de fertilizante fosfatado

Na análise estatística com estrutura fatorial (Tabela 06), onde foi excluído o tratamento testemunha, o efeito da variável fonte de P foi altamente significativo nos três

métodos de extração, o que pode ser explicado pela natureza das fontes utilizadas e pelos próprios métodos de extração de P do solo. O ST é uma fonte solúvel de P, dissolvendo-se rapidamente no solo e disponibilizando prontamente esse nutriente para as plantas. Já o FNR é uma fonte de P de baixa solubilidade, liberando esse nutriente paulatinamente no solo. Assim, para Mehlich I, por ser um extrator ácido e ter ação dissolutiva sobre a apatita (Goedert et al., 1991), os teores de P extraídos foram maiores quando a fonte foi o FNR (Tabela 7).

Os altos teores de P extraídos pela Resina de troca de íons, com relação às duas fontes, podem ser explicados pela presença da resina de troca catiônica, que ao adsorver o Ca da solução, reduziu a concentração desse íon no meio, assim como a resina de troca aniônica reduziu o teor de P da solução, e que com um período de extração de 16 horas sob agitação, favoreceu a condições de maior dreno para o Ca^{2+} e para o $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$. Isso facilitou a dissolução do FNR durante o processo de extração como também a extração do P ligado a Ca quando a fonte de P foi o ST, pois, segundo Sousa e Volkweiss (1987), em torno de 25 % do P aplicado como ST fica precipitado na região do grânulo desse fertilizante com predominância do mineral fosfato bicálcico dihidratado. Outra explicação pode ser dada pelo fato de que não se utiliza nenhuma solução de natureza ácida no processo de extração de P do solo, assim, com o pH mais elevado, houve maior solubilidade de fosfatos de Fe e Al (Raij, 2004).

Já os teores de P extraídos por Bray 1 foram maiores quando a fonte foi o ST, pelo fato de, além do pH ácido, a solução extratora possuir íon fluoreto (F^-), que forma forte complexo com os íons Al^{3+} e Ca^{2+} liberando, assim, o P ligado ao metal (Raij, 2004; Lins, 1987) e o que se encontrava na forma de fosfato de cálcio. Com relação aos tratamentos adubados com FNR, é conhecido o fato desse extrator avaliar só a porção de P dissolvida do FNR (Sousa et al., 1999a). Essas diferenças na extração são melhores avaliadas quando comparadas as médias por fonte em cada extrator (Tabela 07).

Tabela 07. Teores de P do solo, avaliados por três extratores, para as duas fontes de P aplicadas ao solo, Superfosfato triplo e Fosfato natural reativo, independentes da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade, da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e do modo como o P foi aplicado ao solo.

Extratores	Fonte de fósforo	
	Superfosfato triplo	Fosfato natural reativo
	----- mg dm ⁻³ -----	
Mehlich I	7,0b	27,8a
Bray 1	9,1a	3,0b
Resina	17,5b	31,6a

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo Teste de Student ($P < 0,05$)

3.1.2. Efeito dos modos de aplicação dos fertilizantes fosfatados.

Os resultados da Tabela 06 mostram que o modo de aplicação, se no sulco ou a lanço, não teve efeito significativo no teor de P do solo em nenhum dos métodos de extração. Esse resultado era esperado, uma vez que os teores médios de P apresentados por modo de aplicação (Tabela 08) são independentes da fonte de fertilizantes e das distribuições horizontal correspondente ao espaçamento do milho e vertical avaliada até 30 cm de profundidade. O efeito do modo de aplicação do P ao solo só é evidenciado quando são avaliadas as distribuições vertical e horizontal, que são alteradas pela forma com que o fertilizante é aplicado ao solo. Portanto, isso, adicionado ao fato dos tratamentos com adubação fosfatada terem recebido sempre, desde o início do experimento, a mesma dose de P, levou os teores médios de P por modo de aplicação a não serem estatisticamente diferentes.

Tabela 08. Teores de P do solo, avaliados por três extratores, para os dois modos de aplicação do fertilizante fosfatado, a lanço na superfície do solo e no sulco de semeadura, independentes da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade, da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e das fontes de P aplicadas ao solo.

Extratores	Modo de aplicação	
	Lanço	Sulco
	----- mg dm ⁻³ -----	
Mehlich I	18,3a	16,5a
Bray 1	5,5a	6,6a
Resina	25,2a	23,9a

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo Teste de Student (P<0,05)

3.1.3. Distribuição vertical e horizontal do P no solo.

O efeito das variáveis distribuições vertical avaliada até 30 cm de profundidade e horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, foi altamente significativo (Tabela 06).

Na figura 03 é apresentada a distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade do P extraível do solo para os três extratores, independente da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, do modo de aplicação do fertilizante fosfatado ao solo e da fonte de fertilizante fosfatado. A distribuição vertical do P extraível, independente do método de extração de P do solo foi até a profundidade de 10 cm, sendo observada uma forte redução no teor de P extraível das camadas mais superficiais para as sub superficiais. A não incorporação dos fertilizantes, por ser um solo sob SPD, as menores

perdas por erosão, a reciclagem proporcionada pelas plantas, depositando o P na superfície devido à decomposição de seus resíduos (Rheinheimer e Anghinoni, 2001) e a baixa mobilidade do P no solo justificam o efeito significativo da variável profundidade, uma vez que foram feitas as aplicações dos fertilizantes fosfatados superficialmente a lanço ou entre 3 cm e 8 cm de profundidade no sulco de semeadura. Portanto, o maior gradiente de concentração foi encontrado na camada até 10 cm de profundidade. A quantidade de P extraída nas camadas até 10 cm foi significativa, enquanto que entre as demais profundidades analisadas não houve diferença estatística.

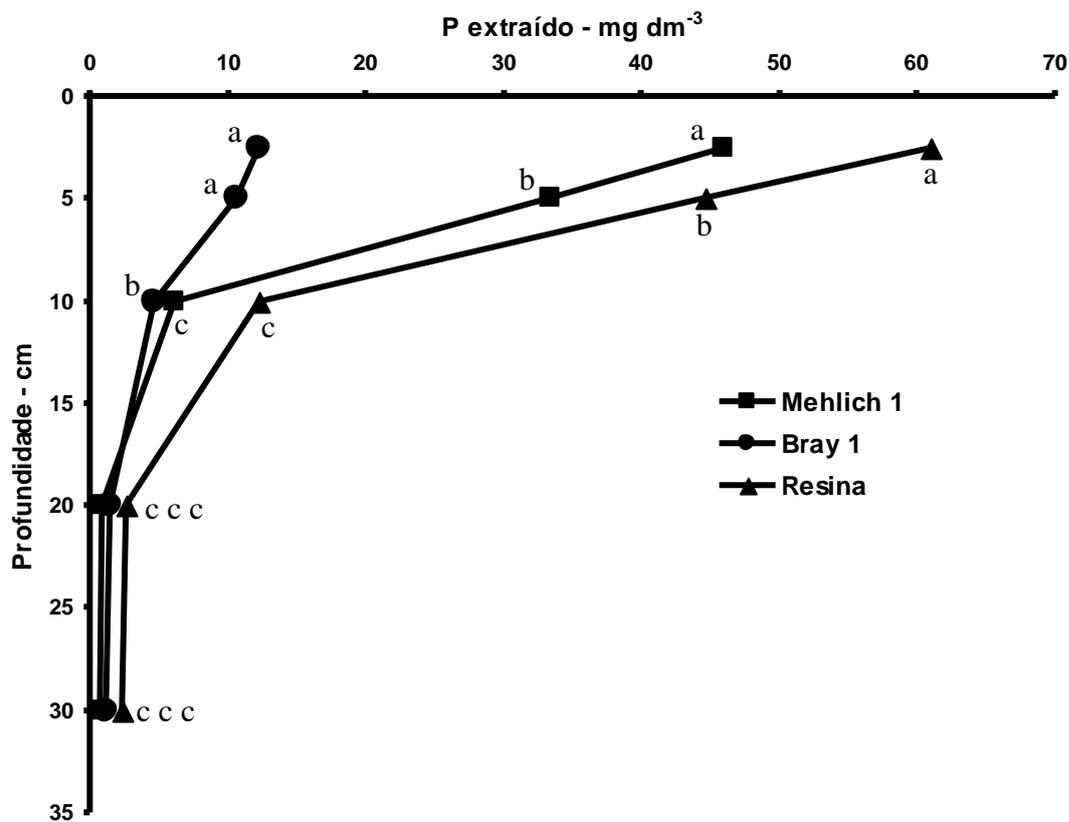


Figura 03. Distribuição vertical avaliada até 30 cm do P extraído por Mehlich I, Resina e Bray 1, independentes da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, fontes de fertilizantes fosfatados e modo de aplicação do adubo ao solo. Letras iguais por método de extração, não há diferença significativa pelo Teste de Tukey ($t < 0,05$)

Selles et al. (1997) e Bravo et al. (2007) também relataram o acúmulo de P na camada até 10 cm de profundidade de solos sob SPD. Costa (2008), em seu estudo, também verificou acúmulo de P disponível até os dez primeiros centímetros do solo sob SPD há 18

anos. Entretanto, esse acúmulo só passou a ser significativo ($P < 0,05$) após mais de 10 anos de condução do experimento. Vale ressaltar que se tratava de um Argissolo com textura franco-argilo-arenosa (baixa capacidade de fixação de P) e a adubação no sulco de semeadura foi feita entre 6 cm e 8 cm de profundidade.

Resultado similar foi encontrado por Rheinheimer e Anghinoni (2001) num estudo sobre a distribuição do P, até 17,5 cm de profundidade, num Latossolo Vermelho distrófico típico, sob dois sistemas de plantio, SPD e SPC, onde encontraram um gradiente de P e teores estatisticamente diferentes entre as camadas analisadas do solo sob SPD ($P < 0,05$) e uma distribuição uniforme no solo sob SPC, tanto na extração do P por Resina quanto por Mehlich I. Já Duiker e Beegle (2006) registraram esse acúmulo de P apenas nos 5 cm superficiais do solo sob SPD, mesmo após 25 anos de condução do experimento.

Na tabela 09 são apresentados os dados da distribuição horizontal, correspondente ao espaçamento do milho, do P extraído pelos três extratores, independentemente da distribuição vertical avaliada até 30 cm, do modo de aplicação e da fonte de fertilizante fosfatada. Foi observada diferença significativa para o teor de P na linha de semeadura (que corresponde a distância 0 cm na tabela 09) para as demais distâncias de amostragem do solo que não diferiram entre si, comportamento esse semelhante entre os extratores. O maior teor de P na linha de semeadura pode ser explicada pela coincidência do ponto de amostragem de solo ser o ponto de aplicação no sulco de semeadura do fertilizante fosfatado, ocorrido na metade dos tratamentos.

Tabela 09. Distribuição do P extraído por Mehlich I, Resina e Bray 1 no sentido horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, independente da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade, do modo de aplicação e da fonte de fertilizante fosfatado.

Extratores	Distância entre pontos de amostragem a partir da linha de plantio – cm ⁽¹⁾						
	-37,5	-25,0	-12,5	0	12,5	25,0	37,5
	mg dm ⁻³						
Mehlich I	13,3b	11,2b	11,4b	47,0a	15,9b	10,3b	12,9b
Resina	19,1b	17,4b	16,5b	63,2a	20,2b	17,0b	18,7b
Bray 1	4,5b	4,2b	4,2b	14,8a	5,0b	4,3b	5,2b

⁽¹⁾O ponto 0 cm é o local da linha de semeadura e da aplicação do fertilizante fosfatado quando o modo de aplicação é no sulco. O milho foi cultivado com espaçamento de 75 cm.

Letras iguais, por linha, não há diferença significativa pelo Teste de Student ($P < 0,05$).

3.1.4. Interações

3.1.4.1. Interação entre fontes de fertilizante fosfatado e modos de aplicação do fertilizante.

Assim como para a variável modo de aplicação do fertilizante ao solo, em nenhum dos métodos de extração a interação entre a fonte de P e o modo de aplicação do adubo apresentou efeito significativo no teor do P extraível do solo (Tabela 06), devido os teores médios analisados dependerem da distribuição vertical e horizontal no solo, além dos tratamentos com adubação fosfatada terem recebido sempre, desde o início do experimento, a mesma dose de P, 80 kg de P₂O₅ ha⁻¹ ano⁻¹, independentemente da fonte de P utilizada (Tabela 10).

Tabela 10. Teores de P do solo, avaliados pelos três extratores, para as duas fontes de P e os dois modos de aplicação do fertilizante, independente da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura milho e da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade.

Fontes de P	Extratores					
	Mehlich I		Bray 1		Resina	
	Modos de aplicação					
	Lanço	Sulco	Lanço	Sulco	Lanço	Sulco
ST	6,1a	8,0a	8,0a	10,3a	16,8a	18,3a
FNR	30,6a	25,1a	3,1a	2,8a	33,6a	29,5a

Médias seguidas da mesma letra na linha e por extrator não diferem entre si pelo Teste de Student (P<0,05)

3.1.4.2. Interação entre modos de aplicação do fertilizante fosfatado e distribuição vertical avaliada até 30 cm.

Na figura 04 é apresentada a distribuição vertical do P no solo avaliada até 30 cm de profundidade para os dois modos de aplicação do fertilizante fosfatado e para os três extratores de P, independentemente da distribuição horizontal e das fontes de fertilizantes fosfatados. O efeito altamente significativo da interação entre modo de aplicação do fertilizante fosfatado e distribuição vertical do P avaliada até 30 cm de profundidade, levando em consideração os teores de P extraídos pelos três extratores (Tabela 06), pode ser explicado pelo acúmulo diferenciado de P nas diferentes profundidades em função do modo como foi aplicado o fertilizante.

A aplicação do fertilizante fosfatado a lanço, como é feita na superfície do solo, apresentou um maior teor de P extraível na camada de 0 cm a 2,5 cm, enquanto que a aplicação do adubo no sulco de semeadura, entre 3 cm e 8 cm de profundidade, apresentou um acúmulo de P extraível pelos três extratores na camada de 2,5 cm a 5 cm do solo.

Na profundidade entre 5 cm e 10 cm os teores de P para aplicação do fertilizante no sulco de semeadura foram superiores aos teores de P para aplicação a lanço na superfície do solo, nos três extratores utilizados para avaliar a disponibilidade de P. Isso indica uma maior intensidade na distribuição do P nessa camada, originada principalmente pelos valores do P extraível na região do sulco, quando da aplicação localizada do fertilizante. Essa maior quantidade de P encontrada até 10 cm quando se aplicou o fertilizante no sulco de semeadura em relação à aplicação a lanço na superfície do solo, pode ser explicada pelo preparo feito anualmente na região do sulco pela plantadeira para semear as culturas de verão (soja ou milho) e para semear o milheto, utilizado como planta de cobertura de inverno. Considerando os oito anos de cultivo da área, foi passada a máquina com plantadeira dezesseis vezes, com espaçamentos de 0,45 m (cinco vezes), 0,75 m (três vezes) e 0,20 m (oito vezes) para os cultivos com soja, milho e milheto, respectivamente, o que certamente influenciou na distribuição no sentido vertical do fertilizante fosfatado aplicado anualmente no sulco de semeadura. A profundidade alcançada pela plantadeira no preparo do local do sulco de semeadura atinge entre 8 cm a 10 cm.

Não podemos deixar de considerar que parte desse efeito se deve também ao sistema radicular das plantas, que concentram muitas raízes no local onde o adubo foi aplicado e que, após o fim do ciclo da cultura, decompõe-se liberando P nesse local. A atividade de microorganismos na rizosfera e posterior decomposição desses também podem ser mecanismo de distribuição vertical do P no solo.

Portanto, o fato da aplicação do fertilizante ser feita em profundidade e das próprias aplicações sucessivas de P no sulco de semeadura ao longo dos anos terem promovido a incorporação desse nutriente no solo, como sugerido por Costa (2008), é justificável o acúmulo de P em maior profundidade quando das aplicações em sulco de semeadura.

Nas profundidades maiores que 10 cm, os métodos de extração de P do solo apresentaram comportamento semelhante na distribuição do P, independente do modo de aplicação (Figura 04).

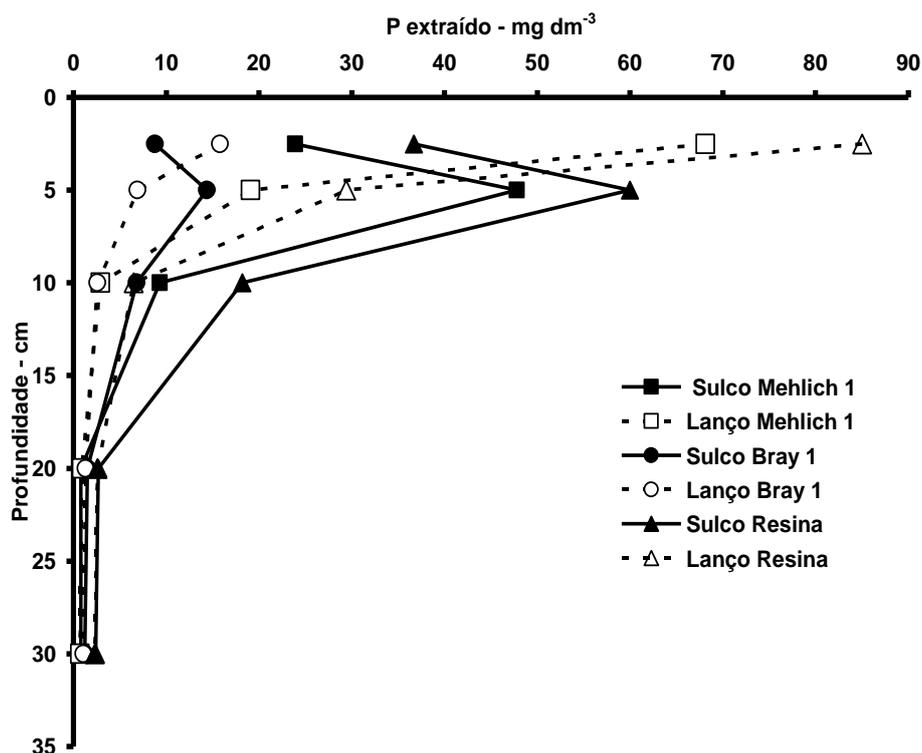


Figura 04. Distribuição vertical do P no solo até 30 cm de profundidade, extraído por Mehlich I, Resina e Bray 1, para dois modos de aplicação do fertilizante fosfatado e independente da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e das fontes de fertilizante fosfatado, após 8 anos de estabelecido o SPD.

3.1.4.3. Interação entre fontes de fertilizante fosfatado e distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade.

O efeito altamente significativo da interação entre fonte do fertilizante fosfatado e distribuição vertical de P até a profundidade de 30 cm, independentemente do modo de aplicação do fertilizante e da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, para os três extratores (Tabela 06), pode ser explicado pelos diferentes teores de P extraídos das camadas do solo até 10 cm de profundidade em função da fonte de P usada, ou seja, mudando a fonte, a quantidade de P extraída também mudou até os 10 cm de profundidade. Para os extratores Mehlich I e Resina, a quantidade de P extraída foi maior quando se utilizou o FNR, enquanto que para o extrator Bray 1 foi maior quando a fonte foi o ST.

Os dados apresentados na Figura 5 indicam que o comportamento das fontes de P quanto a distribuição vertical foram diferenciados, com variações na quantidade de P extraível em relação ao fertilizante fosfatado utilizado, com destaque para o FNR, onde se observou maior acúmulo nas camadas de 0 cm a 2,5 cm e 2,5 cm a 5,0 cm, como avaliado pelos

extratores de Mehlich I e Resina. Apesar dessa alta concentração de P do FNR nessas duas camadas, o mesmo apresenta baixa disponibilidade para as plantas, como indicado pelos baixos valores extraíveis pelo método de Bray 1. Nas profundidades entre 10 cm e 30 cm, os métodos de extração de P do solo apresentaram comportamento semelhante na distribuição do P, independente da fonte utilizada (Figura 05).

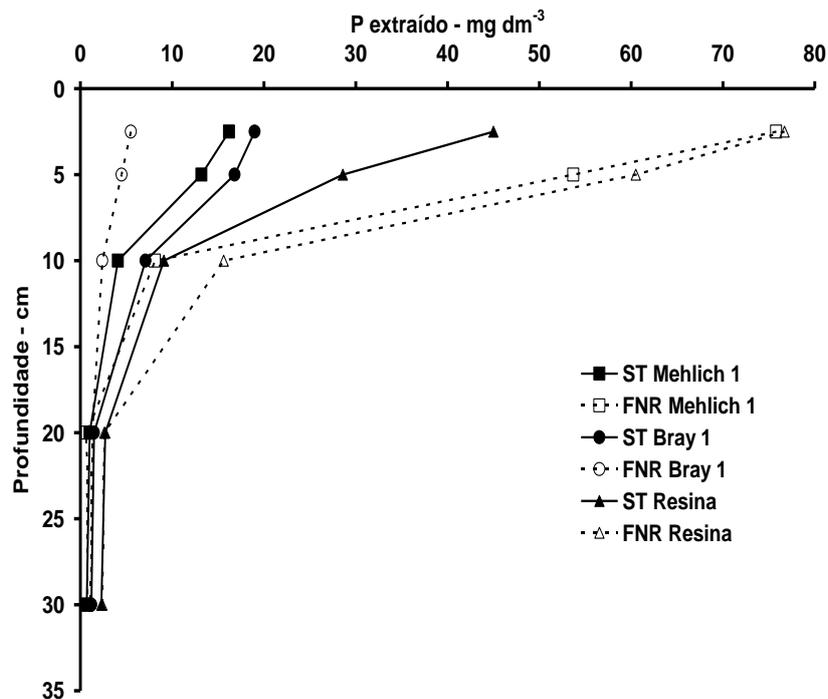


Figura 05. Distribuição vertical do P avaliada até a profundidade de 30 cm, extraído por Mehlich I, Resina e Bray 1, para as duas fontes de fertilizantes fosfatados (superfosfato triplo-ST e fosfato natural reativo – FNR), independentes do modo de aplicação e distribuição horizontal do P correspondente ao espaçamento da cultura do milho.

3.1.4.4. Interação entre modos de aplicação do fertilizante fosfatado e distribuição horizontal do P correspondente ao espaçamento da cultura do milho.

O efeito altamente significativo, para os três extratores, da interação entre modo de aplicação do fertilizante fosfatado e distribuição horizontal do P correspondente ao espaçamento da cultura do milho (Tabela 06), independentemente da fonte de P utilizada e da sua distribuição vertical no solo até 30 cm de profundidade, é justificado pelos diferentes teores de P no solo no sentido transversal a linha de semeadura do milho em função do modo de aplicação do adubo. Quando aplicado a lanço, o P foi encontrado no solo distribuído de forma mais homogênea, não havendo diferença estatística no teor de P entre os pontos

coletados. Em contrapartida, para aplicação do fertilizante fosfatado no sulco de semeadura, os valores do P extraível pelos três extratores foram significativamente superiores no local da aplicação, sendo que para os demais pontos de amostragem de solo não foi observada diferença significativa (Figura 06). O efeito dessa interação também foi relatado por Duiker e Beegle (2006).

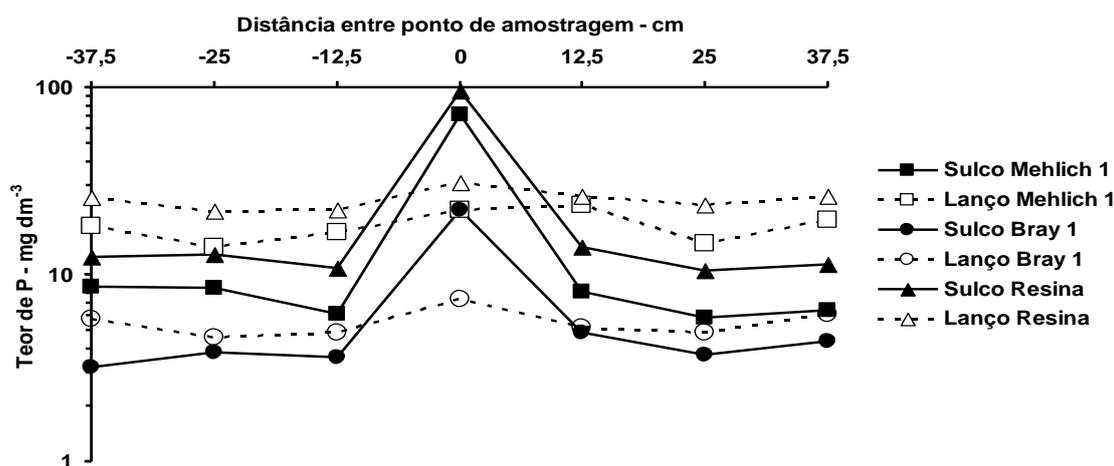


Figura 06. Distribuição do P extraído por Mehlich I, Bray 1 e Resina no sentido horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, em função do modo de aplicação do fertilizante, se a lanço ou no sulco de semeadura, independentemente da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade e da fonte de fertilizante fosfatado utilizada.

3.1.4.5. Interação entre fontes de fertilizante fosfatado e distribuição horizontal de P correspondente ao espaçamento da cultura do milho.

O efeito da interação entre as variáveis fontes de P e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, independentemente do modo de aplicação do fertilizante e da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade, foi altamente significativo considerando os teores de P extraídos por Bray 1 e Mehlich I, mas não foi significativo por Resina (Tabela 06). Isso ocorreu devido às relações entre as fontes de P e os métodos de extração utilizados. O efeito significativo para Mehlich I pode ser explicado pelos maiores teores de P extraídos do solo no sentido horizontal quando a fonte foi o FNR, principalmente no ponto correspondente a linha de semeadura (ponto 0 cm do eixo horizontal da figura 07). O mesmo ocorreu para os teores de P extraídos do solo por Bray 1 quando se utilizou o ST. Com relação aos teores de P extraídos por Bray 1 dos solos adubados com FNR, além dos valores extraídos de P serem menores, estes foram homogêneos em todos os

pontos da distribuição no sentido horizontal. No caso da Resina, que em geral extrai mais P desse solo que os extratores de Mehlich I e Bray 1, a quantidade de P extraída um pouco maior quando da utilização do FNR não foi suficiente para que houvesse a interação (Figura 07), pois o comportamento de todos os pontos amostrados são semelhantes, obedecendo a mesma relação.

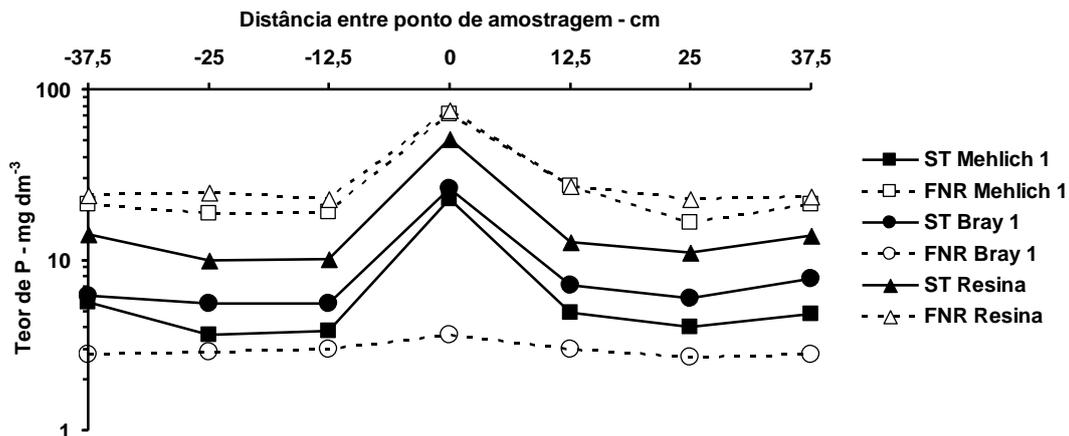


Figura 07. Distribuição horizontal do P correspondente ao espaçamento da cultura do milho, extraído por Mehlich I, Resina e Bray 1 em função da fonte de P, se o Superfosfato triplo (ST) ou o Fosfato natural reativo (FNR), independentes da distribuição vertical avaliada até 30 cm e do modo de aplicação do fertilizante fosfatado.

3.1.4.6. Interação entre distribuição vertical do P avaliada até 30 cm de profundidade e distribuição horizontal de P correspondente ao espaçamento da cultura do milho.

O efeito altamente significativo da interação entre distribuição vertical avaliada até a profundidade de 30 cm de profundidade e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho (Tabela 06), independentes da fonte de fertilizante fosfatado e do modo de aplicação, para os três métodos de extração, é explicado pelos maiores teores de P encontrados nas camadas mais superficiais, decrescendo em profundidade, passando a não diferir entre 10 cm e 30 cm de profundidade, combinado com o fato de ter sido encontrado maior teor de P extraído no local do sulco de semeadura, entre 2,5 cm e 10 cm de profundidade, em relação aos outros pontos amostrados no sentido horizontal do perfil do solo pelo método de Mehlich I (Figura 08). O resultados obtidos pelos métodos de Bray 1 e Resina apresentaram comportamento de distribuição horizontal e vertical do P semelhante ao do Mehlich I, diferindo apenas na quantidade de P extraída, característica de cada método. Isso era esperado, pois os valores de P obtidos nessa interação são independentes das fontes de P

utilizada, variável que influenciou de forma marcante os resultados do P extraível entre os três extratores utilizados neste trabalho. Resultado similar, de interação entre distribuições vertical e horizontal, também foi obtido por Duiker e Beegle (2006).

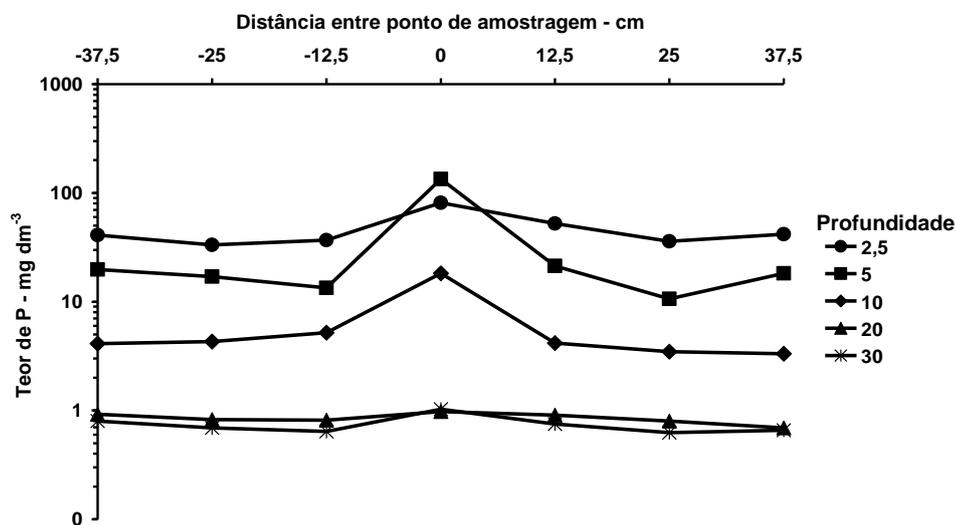


Figura 08. Distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e vertical avaliada até a profundidade de 30 cm do P extraído por Mehlich I, independentemente da fonte de fertilizante fosfatada e do modo de aplicação.

3.1.4.7. Interação entre fontes de fertilizante fosfatado, modos de aplicação do fertilizante e distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade.

A interação tripla entre fontes de P, modos de aplicação e distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade, independentemente da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, apresentou efeito significativo para os três extratores de P (Tabela 06).

Para o P extraído por Mehlich I e Resina esse efeito pode ser explicado pela maior extração de P quando a fonte foi o FNR, em comparação com o ST, e pelo gradiente de distribuição em profundidade em função do modo de aplicação, pois a aplicação a lanço na superfície do solo resultou em alta concentração de P nos primeiros centímetros do solo, com pequena distribuição até 10 cm de profundidade (Figura 09). Já para o extrator Bray 1, o comportamento foi o contrário, pois os maiores teores de P extraídos ocorreram nos tratamentos com aplicação do ST. Com relação ao modo de aplicação, quando a fonte foi o ST, o comportamento de distribuição do P foi semelhante ao dos outros dois extratores, mas para o FNR não foi observada a alta concentração de P quando a aplicação foi no sulco de

semeadura, na profundidade de 2,5 cm a 5 cm, como nos outros extratores (Figura 09), possivelmente devido a alta quantidade de adubo nessa região, reduzindo a possibilidade de solubilização (Novais et al., 2007; Sousa et al., 1999a) e, conseqüentemente, de extração de P por Bray 1, uma vez que ele só extrai o P que já reagiu com o solo.

Esses resultados mostram que a variável modo, quando analisada em conjunto com outras variáveis, apresenta influência na distribuição do P no solo, corroborando com a afirmação feita por Vadas et al. (2009), de que o modo de adubação influiria diretamente na distribuição do P no solo há anos sob SPD. Corroboram também com o estudo de Costa (2008), que encontrou teores médios de P, em um Argissolo Vermelho distrófico típico da região sul do Brasil, até duas vezes maiores para a camada de 5 cm a 10 cm nos solos sob SPD com aplicação do fertilizante no sulco de semeadura, comparada a aplicação do fertilizante a lanço, para a mesma dose de P aplicada.

Outra observação importante é quanto ao P avaliado por Mehlich I e Resina para o fertilizante aplicado no sulco de semeadura (Figura 9), onde se observa que na profundidade de 5 cm a 10 cm a quantidade extraída de P foi superior a aplicação lanço, principalmente quando a fonte de P foi o FNR. Isso indica uma maior distribuição para o P aplicado no sulco de semeadura quando comparada a distribuição obtida com a aplicação na superfície do solo. Quando foi utilizado o extrator Bray 1, os valores de P extraível para o P aplicado como ST se comportaram semelhante aos dos dois outros extratores, mas para o FNR, mesmo com o P colocado na camada de 5 cm a 10 cm, esse não reagiu com o solo. Essa distribuição em maior profundidade para aplicação do fertilizante no sulco de semeadura, possivelmente esta associada ao preparo que ocorre na linha de semeadura pela plantadeira, que atinge profundidade entre 8 cm e 10 cm, distribuindo o adubo aplicado anualmente no sulco de semeadura.

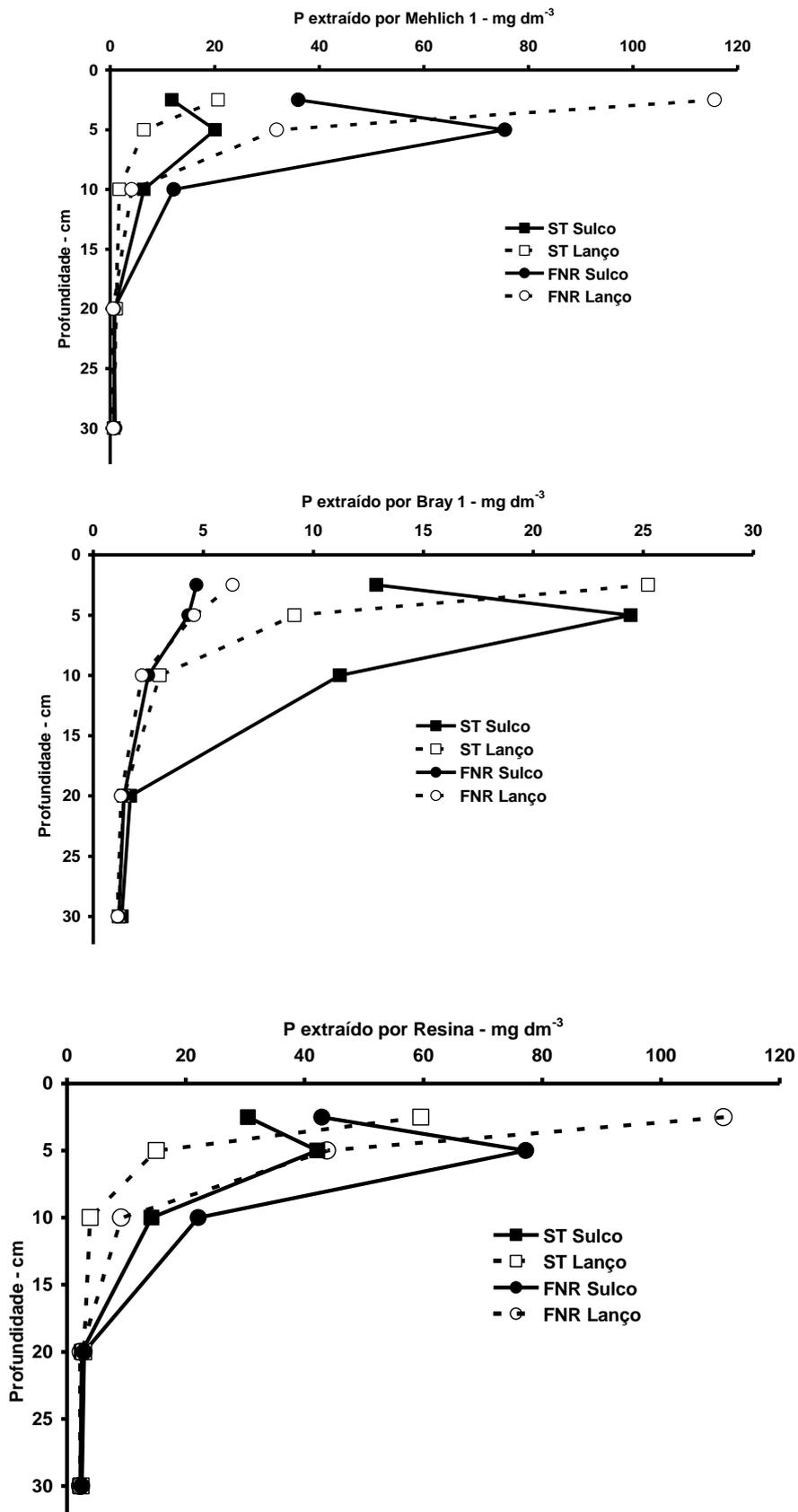


Figura 09. Distribuição vertical avaliada até 30 cm profundidade do P extraído por Mehlich I, Bray 1 e Resina para fontes de P (ST ou FNR) e modos de aplicação do fertilizante (Lanço ou Sulco), independentemente da distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho.

3.1.4.8. Interação entre fontes de fertilizante fosfatado, modos de aplicação do fertilizante e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho.

O efeito da interação entre as variáveis fontes de P, modo de aplicação e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, independente da distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade, também foi significativo, para os três extratores, na distribuição do P no perfil do solo (Tabela 06).

Para os extratores Mehlich I e Resina o comportamento da distribuição de P no sentido transversal a linha de semeadura foi muito semelhante, pois em ambos os extratores os teores de P extraídos foram maiores onde a fonte foi o FNR, principalmente na aplicação a lanço, enquanto que na aplicação no sulco de semeadura ocorreu uma extração muito superior no local onde o fertilizante foi aplicado (Figura 10).

Para o extrator Bray 1, o comportamento de distribuição de P onde a fonte foi o ST, em relação ao modo de aplicação e a distribuição horizontal, foi semelhante ao dos outros dois extratores, entretanto, quando a fonte foi o FNR, a quantidade de P extraída foi inferior em comparação com o ST e a distribuição no sentido transversal a linha de semeadura foi muito semelhante entre os dois modos de aplicação do fertilizante, não ocorrendo a alta concentração de P quando o fertilizante foi aplicado no sulco de semeadura (Figura 10). Isso também seria devido a alta quantidade de adubo no local do sulco de semeadura, resultando em menor velocidade de dissolução do FNR nesse local.

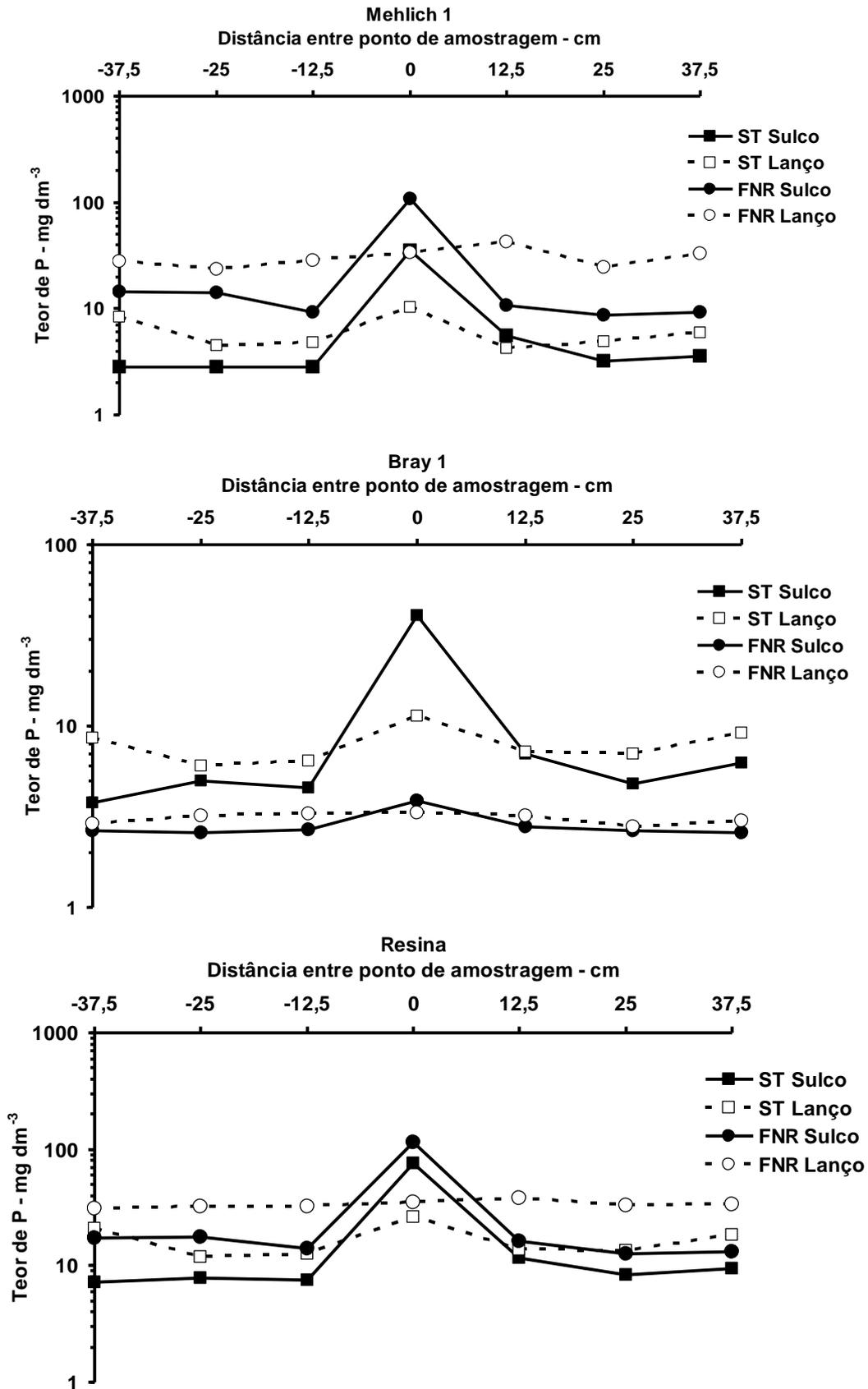


Figura 10. Distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho do P extraído por Mehlich I, Bray 1 e Resina para fontes de P (ST ou FNR) e modo de aplicação do fertilizante (lanço ou sulco), independentemente da distribuição vertical avaliada até 30 cm.

3.1.4.9. Interação entre fontes de fertilizante fosfatado, distribuição vertical avaliada até 30 cm de profundidade e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho.

O efeito da interação tripla entre fontes de P, distribuição vertical avaliada até a profundidade de 30 cm e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, independentemente do modo de aplicação do fertilizante fosfatado ao solo, foi altamente significativo na distribuição do P no perfil do solo para os métodos de extração Mehlich I e Bray 1, mas não foi significativo para a Resina (Tabela 06).

Para Mehlich I o comportamento de distribuição de P no solo foi diferente entre as fontes de P, pois os teores extraídos de P foram superiores onde a fonte foi o FNR, principalmente nas camadas mais superficiais do solo, entre 0 cm e 10 cm, com a redução acentuada na distribuição em profundidade, entre 10 cm e 30 cm, independente da fonte. No sentido transversal em relação a linha de semeadura, ambas as fontes apresentaram maiores teores de P no local do sulco de semeadura, até 10 cm de profundidade (Figura 11).

Para o método de Bray 1, os teores de P extraídos foram maiores quando da utilização do ST como fonte de P, apresentando uma distribuição horizontal bastante diferenciada entre 0 cm e 10 cm de profundidade, enquanto que para o FNR a distribuição horizontal foi mais uniforme e o gradiente de concentração em relação a profundidade de distribuição do P extraível foi menor (Figura 11).

Quanto a não significância dessa interação para o método da Resina, muito provavelmente está associada a maior capacidade desse método em extrair o P do solo que recebeu adubação fosfatada com fonte solúvel, o que reduziu a diferença entre as quantidades de P extraídas para as duas fontes de P, ST e FNR (Figura 11)

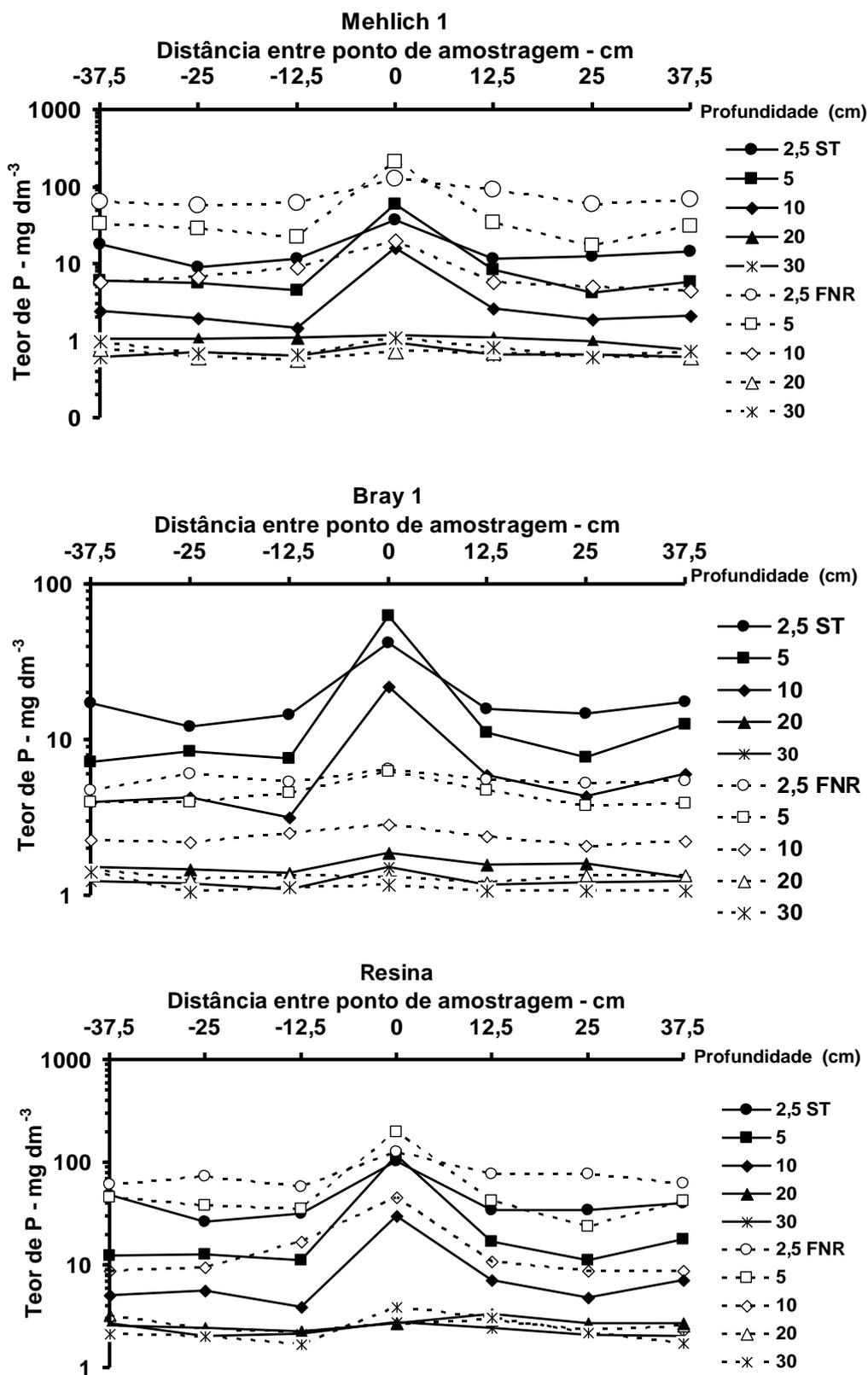


Figura 11. Distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e vertical avaliada até 30 cm de profundidade do P extraído por Mehlich I, Bray 1 e Resina para fontes de P (ST ou FNR), independentemente do modo de aplicação do fertilizante.

3.1.4.10. Interação entre modos de aplicação do fertilizante, distribuição vertical avaliada até a profundidade de 30 cm e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho.

A interação tripla entre modo de aplicação do fertilizante, distribuição vertical em profundidade avaliada até a profundidade de 30 cm e distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho, independentemente da fonte de P utilizada, apresentou efeito significativo na distribuição do P no perfil do solo, e comportamento de distribuição de P muito semelhante para os três extratores. Devido essa similaridade de comportamento dos extratores, uma vez que a variável fonte de P não está sendo considerada, apresentaremos só os resultados obtidos pelo método de Mehlich I (Figura 12).

Para o modo de aplicação a lanço, a distribuição horizontal do P extraível apresentou-se homogênea dentro de cada profundidade, decrescendo de 0 cm a 10 cm e ficando muito semelhante entre 10 cm e 30 cm. Na profundidade entre 2,5 cm e 5 cm a distribuição horizontal de P foi semelhante nos dois modos de aplicação, só diferindo na linha de semeadura, onde a aplicação do fertilizante no sulco resultou em maiores teores extraídos. Para a profundidade de 5 cm a 10 cm o teor de P distribuído horizontalmente no solo com aplicação a lanço foi inferior ao do com aplicação no sulco de semeadura.

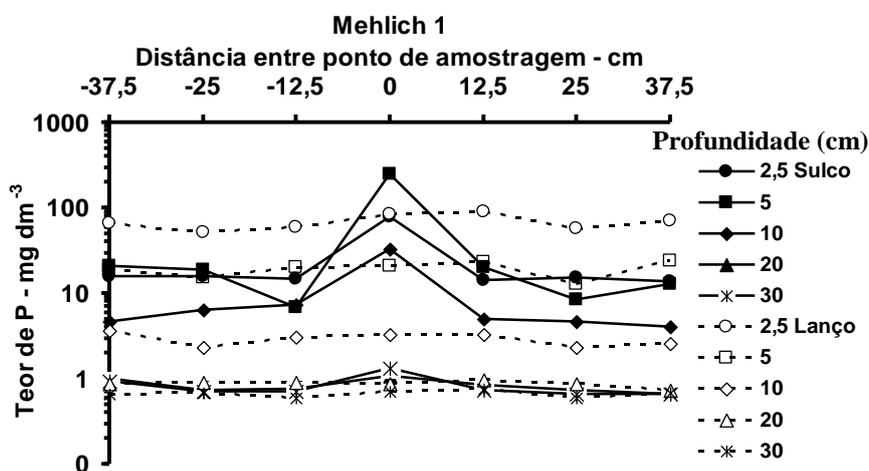


Figura 12. Distribuição horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e distribuição vertical avaliada até a profundidade de 30 cm do P extraído por Mehlich I para diferentes modos de aplicação do fertilizante, se a lanço ou no sulco de semeadura, independentemente da fonte de fertilizante fosfatado.

3.2. Correlações entre os extratores

As correlações entre os três extratores utilizados nesse trabalho foram altamente significativas ($P < 0,01$) (Tabela 11), independentemente da fonte de P utilizada. Entre os três extratores, considerando os tratamentos que receberam o ST como fonte de P, a Resina e o Bray 1 foram os que mais e menos extraíram P do solo, respectivamente, sendo que a Resina extraiu cerca de 2 vezes mais P do solo que os extratores Mehlich I e Bray 1. Esses resultados são coerentes com os de Sousa et al. (2006), que demonstraram que para o solo com teor de argila de 54 % e considerando um rendimento relativo de 90 %, o nível crítico de P para Mehlich I seria de 10 mg dm^{-3} e de Resina seria de 21 mg dm^{-3} , ou seja, o dobro, para fontes solúveis de P. Para extrator Bray 1, o nível crítico estabelecido para um solo com teor de argila de 54% foi de 12 mg dm^{-3} para fontes solúveis de P (Sousa e Lobato, 1988), ou seja, um pouco superior ao do Mehlich I, também não diferindo dos dados obtidos na Tabela 11.

Vale ressaltar que essas comparações de resultados dependem do tipo de Resina utilizada, pois, considerando os teores de P extraídos pelos extratores Resina e Mehlich I em estudo desenvolvido por Rheinheimer e Anghinoni (2001), o primeiro chegou a extrair até duas vezes menos que o segundo, mas a Resina usada foi apenas a trocadora de ânions e em membranas.

Tabela 11. Equações de regressão linear e coeficientes de correlação entre os valores de P extraível obtidos pelos diferentes extratores Mehlich I, Bray 1 e Resina, dos tratamentos que receberam adubação fosfatada com Superfosfato Triplo (ST) e Fosfato Natural Reativo (FNR).⁽¹⁾

Método de Extração		Equação de Regressão Linear	r
X	Y		
Superfosfato Triplo			
Mehlich I	Bray	$Y = 1,03x + 2,76$	0,96**
Bray	Resina	$y = 1,96x - 0,48$	0,97**
Mehlich I	Resina	$y = 2,07x + 4,38$	0,96**
Fosfato Natural Reativo			
Resina	Mehlich I	$y = 1,01x - 5,46$	0,93**
Bray	Mehlich I	$y = 25,29x - 58,15$	0,61**
Bray	Resina	$y = 24,49x - 49,76$	0,64**

** significativo a 1%

⁽¹⁾ 126 pares de valores de P, extraídos da camada de 0 cm a 10 cm do solo, utilizados para obter cada correlação.

Considerando os tratamentos que receberam o FNR como fonte de P, os extratores Mehlich I e Resina apresentaram valores de P extraído muito semelhantes, sendo que o Mehlich I extraiu apenas 1 % mais P do solo. A semelhança entre esses dois extratores é confirmada pelo fato de que ambos extraem cerca de 25 vezes mais P do solo que o extrator Bray 1 (Tabela 11). O Mehlich I superestimou o teor de P por sua característica de extração preferencial de compostos de Ca e por causar a dissolução ácida de resíduos de FNR (Raij, 2004). O teor de P superestimado pela Resina se deu possivelmente pela presença da Resina Trocadora de Cátions, que ao adsorver o Ca da solução, reduziu a concentração desse íon no meio o que facilitou a dissolução do FNR durante o processo de extração, que é de 16 horas sob agitação. O dreno obtido durante o processo de extração de P do solo pela Resina Trocadora de Anions, também pode ter contribuído para maior extração do P dos FNR, que são fontes de P de maior solubilidade quando comparadas aos fosfatos naturais de baixa solubilidade, como os de origem ígnea.

Segundo Schlindwein e Gianello (2008), uma característica importante do método de avaliação de disponibilidade do nutriente no solo para as plantas é a obtenção de valores relativamente altos do nutriente no solo, sendo que quanto maior, melhor, pois diminuiria a possibilidade do erro analítico e aumentaria a acuracidade da estimativa de fertilizante. Seguindo esse raciocínio, para os solos que receberam adubação fosfatada com ST, o método de Resina seria o melhor, enquanto que para os que receberam FNR, tanto Mehlich I quanto Resina seriam bons, caso esses valores não estivessem superestimados em relação ao nível crítico proposto para esses extratores.

Para se ter uma relação mais próxima dos valores de P extraível em uma faixa mais comum de resposta da plantas, foram selecionadas amostras de solo com teores de P até 42 mg dm^{-3} de P extraível por Mehlich I, faixa de maior concentração de dados, e até 10 cm profundidade, que foi até onde o P aplicado foi encontrado. Observou-se que a correlação de Mehlich I com Resina foi significativa ($P < 0,01$) considerando os dados de todos os tratamentos que receberam adubação fosfatada ou dos tratamentos separados por fonte de P (Figura 13), sendo que os coeficientes de correlação foram maiores no segundo caso. As equações de regressão linear mostram que a Resina extraiu 2,6 vezes mais P do solo que o extrator Mehlich I nos tratamentos que receberam ST, enquanto que nos que receberam FNR a Resina extraiu apenas 35% a mais de P que o Mehlich I, o que conduz a concluir que possivelmente o teor de P extraído pela resina também está superestimado.

Entretanto, contrariando esse resultado, estudo realizado por Sobral et al. (2008), relacionando esses mesmos extratores por regressão linear, apesar de ter revelado também uma correlação significativa entre eles ($P < 0,01$), mostrou que a Resina extraiu menos P do solo que Mehlich I, considerando os teores de P a partir de $11,6 \text{ mg dm}^{-3}$, e, quanto maior foi a quantidade de P no solo, maiores foram as diferenças entre os dois extratores. Esses autores, ao compararem seus resultados com os de um trabalho com resultados semelhantes aos deste, justificaram a diferença em função do teor e da mineralogia da argila. Enquanto o solo utilizado por Sobral et al. (2008) tinha baixo teor de argila, menos que 30 %, e predominância de caulinita, os solos do trabalho usado na comparação tinham maior teor de argila e, além da caulinita, incluíam óxidos de ferro e alumínio, semelhante ao solo usado neste trabalho. Ainda, segundo Schlindwein e Gianello (2008), em solos argilosos, a quantidade de P extraído pelo Mehlich I é menor, pois com o aumento do teor de argila a acidez é mais tamponada, diminuindo a capacidade de extração do extrator.

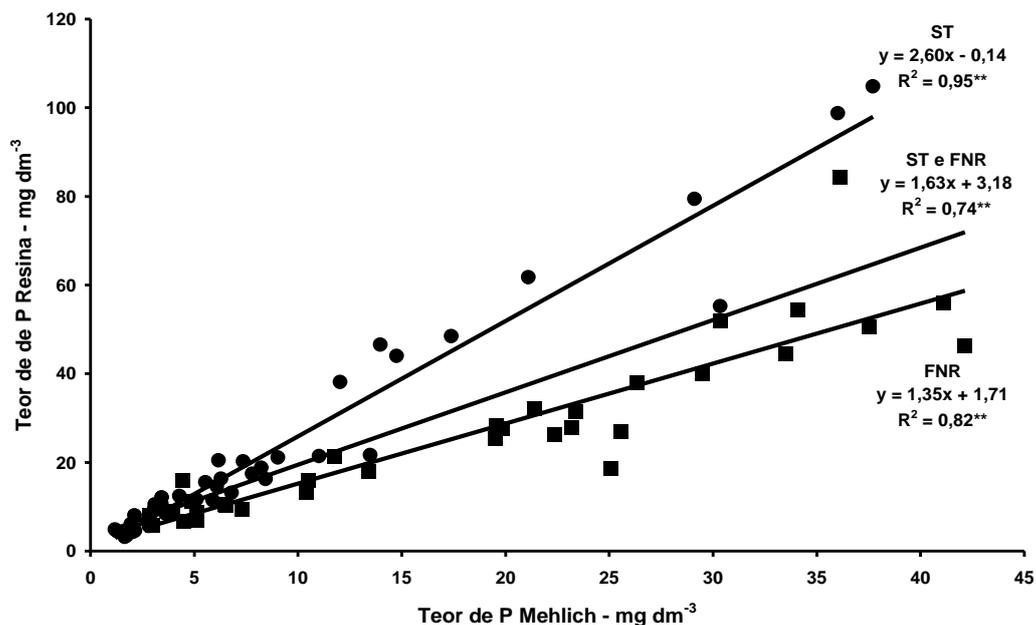


Figura 13. Correlação entre os extratores Mehlich I e Resina⁽¹⁾, considerando apenas os teores de P extraível por Mehlich I até 42 mg dm^{-3} e até 10 cm de profundidade nos solos, e considerando, em conjunto e separados, os tratamentos que receberam adubação fosfatada com Superfosfato Triplo (ST) e os com Fosfato Reativo (FNR).

⁽¹⁾ 41 e 33 pares de valores de P para ST e FNR, respectivamente, extraídos da camada de 0 cm a 10 cm do solo, utilizados para obter as correlações entre Mehlich I e Resina por fonte de P.

A correlação de Mehlich I com Bray 1 (Figura 14) também foi significativa (1 %), mas apenas quando foram considerados os dados dos tratamentos separados por fonte de P, sendo maior para os tratamentos adubados com ST. Pelas equações de regressão linear observa-se que os extratores Mehlich I e Bray 1 extraem teores semelhantes de P dos solos que receberam ST, sendo que o segundo extrai 8% a mais P do solo. Já nos solos adubados com o FNR, o extrator Mehlich I extraiu quase 10 vezes mais P que o Bray 1. Esse comportamento do método de Bray 1 em relação as fontes de P, mostra que o método de Mehlich I superestima o teor de P quando da utilização do FNR, dados corroborados por Novais e Smyth (1999), Gatiboni (2003), Sousa et al. (1999a,b), Schlindwein e Gianello, (2008) e Rajj (2004).

Esses resultados mostram que, para análise da disponibilidade de P em um Latossolo do Cerrado sob SPD por longo período, caso haja necessidade de substituição do método Mehlich I, padrão na região, tem-se como opção o Bray 1, independentemente se esse solo foi adubado com ST ou FNR.

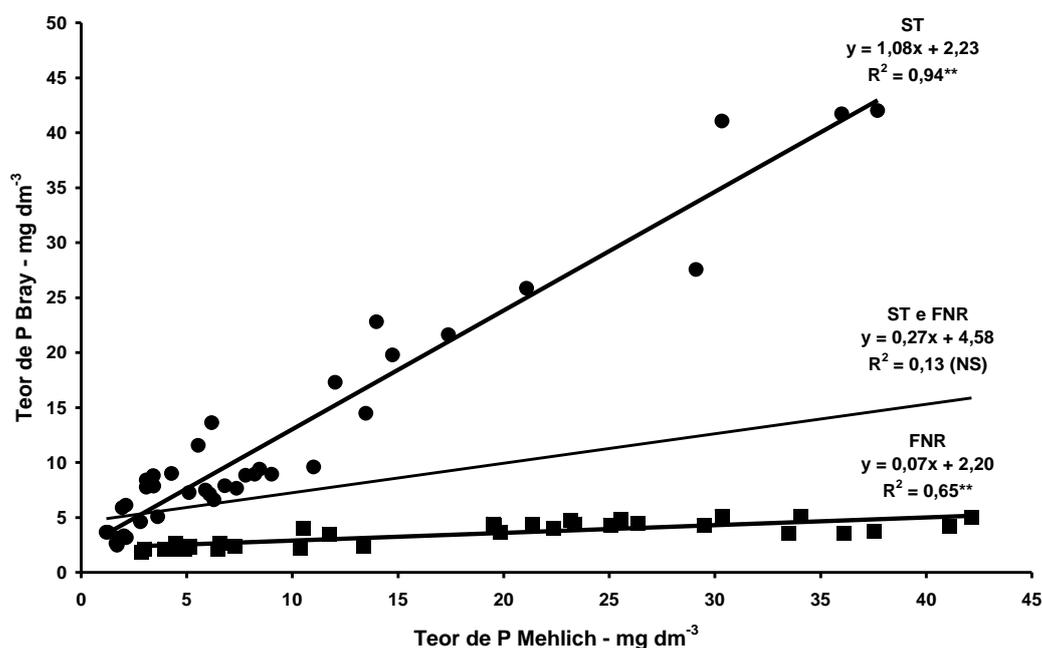


Figura 14. Correlações entre os extratores Mehlich I e Bray 1⁽¹⁾, considerando apenas os teores de P extraível por Mehlich I até 42 mg dm⁻³ e até 10 cm de profundidade nos solos, e considerando, em conjunto e separados, os tratamentos que receberam adubação fosfatada com Superfosfato Triplo (ST) e os com Fosfato Reativo (FNR).

⁽¹⁾ 41 e 33 pares de valores de P para ST e FNR, respectivamente, extraídos da camada de 0 cm a 10 cm do solo, utilizados para obter as correlações entre Mehlich I e Bray 1 por fonte de P.

3.3. Distribuição do P no solo e o rendimento de grãos

A distribuição de P nos sentidos vertical e horizontal de um solo sob SPD por um longo período pode variar de acordo como os modos de aplicação do fertilizante fosfatado e a fonte de P utilizada. Neste trabalho, as distribuições do P extraível avaliada por três extratores, em um Latossolo Vermelho distrófico do Cerrado sob SPD, cultivado por um período de 8 anos, com rotação de culturas de soja e milho a partir do terceiro cultivo, variando a fonte de P e o modo de aplicação do fertilizante, são representadas na figura 15. Os dados contidos nessa figura demonstram a interação quádrupla.

Observou-se que com os extratores Mehlich I e Resina, as distribuições de P no solo dos tratamentos que receberam ST e FNR foram muito semelhantes, sendo um pouco diferentes apenas os teores de P extraídos entre os métodos. Cabe salientar que os extratores Mehlich I e Resina, quando utilizados para determinação de P extraível em solos adubados com FNR, superestimaram os teores de P, o que pode explicar essa semelhança nas distribuições de P nos solos que receberam FNR e ST. Já o extrator Bray 1 mostrou uma diferença contrastante de distribuição do P no solo entre os tratamentos adubados com ST e FNR. Esse fato, já conhecido na literatura, mostra que, apesar da distribuição vertical e horizontal do FNR observada no perfil solo indicada pelos extratores de Mehlich I e Resina, o mesmo não está tão disponível para as plantas, pois os teores obtidos através do extrator de Bray 1 indicam que o FNR não reagiu totalmente com o solo, conforme também observado por Sousa et al. (1999b) em experimento conduzido a campo com a cultura da soja e o fosfato natural reativo de Gafsa.

Ainda com relação às fontes de P (Figura 15), os valores de P extraídos por Mehlich I e Bray 1 no perfil do solo quando a fonte de P foi o ST são semelhantes, enquanto que a Resina extraiu mais P que esses dois extratores. Contudo, os três extratores apresentaram comportamentos de distribuição horizontal e vertical de P no perfil do solo muito semelhantes nos tratamentos adubados com ST, só diferindo mesmo os valores de P extraídos. Quando a fonte de P foi o FNR, o comportamento da distribuição de P avaliada por Mehlich I e Resina foi semelhante, possivelmente associado a extração de P ainda não dissolvido dessa fonte no solo. Para o método de avaliação da disponibilidade de P no solo Bray 1, as distribuições horizontal e vertical do P no perfil do solo adubado com FNR foram bastante homogêneas, diferente das distribuições apresentadas pelos outros dois extratores. Essa diferença possivelmente está associada a menor velocidade de solubilização do FNR no solo, como indicada pelo extrator de Bray 1.

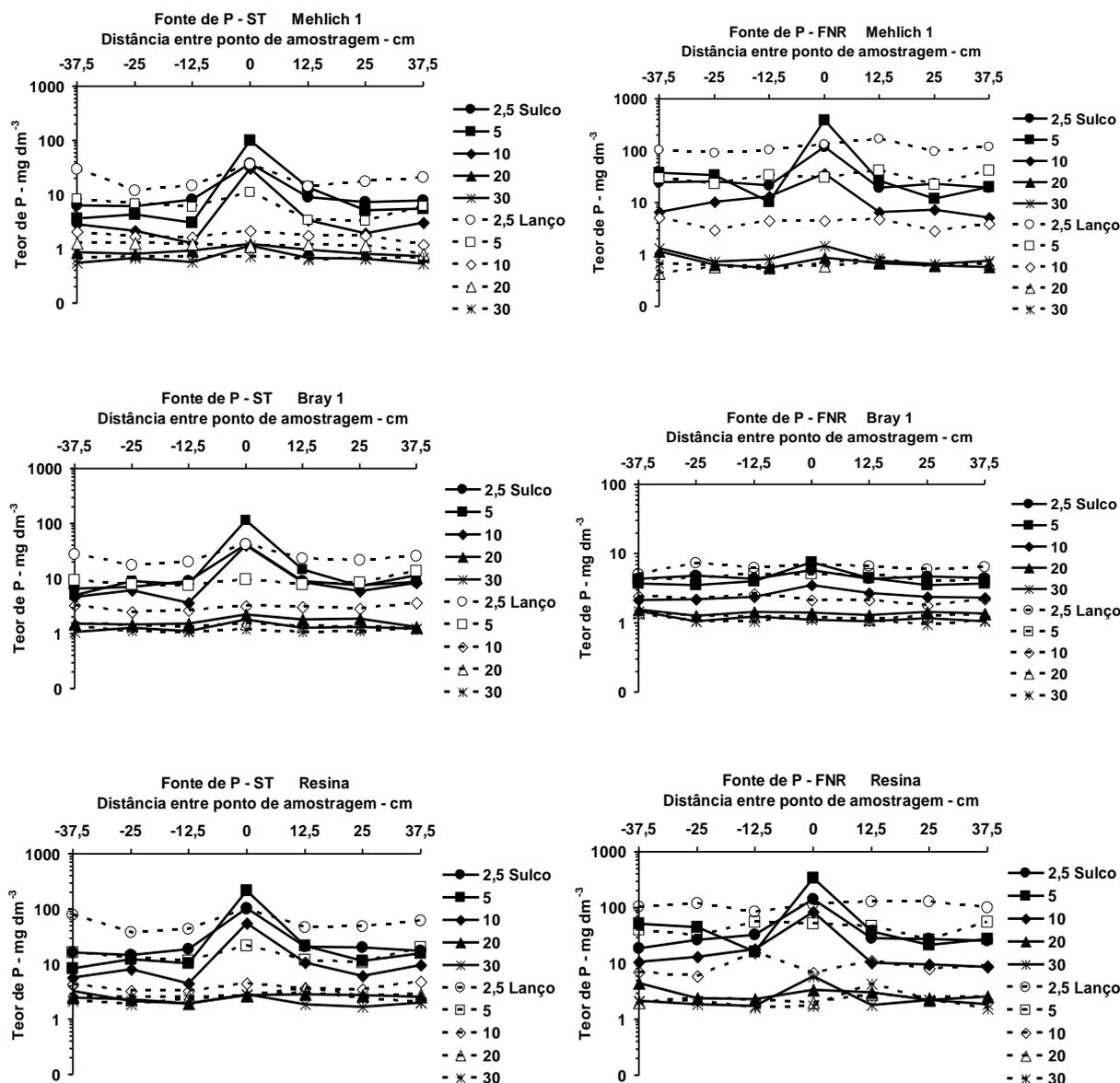


Figura 15. Distribuições do P extraível pelos métodos Mehlich I, Bray 1 e Resina, nos sentidos horizontal correspondente ao espaçamento da cultura do milho e vertical avaliada até a profundidade de 30 cm, para diferentes fontes de P, se Superfosfato triplo (ST) ou Fosfato natural reativo (FNR), e diferentes modos de aplicação do fertilizante, se a lanço ou no sulco de semeadura.

Com relação ao modo de aplicação, os extratores Mehlich I e Resina mostraram diferenças na distribuição do P no solo entre os tratamentos que foram adubados com P no sulco de semeadura e os a lanço na superfície. Essa diferença pode ser notada pelos teores de P mais elevados na linha de semeadura, correspondente ao ponto de amostragem 0 cm do eixo horizontal na Figura 15, e na profundidade de 5 cm dos tratamentos que receberam adubo fosfatado no sulco de semeadura. O extrator Bray 1, apesar de mostrar essa diferença de distribuição de P entre os dois modos de aplicação do ST ao solo, não mostrou quando a fonte

utilizada foi o FNR, sendo essa distribuição do P muito semelhante entre os dos modos de aplicação, possivelmente associada ao fato da reação com o solo ser menor no local do sulco, onde altas quantidades do fertilizante fosfatado estão concentradas, o que retarda a velocidade de dissolução do FNR.

Outra observação importante envolvendo os modos de aplicação do fertilizante no solo é com relação aos valores do P extraível na camada de 5 cm a 10 cm dos pontos avaliados fora do local do sulco. Nos tratamentos com aplicação dos fertilizantes fosfatados no sulco de semeadura, esses valores foram um pouco maiores aos encontrados nos tratamentos adubados com P a lanço na superfície do solo. Isso evidencia que, com a aplicação no sulco, o fertilizante fosfatado foi, de alguma forma, distribuído em maior quantidade nessa camada, possivelmente influenciado pelos preparos ocorridos anualmente no sulco feito pela plantadeira de plantio direto, que atinge profundidade entre 8 cm e 10 cm.

Devido a dificuldade de comparar as quantidades de P extraídas pelos diferentes extratores, como apresentado na Figura 15, com o rendimento de grãos acumulado nos 8 cultivos (Tabela 13), foram calculados os totais de P extraível, em kg de P_2O_5 ha^{-1} , acumulado no perfil do solo na camada até 30 cm e a distribuição relativa desse P até 10 cm de profundidade, em %, independentemente da distribuição horizontal (Tabela 12). Esses dados fornecem as diferentes quantidades de P extraível e acumulada para os diferentes extratores de P, fontes de P e modo de aplicação do fertilizante ao solo.

De acordo com a tabela 12, Bray 1 e Mehlich I extraíram quantidade semelhante de P dos tratamentos adubados com ST, entretanto Mehlich I chegou a extrair seis vezes mais P que Bray 1 nos tratamentos onde foram utilizados o FNR. A Resina extraiu maiores quantidades de P do que Bray 1 e Mehlich I quando a fonte de P utilizada foi o ST, entretanto, ela extraiu quantidades semelhantes de P ao do extrator de Mehlich I e superior ao Bray 1, nos tratamentos com FNR. Goedert et al. (1991), num experimento de campo com fosfatos naturais brasileiros, também obteve com o extrator Bray 1 os menores teores de P extraível do solo, e os mais altos pelo método Mehlich I. Dados semelhantes para os extratores Bray 1 e Mehlich I foram obtidos com o fosfato reativo de Gafsa, no período em que o FNR não havia reagido totalmente com o solo (Sousa et al., 1999b).

Tabela 12. Fósforo extraível da camada de 0 cm a 30 cm do perfil do solo, e distribuição relativa de P extraído contido na camada de 0 cm a 10 cm, avaliados pelos extratores Mehlich I, Bray 1 e Resina nos tratamentos que receberam adubação fosfatada com diferentes fontes de fósforo e modos de aplicação desse fertilizante ao solo.

Fonte de P	Modo de Aplicação	Extratores		
		Mehlich I	Bray 1	Resina
P extraível até 30 cm de profundidade – kg P₂O₅ ha⁻¹ ⁽¹⁾				
Superfosfato triplo	Lanço	22	30	60
Superfosfato triplo	Sulco	30	42	70
Fosfato natural reativo	Lanço	92	15	111
Fosfato natural reativo	Sulco	83	14	109
Distribuição relativa do P extraível até 10 cm de profundidade - % ⁽²⁾				
Superfosfato triplo	Lanço	81	79	79
Superfosfato triplo	Sulco	87	83	84
Fosfato natural reativo	Lanço	97	61	90
Fosfato natural reativo	Sulco	95	57	88

⁽¹⁾ No tratamento sem aplicação de P (testemunha), as quantidades de P extraíveis em kg P₂O₅ ha⁻¹ foram 5, 8 e 17, para os extratores Mehlich I, Bray 1 e Resina, respectivamente.

⁽²⁾ A quantidade extraída até a profundidade de 30 cm foi considerada como sendo 100%.

Tabela 13. Rendimento total acumulado dos oito cultivos da área, para diferentes fontes de fósforo e modo de aplicação do fertilizante ao solo ^{(1), (2)}.

Fonte de Fósforo	Modo de aplicação	Dose	Rendimento de grãos		
			Média de 5 cultivos de soja	Média de 3 cultivos de milho	Acumulado dos 8 cultivos
		kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ ano ⁻¹		t ha ⁻¹	
Superfosfato triplo	lanço	80	2,88	9,86	43,99
Superfosfato triplo	sulco	80	2,72	9,73	42,79
Fosfato natural reativo	lanço	80	1,79	7,99	32,90
Fosfato natural reativo	sulco	80	1,90	8,33	34,46
CV - %			4,3	2,0	2,5
Fonte de fósforo			1%	1%	1 %
Modo de aplicação			NS	NS	NS
Interação fonte de fósforo x modo de aplicação			5,7%	6,8%	5,0 %

⁽¹⁾ O rendimento de grãos total acumulado nos 8 cultivos do tratamento sem P foi de 3,74 t ha⁻¹.

⁽²⁾ O rendimento de grãos da soja para o tratamento onde se aplicou o superfosfato triplo, no sulco de semeadura, na dose de 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ ano⁻¹ no 7º cultivo foi de 3,3 t ha⁻¹, enquanto que, nesse mesmo tratamento, para a cultura do milho, no 8º cultivo o rendimento de grãos foi de 10,5 t ha⁻¹.

Avaliando a distribuição relativa do P extraído pelos três extratores (Tabela 12) nas camadas de 0 cm a 10 cm, calculados a partir dos dados da distribuição vertical até 30 cm e da horizontal correspondente ao espaçamento do milho, pôde-se observar que Mehlich I, Bray 1 e Resina apresentaram grande semelhança na distribuição de P extraível nos

tratamentos adubados com ST, concentrando nos primeiros 10 cm uma média de 82% do P_2O_5 encontrado nos 30 cm de profundidade. Quando a fonte de P foi o FNR e considerando apenas os extratores Mehlich I e Resina, essa média subiu para 92,5 % do P_2O_5 encontrado nos 30 cm de profundidade, enquanto que considerando o extrator de Bray 1, essa média foi de 59 %. Esses dados mostram uma alta estratificação do P no SPD, concentrando-se praticamente todo o P extraível nos dez primeiros centímetros do solo.

Apesar da elevada concentração de P extraível nas camadas superficiais do solo, os rendimentos de grãos obtidos com as culturas de soja e milho quando a fonte foi o ST são próximos do potencial máximo (Tabela 13). Isso evidencia que as plantas ativam controles fisiológicos, principalmente associados ao sistema radicular, como relações com microorganismos, dentre outros, para compensar essa excessiva localização do P observada no SPD.

A maior quantidade de P acumulada na camada superficial até 10 cm (Tabela 12) para os tratamentos adubados com o FNR, quando da utilização dos extratores Mehlich I e Resina, não é compatível com os rendimentos médios obtidos com o milho e soja no período de oito anos de cultivos. Nesses tratamentos, os rendimentos médios do milho e da soja foram de $8,16 \text{ t ha}^{-1}$ e $1,84 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente, enquanto que nos que receberam o ST como fonte de P foram de $9,80 \text{ t ha}^{-1}$ e $2,80 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente. Fica evidente que esses extratores possivelmente estejam superestimando o valor do P extraível dos solos adubados com FNR. Já o extrator Bray 1 mostrou um comportamento mais coerente para as duas fontes de P, ou seja, menor quantidade de P acumulado na camada superficial de 10 cm nos solos adubados com FNR e menor rendimento médio do milho e da soja nesses tratamentos, em relação aos que receberam ST, que apresentaram maior quantidade de P acumulado na camada do solo até 10 cm de profundidade e maior rendimento de grãos (Tabelas 12 e 13).

Essa diferença, estatisticamente significativa (Tabela 13), entre os rendimentos das culturas obtidos pelos tratamentos adubados com ST e os adubados com FNR, também foi constatada ao se observar os valores dos rendimentos acumulados nos oito cultivos, que foram, em média, de $43,39 \text{ t ha}^{-1}$ e $33,68 \text{ t ha}^{-1}$ para os tratamentos com ST e os com FNR, respectivamente. Bray 1, ainda assim, foi o único extrator que conseguiu demonstrar essa diferença por meio das quantidades de P extraídas dos solos nesses tratamentos, ou seja, menores para os tratamentos adubados com FNR (Tabela 13).

Para avaliar as relações entre rendimento de grãos das culturas e a quantidade de P extraída do solo pelos extratores, foram feitas regressões entre rendimentos acumulados de grãos nos 8 cultivos (Tabela 13) e a quantidade de P extraível até 10 cm para os métodos de

Mehlich I, Bray 1 e Resina (Tabela 12). As regressões para os métodos de Mehlich I e Resina foram negativas e altamente significativas ($r^2_a = 0,83$ e $r^2_a = 0,71$, respectivamente). Isso indica que quanto mais P acumulado no solo, como o que ocorreu quando a fonte de P foi o FNR, menor foi o rendimento total de grãos, corroborando mais uma vez que esses extratores superestimaram o P extraível, quando se utilizou o FNR. Para o método de Bray 1 a regressão entre o rendimento acumulado foi positiva e altamente significativa ($r^2_a = 0,65$), ou seja, quanto maior a quantidade de P extraível até 10 cm, maior o rendimento de grãos, sendo portanto um extrator mais indicado quando da utilização do FNR como fonte de P.

Na Tabela 13 também são apresentados os dados da relação entre o rendimento das culturas e o modo de aplicação do fertilizante fosfatado, independentemente da fonte de P utilizada. A média dos rendimentos dos oito cultivos para os tratamentos com adubação no sulco de semeadura e para os aplicados a lanço na superfície do solo foram de $38,63 \text{ t ha}^{-1}$ e $38,45 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente, ou seja, muito semelhantes, não apresentando diferença estatística.

Corroborando com esse raciocínio, em estudo sobre alternativas de aplicação do adubo fosfatado, Sousa e Lobato (1988), verificaram que, em longo prazo, a produção acumulada do milho ou soja é função do total de P aplicado, independente do modo como esta quantidade foi aplicada. Sousa et al. (2004), em seus estudos também constataram que, em longo prazo, considerando o efeito residual acumulado de vários cultivos, o modo de aplicação do fertilizante fosfatado parece não afetar o rendimento de culturas anuais. Model e Anghinoni (1992), em estudo sobre a reposta do milho a modos de aplicação de adubos, concluíram que os efeitos benéficos das aplicações mais localizadas dos adubos fosfatados no crescimento do milho foram detectados somente até a fase de florescimento.

Um comportamento importante observado em relação ao rendimento de grãos, foi quanto a interação do modo de aplicação do fertilizante com a fonte de P utilizada (Tabela 13). Quando a fonte de P foi o ST o rendimento de grãos para aplicação a lanço foi maior, enquanto que para o FNR esse comportamento foi inverso. Nenhum dos extratores utilizados para avaliar a disponibilidade de P no solo apresentou esse comportamento (Tabela 12). Essas informações evidenciam que outros fatores influenciam na absorção de P pelas culturas e conseqüente transformação em rendimento de grãos, como o volume do solo fertilizado com P (modo de aplicar o fertilizante, sistema de preparo do solo), a atividade de microorganismos, dentre outros, e que não são detectados por um simples método de avaliação da disponibilidade de P no solo.

4. CONCLUSÕES

- Há a distribuição, nos sentidos horizontal e vertical, do fósforo extraível no perfil do solo adubado anualmente, após oito anos sob sistema de plantio direto, independentemente do modo de aplicação e da fonte de fósforo, avaliado pelos extratores Mehlich I, Bray 1 e Resina.

- Ocorre a distribuição do fósforo extraível até 10 cm de profundidade dos solos adubados anualmente, após oito anos sob sistema de plantio direto, independentemente do modo de aplicação do fertilizante e da fonte de fósforo, avaliado pelos extratores Mehlich I, Bray 1 e Resina.

- O modo de aplicação do fertilizante ao solo influencia na distribuição do fósforo extraível, tanto no sentido vertical como no horizontal, sendo avaliado pelos extratores Mehlich I, Bray 1 e Resina. Para a aplicação a lanço na superfície do solo, a distribuição horizontal apresenta altos valores nas camadas superficiais, enquanto que no sulco de semeadura os maiores valores obtidos para o fósforo extraível são no local de aplicação do fertilizante, entre 3 cm e 10 cm de profundidade.

- Há diferença na distribuição do fósforo extraível no perfil do solo, tanto no sentido horizontal quanto no vertical, quando da utilização do superfosfato triplo ou fosfato natural reativo após oito anos de cultivos sob sistema de plantio direto, avaliado pelos extratores Mehlich I, Bray 1 e Resina.

- As correlações entre os métodos de avaliação da disponibilidade de P no solo Mehlich I, Bray 1 e Resina são altamente significativas ($P < 0,01$), independentemente da fonte de fósforo utilizada.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAVO, C.A.; GIRALDEZ, J.V.; ORDOÑEZ, R.; GONZALEZ, P.; TORRES, F. Perea. Long-term influence of conservation tillage on chemical properties of surface horizon and legume crops yield in a vertisol of Southern Spain. **Soil Science**. 172(2):141-148, 2007.

COSTA, S. E. V. G. de A. Distribuição de fósforo, de potássio e de raízes e rendimento de milho em sistemas de manejo de solo e da adubação em longo prazo. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2008. 106p.

DUIKER, S. W.; BEEGLE D. B. Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. **Soil & Tillage Research**, 88:30-41, 2006.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de Métodos de Análise de Solos. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

GATIBONE, L.C. Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas. 2003. 247f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GOEDERT, W. J.; REIN, T. A.; SOUZA, D. M. G. Avaliação Agronômica de Fontes de Fósforo para a Região dos Cerrados. In: Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1985-1987. Planaltina, DF: EMBRAPA – CPAC, 1991.

LINS, I. D. G. Improvement of soil test interpretations for phosphorus and zinc. Ph. D. thesis. Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 1987. 317 p.

MODEL, N.S.; ANGHINONI, I. Resposta do milho a diferentes modos de aplicação de adubos e técnicas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Campinas, v.16, p.55-59, 1992.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1999. p. 399.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). Fertilidade do solo. SBCS, Viçosa, 2007. 1017 p.

OLIVEIRA, M. C. N. de; BARBIN, D.; SILVA, E. S. da; MACEDO, J. R. de; CAPECHE, C. L.; HISSA, H. R. Estimativa dos parâmetros de uma função de co-variância no estudo da

variabilidade espacial do teor de cálcio no solo. **Revista de Matemática e Estatística**, São Paulo, v.24, n.4, p.117-132, 2006.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraídos com resina trocadora de íons. In: Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais, editado por B. van Raij, J. C. de Andrade, H. Cantarella e J. A. Quaggio. Campinas, Instituto Agronômico, p. 189-199, 2001.

RAIJ, B. van. Métodos de Diagnose de Fósforo no Solo em Uso no Brasil. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S. R. e (Ed.). Fósforo na Agricultura Brasileira. Piracicaba – SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p.563-587, 2004.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**., Brasília, v.36, n.1, p.151-160, jan. 2001.

SÁ, J. C. D. M. Adubação fosfatada no Sistema Plantio Direto. In: YAMADA, T., ABDALLA, S. R. S. Anais do Simpósio sobre Fósforo na Agricultura Brasileira: Fósforo na Agricultura Brasileira. Piracicaba – SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 2004. p.201-222.

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**, 32:2037-2049, 2008.

SELLES, F.; KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; ZENTNER, R. P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian oxisol under different tillage systems. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v 44, p. 23-34, 1997.

SOBRAL, L. F.; SILVEIRA, K. R. da; VIANA, R. D. Correlações entre os métodos Mehlich I, Mehlich 3 e resina para análise de P e K em solos dos tabuleiros costeiros. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 35, Embrapa Tabuleiros Costeiros, maio 2008.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. Adubação Fosfatada. In: Simpósio sobre o cerrado; savanas. Alimento e energia. 6., Brasília, DF, 1982. Planaltina, EMBRAPA – CPAC, p.33-60, 1988.

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

SOUSA, D. M. G. de; REIN, T. A.; LOBATO, E.; SOARES, W. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na região dos cerrados. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 27, Brasília-DF, Ciência do solo e qualidade de vida: anais. Planaltina: Embrapa Cerrados. CD-ROM. 1999a.

SOUSA, D. M. G. de; REIN, T. A.; LOBATO, E. Eficiência agronômica do fosfato natural de Gafsa em um latossolo de cerrado com a cultura da soja. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 27, Brasília-DF, Ciência do solo e qualidade de vida: anais. Planaltina: Embrapa Cerrados. CD-ROM. 1999b.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). Cerrado: Correção do solo e Adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. p.147-168, 2004.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; REIN, T. Recomendação de adubação fosfatada com base na capacidade tampão de fósforo do solo para a região do cerrado. In: FertBio 2006, Bonito – MS, Anais. 2006.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM – SAS. 9.1 Version for Windows.

VADAS, P.A.; MALLARINO, A.P.; MCFARLAND, A. The importance of sampling depth when testing soils for their potential to supply phosphorus to surface runoff. Disponível em: http://www.sera17.ext.vt.edu/Documents/Soil_Sampling_Depth_for_P.pdf.

Acesso em: 09/01/2009.