

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**

**Liberação de fósforo de fertilizantes mineral e organomineral  
e sua influência na fase inicial da cultura do milho**

**ROBERVALDO SOARES DA SILVA**

Dourados  
Mato Grosso do Sul  
2018

Liberação de fósforo de fertilizantes mineral e organomineral e sua  
influência na fase inicial da cultura do milho

ROBERVALDO SOARES DA SILVA  
Engenheiro Agrônomo

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. ALESSANDRA MAYUMI TOKURA ALOVISI

Co-Orientador: Dr. CARLOS HISSAO KURIHARA

Dissertação de Mestrado apresentada à  
Universidade Federal da Grande Dourados,  
como parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Agronomia – Produção  
Vegetal, para obtenção do título de Mestre  
em Agronomia.

Dourados  
Mato Grosso do Sul  
2018

Liberação de fósforo de fertilizantes mineral e organomineral e sua  
influência na fase inicial da cultura do milho

Robervaldo Soares da Silva

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título  
de MESTRE EM AGRONOMIA

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).**

S586L Silva, Robervaldo Soares da  
Liberação de fósforo de fertilizantes mineral e organomineral e sua influência na fase inicial da cultura do milho / Robervaldo Soares da Silva. –2018.  
84 f. : il.

Orientadora: Alessandra Mayumi Tokura Alovisi.  
Co-orientador: Carlos Hissao Kurihara.  
Dissertação (Mestrado em Agronomia)–Universidade Federal da Grande Dourados, 2018.

1. *Zea mays* L. 2. Fracionamento de Fósforo. 3. Disponibilidade de Fósforo. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com dados fornecidos pelo autor  
©Todos os direitos reservados. Permitido a publicação parcial desde que citada a fonte.

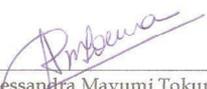
**LIBERAÇÃO DE FÓSFORO DE FERTILIZANTES MINERAL E  
ORGANOMINERAL E SUA INFLUÊNCIA NA FASE INICIAL DE  
DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DO MILHO**

por

Robervaldo Soares da Silva

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título  
MESTRE EM AGRONOMIA

Aprovada em: 28/09/2018

  
Prof.<sup>a</sup>. Dra. Alessandra Mayumi Tokura Alovise  
Orientador – UFGD

  
Prof. Dr. Carlos Hissao Kurihara  
EMBRAPA

  
Dr. Douglas de Castilho Gilti  
FUNDAÇÃO MS

  
Prof.<sup>a</sup>. Dra. Elisângela Dupas  
UFGD

## **DEDICATÓRIA**

### **Agradeço...**

Em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

À minha esposa Lucimara Oliveira Soares que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldade.

Aos meus filhos Maria Eduarda e Mateus, vocês são a razão da minha vida.

Aos meus pais Cícero Laurindo e Iná Maria Soares, que apesar das dificuldades da vida sempre incentivaram e deram condições para eu estudar.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da UFGD pela oportunidade concedida.

À CAPES pelos recursos financeiros concedidos durante o período de estudo.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Alessandra Mayumi Tokura Alovisi, pelo exemplo de otimismo, dedicação e amor ao ensino. Por me ensinar a amar a Ciência do Solo.

Ao meu co-orientador, Dr. Carlos Hissao Kurihara (EMBRAPA AGROPECUÁRIA OESTE) pelas suas contribuições intelectuais.

Ao Técnico de laboratório Mário Kozima (EMBRAPA AGROPECUÁRIA OESTE) pelos ensinamentos de metodologias e cálculos durante as análises laboratoriais.

Aos meus colegas de mestrado Alves Alexandre Alovisi e Valdenio Araújo.

Ao Sr. Teodoro Pszepiura (Laboratório de Solo AP AgroSciences), por ter me incentivado a estudar e cedido o laboratório para que pudesse realizar as análises laboratoriais.

Aos técnicos de laboratório, João Augusto Machado, Jhiony Veron, Lúcio Gonzaga e Vinicius Camargo pelas ajudas laboratoriais, amizade e conselhos nas horas de nervosismo dentro do laboratório.

Enfim, meu muito obrigado a todos que contribuíram para a execução deste trabalho; para minha formação pessoal e acadêmica.

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| RESUMO.....   | v  |
| ABSTRACT.....   | vi |
| 1. INTRODUÇÃO .....   | 7  |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....   | 9  |
| 2.1 Milho .....   | 9  |
| 2.2 Cerrado .....   | 10 |
| 2.3 Fósforo no solo.....  | 11 |
| 2.4 Importância do fósforo para cultura do milho .....  | 14 |
| 2.5 Fontes de fósforo e modos de aplicação .....  | 14 |
| 2.6 Fracionamento sequencial de fósforo no Solo.....  | 16 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS .....   | 20 |
| 3.1. Localização e caracterização da área experimental.....   | 20 |
| 3.2 Delineamento experimental e tratamentos.....  | 21 |
| 3.3 Condução do Experimento .....   | 21 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 25 |
| 4.1 Formas de fósforo no solo .....   | 26 |
| 4.1.1 Latossolo Distrófico Típico (LVd).....  | 26 |
| 4.1.1.1 P Lábil do Solo (PRTA, $\text{PiNaHCO}_3$ e $\text{PoNaHCO}_3$ ).....   | 26 |
| 4.1.1.2 P Moderadamente Lábil do Solo ( $\text{PiNaOH}_{0,1}$ , $\text{PoNaOH}_{0,1}$ , $\text{PiNaOH}_{0,5}$ e $\text{PoNaOH}_{0,5}$ ).....  | 32 |
| 4.1.1.3 P Não Lábil do Solo ( $\text{PiHCl}$ e P residual) .....  | 37 |
| 4.1.2 Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf).....   | 40 |
| 4.1.2.1 P Lábil do Solo (PRTA, $\text{PiNaHCO}_3$ e $\text{PoNaHCO}_3$ ).....   | 42 |
| 4.1.2.2 P Moderadamente Lábil do Solo ( $\text{PiNaOH}_{0,1}$ , $\text{PoNaOH}_{0,1}$ , $\text{PiNaOH}_{0,5}$ e $\text{PoNaOH}_{0,5}$ ) ..... | 46 |
| 4.1.2.3 P Não Lábil do Solo ( $\text{PiHCl}$ e P residual) .....  | 51 |
| 4.2 Parâmetros avaliados de plantas de milho .....  | 54 |
| 4.2.1 Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd).....   | 54 |
| 4.2.2 Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf).....   | 61 |
| 5. CONCLUSÕES.....  | 69 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 70 |

## RESUMO

Entre os nutrientes, o fósforo é um dos elementos de grande importância para o desenvolvimento e produção do milho, uma vez que sua disponibilidade em condições naturais é muito baixa, devida ao material de origem e a elevada capacidade de fixação de P nos solos. No solo, o fósforo é encontrado na forma inorgânica e orgânica e o fornecimento de P pode ser realizado por vários tipos de fertilizantes, entre eles o mineral e organomineral. Objetivou-se com o presente trabalho quantificar as frações inorgânicas e orgânicas de fósforo em solos de textura distinta, em função do uso de fonte de P mineral e organomineral, cultivado com milho. O experimento foi conduzido na Embrapa Agropecuária Oeste, em Dourados-MS e foi utilizado dois solos: um Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), de textura média e um Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf), de textura argilosa. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial. Para as frações de P no solo, o delineamento utilizado foi o DIC, em esquema fatorial 2x4x5 para cada solo, onde os tratamentos foram constituídos de duas fontes de P (mineral e organomineral), quatro doses de P (0, 40, 80 e 120 mg kg<sup>-1</sup> de P) e cinco épocas de avaliação (0, 7, 14, 28 e 49 dias após a emergência), com quatro repetições. Para as variáveis diâmetro do colmo e alturas de plantas os tratamentos foram dispostos em DIC, em esquema fatorial 2x4x10, para cada solo e os tratamentos foram constituídos de duas fontes de P (mineral e organomineral), quatro doses de P (0, 40, 80 e 120 mg kg<sup>-1</sup> de P) e dez dias de avaliação (4, 9, 14, 18, 23, 28, 32, 37, 42 e 49 dias após a emergência - DAE), com quatro repetições. Para as variáveis área foliar (AF), massa seca de folhas (MSF), massa seca de colmo (MSC), massa seca da parte aérea (MSPA) e P acumulado na parte aérea (P acumulado), o delineamento foi disposto em DIC em esquema fatorial 2x4, sendo duas fontes de P (mineral e organomineral) e quatro doses de P (0, 40, 80 e 120 mg kg<sup>-1</sup> de P), com quatro repetições. As variáveis analisadas foram: altura de plantas, diâmetro de colmo, matéria seca de folha (MSF), massa seca de colmo (MSC), massa seca da parte aérea (MSPA), P acumulado na MSPA e as frações inorgânicas e orgânicas de P. O fósforo que foi adicionado às amostras dos solos, em ambas as fontes de P, incrementou principalmente a fração não lábil e, em menor proporção, as frações que compõem o P lábil. De modo geral, em ambos os solos estudados, o P lábil foi maior quando utilizou a fonte mineral. Para o P moderadamente lábil, no solo LVd, os teores de  $P_{iNaOH\ 0,1}$  e  $P_{iNaOH\ 0,5}$  foram maiores quando utilizou a fonte mineral e o  $P_{oNaOH\ 0,5}$  com o uso da fonte organomineral, no LVdf os maiores teores de  $P_{iNaOH\ 0,1}$  e  $P_{oNaOH\ 0,1}$  foram encontrados quando utilizou a fonte mineral e o  $P_{oNaOH\ 0,5}$  com o uso da fonte organomineral. Nas frações não lábeis a fonte organomineral propiciou maiores teores de  $P_{iHCl}$  em ambos os solos utilizados e o P residual foi a fração predominante, independente da fonte de P utilizada. Apesar das duas fontes conterem a mesma quantidade de fósforo, a fonte mineral disponibilizou maior teor de P, refletindo nos maiores valores de diâmetro do colmo, alturas de plantas, AF, MSF, MSC, MSPA e P acumulado nas plantas de milho.

**Palavras-chave:** *Zea mays L.*; fracionamento de P; disponibilidade de P

## ABSTRACT

Among the nutrients, phosphorus is one of the elements of great importance for the development and production of maize, since its availability under natural conditions is very low due to the high P fixing capacity in soils. In the soil, phosphorus is found in inorganic and organic form and the supply of P can be realized by several types of fertilizers, among them the mineral and organomineral. The objective of this work was to quantify the inorganic and organic phosphorus fractions in soils of different texture, as a function of the use of mineral and organomineral P sources cultivated with maize. The experiment was conducted at Embrapa Agropecuária Oeste, in Dourados-MS, and two soils were used: a sandy textured Latosol (LVd) with a average texture and a clayey Latosol (LVdf). The experimental design was completely randomized (DIC), in a factorial scheme. For the P fractions in the soil, the design was DIC, in a 2x4x5 factorial scheme for each soil, where the treatments consisted of two sources of P (mineral and organomineral), four P (0, 40, 80 and 120 mg kg<sup>-1</sup> of P) and five epochs (0, 7, 14, 28 and 49 days after emergence) with four replicates. For the variables stem diameter and plant heights, the treatments were arranged in DIC, in factorial scheme 2x4x10, for each soil and the treatments were composed of two sources of P (mineral and organomineral), four doses of P (0, 40, 80 and 120 mg kg<sup>-1</sup> of P) and 10 days of evaluation (4, 9, 14, 18, 23, 28, 32, 37, 42 and 49 days after emergence), with four replicates. For the variables leaf area (FA), leaf dry mass (MSF), stem dry mass (MSC), shoot dry mass (MSPA) and P accumulated in shoot (P accumulated), the design was set out in DIC in a 2x4 factorial scheme, with two P sources (mineral and organomineral) and four P doses (0, 40, 80 and 120 mg kg<sup>-1</sup> P), with four replicates. The variables analyzed were corn height, stalk diameter, leaf dry matter (MSF), stem dry mass (MSC), dry shoot mass (MSPA), accumulated P in MSPA and inorganic and organic fractions of P. The phosphorus that was added to the soil samples in both sources of P increased mainly the non-labile fraction and, to a lesser extent, the fractions that make up the labile P. In general, in both studied soils, the labile P was higher when using the mineral source. For the moderately labile P, in the LVd soil, the contents of PiNaOH 0.1 and PiNaOH 0.5 were higher when using the mineral source and the PoNaOH 0.5 with the use of the organomineral source, in the LVdf the highest contents of PiNaOH 0.1 and PoNaOH 0.1 were found when using the mineral source and PoNaOH 0.5 with the use of the organomineral source. In the non-labile fractions, the organomineral source provided higher levels of PiHCl in both soils and residual P was the predominant fraction, regardless of the P source used. Although the two sources contained the same amount of phosphorus, the mineral source provided higher P content, reflecting higher values of stem diameter, plant height, FA, MSF, MSC, MSPA and P accumulated in maize plants.

Key words: *Zea mays* L.; P fractionation; P availability.

## 1 INTRODUÇÃO

No cenário mundial, o Brasil é o terceiro produtor de milho, sendo superado pelos EUA e China. Atualmente, o país é o segundo exportador de milho, exportando em torno de 35 milhões de toneladas (USDA, 2018), ultrapassado somente pelos Estados Unidos.

O Cerrado brasileiro possui um dos fatores mais importante para a produção de alimentos: o clima. O Cerrado responde por mais de 31% da produção nacional de milho. A ocupação agrícola da região iniciou em meados de 1970 e esse destaque excepcional está relacionado à adoção de tecnologias, como técnicas de correção, adubação, manejo do solo e utilização de variedades adaptadas a baixas latitudes (EMBRAPA, 2005).

Segundo dados do IBGE (2017), o Estado de Mato Grosso do Sul é o quarto produtor nacional do grão, com uma área cultivada de 1.802.275 ha. Desse total, 98,35% é utilizada na semeadura da segunda safra e apenas 1,65% na primeira safra. De acordo com a Pesquisa Agrícola Municipal (PAM), feita pelo IBGE (2017), a produção total estimada no ano de 2017 foi de 9.821.727 de toneladas, com rendimento médio de 9.110 kg ha<sup>-1</sup> na 1ª safra e 5.299 kg ha<sup>-1</sup> na 2ª safra.

Os solos de Cerrado, em sua maioria são altamente intemperizados, apresentam baixos teores de nutrientes e altos índices de acidez, o que dificulta o desenvolvimento do sistema radicular em profundidade (BROCH e RANNO, 2009). Essa limitação ocorre devido à fração argila possuir baixa atividade química e de troca de cátions, elevada saturação de alumínio e baixa disponibilidade de cálcio, magnésio, potássio e fósforo (EMBRAPA, 2005).

Entre os elementos essenciais, o fósforo (P) é um dos nutrientes de maior importância para a produção agrícola nos solos da região do Cerrado, uma vez que, sua disponibilidade, em condições naturais, é muito baixa para o favorável desenvolvimento das plantas cultivadas para a produção de alimentos, fibras, biocombustíveis, madeira e carne. Assim, a adubação fosfatada é prática indispensável no estabelecimento e manutenção do sistema agrícola da região (SOUZA et al., 2016).

A adubação fosfatada, além de necessária para elevar a disponibilidade de P para as plantas, é importante por mantê-la ao longo das safras agrícolas, por adições periódicas que reponham, ao menos, o P que foi extraído por ocasião das

colheitas. No entanto, no Cerrado, diversos fatores interferem para que a eficiência da adubação fosfatada seja baixa, sendo o principal deles a elevada capacidade de fixação de P na fase sólida dos solos (NUNES, 2014).

Os solos podem apresentar de 100 a 2.500 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo total, na camada arável. Todavia, qualquer que seja a classe de solo, a concentração de fósforo em solução é baixa, normalmente entre 0,1 e 1,0 kg ha<sup>-1</sup>, dado a elevada tendência de remoção do fósforo da solução, tanto por precipitação quanto por adsorção com compostos de Fe, Al e Ca (FURTINI NETO et al., 2001).

No solo, o fósforo é encontrado na forma inorgânica (Pi) e orgânica (Po), e vários fatores contribuem para manutenção da disponibilidade de P para as plantas, entre eles, a adubação fosfatada (TIECHER et al., 2012; GATIBONI et al., 2013; LEITE, 2015). O fornecimento de P pode ser realizado por vários tipos de fertilizantes disponíveis no mercado, entre eles o mineral e organomineral.

O fertilizante organomineral, comparado ao fertilizante mineral apresenta um potencial químico reativo relativamente inferior; porém, sua solubilização é gradativa no decorrer do período de desenvolvimento da cultura, de forma que a eficiência agrônômica pode se tornar maior quando comparado com os fertilizantes minerais solúveis (KIEHL, 2008).

Uma das maneiras de caracterizar o P no solo seria através do fracionamento, que apresenta vantagens na obtenção de informações sobre a disponibilidade, em curto e longo prazo, por meio da determinação das frações de P de vários graus de disponibilidade para as plantas. Este método consiste de um conjunto de extrações sequenciais de P em uma mesma amostra, em cuja ordem são usadas substâncias com capacidade crescente de extração. No caso do P, são usados extratores que estimam desde as formas lábeis até as formas recalcitrantes (GATIBONI, 2003; LOPES, 2014).

Desta forma, objetivou-se com este trabalho quantificar as frações inorgânicas e orgânicas de fósforo em solos de textura distinta, em função do uso de fonte mineral e organomineral e seu efeito sobre a cultura do milho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma gramínea tropical originária do México, sendo o terceiro cereal mais cultivado no mundo, com origem no teosinto. É cultivado há mais de 8.000 anos no continente americano e os principais produtores são os EUA, China, Índia, Brasil, França, Indonésia e África do Sul. A cultura é representada por variados genótipos e possui grande adaptabilidade, o que permite seu cultivo em climas tropicais, subtropicais e temperados (BARROS e CALADO, 2014).

A produção nacional de milho na safra 2016/17 foi estimada em 92,8 milhões de toneladas; desse total, 63,5 milhões correspondem ao milho de segunda safra e 30,3 milhões ao milho de primeira safra e a projeção para safra 2026/2027 é de 118,8 milhões de toneladas. Entre os estados produtores, destacam Mato Grosso (26,9%), Paraná (19,2%), Goiás (10,6%), Mato Grosso do Sul (10,0%), Minas Gerais (8,4%), Rio Grande do Sul (6,6%) e São Paulo (4,5%). Estes estados têm uma produção estimada em 79,9 milhões de toneladas e contribuem com 86,2% na oferta do grão (CONAB, 2017).

A região Centro Sul é considerada um grande celeiro na produção do grão, sendo destinado principalmente para os setores de agroindústria e nutrição animal (GILO et al., 2011).

De acordo com relatório anual da USDA (2018), o Brasil apesar de ser o terceiro produtor e ter a terceira maior área plantada, apresenta produtividade média considerada baixa, quando comparada à de outros países produtores. Diversos fatores contribuem para a baixa produtividade, sendo as mais importantes relacionadas à limitação por fertilidade do solo, clima, nutrição da planta, densidade populacional e arranjo das plantas (CRUZ et al., 2008).

O grão é fonte de matéria-prima para a produção de diversos produtos, e aproximadamente 70% do milho produzido no mundo e entre 70 e 80% do milho produzido no Brasil é destinada para a cadeia produtiva de suínos e aves (DUARTE et al., 2000). Na safra 2015/2016, o milho correspondeu a 36% do total de produção entre as principais culturas produzidas no Brasil (soja, milho total, arroz, trigo, feijão total e algodão em caroço), sendo superado somente pela cultura da soja (CONAB, 2017).

## 2.2 Cerrado

Com área de 2.036.448 km<sup>2</sup>, o cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul e ocupa cerca de 22% do território nacional, abrangendo os estados de Tocantins, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Bahia, Minas Gerais, Piauí, Maranhão, Rondônia, São Paulo, Paraná e Distrito Federal, além dos encaves no Amazonas, Roraima e Amapá (BRASIL, 2018).

Com um clima tropical sazonal de inverno seco, a região possui temperaturas médias que variam entre 22 à 23°C e as temperaturas máximas absolutas mensais não sofrem variações durante o ano, mas podem chegar a 40°C (MARCUIZZO et al., 2012).

A precipitação anual fica em torno de 1.200 a 1.800 mm, com maior incidência pluviométrica nos meses de outubro a março (primavera e verão). No entanto, veranicos (curtos períodos de seca) podem ocorrer durante a estação das chuvas, causando perdas significativas na produção agrícola (COUTINHO, 2002).

De acordo com Lopes e Guilherme (1994), os solos predominantes no cerrado são: Neossolos Quartzarênicos (15,2%), Argissolos (15,1%) e Latossolos (46%). Macedo (1996) também enfatiza que 50% da área do Cerrado brasileiro é formado por Latossolos. Entre os tipos de Latossolos, o percentual formado por Latossolo Vermelho Distrófico é de 17% (GOEDERT et al., 1985).

Os Latossolos são altamente intemperizados, com baixa fertilidade natural, elevada acidez, com predominância de argilas de baixa atividade como caulinitas, oxidróxidos de ferro e alumínio (SOUSA e LOBATO, 2004). Estes solos são intemperizados, profundos, com boa drenagem, características típicas de regiões equatoriais e tropicais (EMBRAPA, 2005). Também apresentam baixa capacidade de troca de cátions, a qual é dependente da matéria orgânica (GOEDERT et al., 1980).

No Cerrado, é possível encontrar textura de solo que varia de 16 a 85% de argila e 88% com classe textural definida como franco-arenosos, argilosos, franco-argilo-arenosos e franco argilosos (MENDES, 1967; IAIA, 2003; ROBOREDO, 2005). Os solos desse bioma podem apresentar classes texturais com alto teor de argila (acima 80%) e mesmo assim possuir características positivas como: boa infiltração de água, porosidade, aeração e baixa densidade do solo em seu estado natural, devido à alta estabilidade dos agregados (AZEVEDO e BONUMÁ, 2004). Segundo Ferreira et al. (1999), a elevada estabilidade dos agregados ocorre

em função da atuação dos óxidos de ferro e alumínio presentes na fração argila, tornando os solos friáveis, o que favorece o manejo.

### 2.3 Fósforo no solo

Os solos da região tropical são formados por latossolos altamente intemperizados, ácidos e de baixa fertilidade e a deficiência de P é um dos principais entraves para a agricultura brasileira. A baixa disponibilidade de fósforo para as plantas, aliado à elevada capacidade de adsorção do P inorgânico, o torna um dos macronutrientes que mais oneram o custo agrícola (ABDALA et al., 2012). Nessas regiões o P é encontrado no solo ligado à oxihidróxidos de Fe, Al na forma de sais com pouca solubilidade, diminuindo a disponibilidade às plantas (BRANCO et al., 2001).

No solo, o teor total de P varia entre 200 a 3.000 mg kg<sup>-1</sup> (NOVAIS e SMYTH, 1999; CAMPOS, 2014); no entanto, na solução do solo é possível encontrar menos de 0,1% desse total. Nos sistemas agrícolas, a concentração de P em solução, está entre 0,002 e 2 mg L<sup>-1</sup> de P (FARDEAU, 1996). Do fósforo solúvel adicionado ao solo, estima-se que 5% a 25% é aproveitado pela cultura e o restante, entre 95% a 75% respectivamente, é fixado pelo solo através da adsorção, ligações eletrostáticas/covalentes e de precipitação, formando compostos insolúveis, influenciando na disponibilidade do elemento para as plantas (ALCARDE et al., 1991).

Grande parte do fósforo adicionado no solo fica adsorvido por ligações covalentes de alta energia nas superfícies das argilas e matéria orgânica. Como os solos das regiões tropicais são altamente intemperizados e ácidos, há o predomínio de caulinita, óxidos de ferro e alumínio. No entanto, é preferível as combinações de fósforo com ferro e alumínio, do que solos neutros ou calcários, onde há predominância de fosfatos de cálcio, que formam ligações de baixa solubilidade, tornando os teores de P da solução do solo muito baixo, restringindo seu aproveitamento pelas plantas (RAIJ, 1991). Nos solos arenosos, ocorre maior disponibilidade de P em relação aos solos argilosos devido à menor adsorção resultante da baixa concentração de argila.

A absorção de P ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) pelas plantas ocorre principalmente via sistema radicular e o suprimento do nutriente depende da capacidade de

fornecimento da fonte (GATIBONI, 2003). O contato do P do solo com a superfície radicular ocorre através de três mecanismos: interceptação radicular, fluxo de massa e difusão. A interceptação radicular e fluxo de massa estão relacionados com o teor de P na solução do solo e ocorre em função da porcentagem de espaços porosos que são ocupados pelas raízes e em função da massa de água transpirada pela cultura. Esses dois processos são responsáveis por cerca de 10% do total de P acumulado nas plantas (BARBER, 1995). A difusão é o principal mecanismo de transporte do fósforo no solo, sendo influenciada por vários fatores, tais como: a interação fósforo-colóide do solo, teor do elemento, conteúdo volumétrico de água no solo, distância a percorrer até as raízes e a temperatura do solo.

Nos solos tropicais, por apresentarem forte interação do P com os colóides, são registrados valores muito baixos de transporte de fósforo e a baixa mobilidade do nutriente se tem constituído num problema para a nutrição fosfatada das culturas (AZEVEDO et al., 2004).

A adubação fosfatada, antes de repor a quantidade de nutriente exportada pela colheita durante a safra agrícola, deve contribuir para a construção da fertilidade do solo, pois os solos do cerrado possuem elevada taxa de retenção de P na fase sólida (ANGHINONI, 2004). Segundo Novais et al. (2007), a capacidade dreno do solo é bem maior do que a da planta.

Os adubos fosfatados são provenientes das rochas ígneas e sedimentares, sendo um recurso natural não renovável (ISHERWOOD, 1999). Os minerais encontrados nas rochas fosfáticas são formados por dois grupos: as apatitas, que são fosfatos de Ca ligados à  $\text{OH}^-$ ,  $\text{F}^-$  e  $\text{Cl}^-$ , e as fosforitas, abrangendo os fosfatos de Ca com substituição parcial do  $\text{PO}_4^{3-}$  por  $\text{CO}_3^{2-}$ , Mg e Na (LOPES et al., 2004). No solo, o fósforo é dividido nos grupos inorgânico (Pi) e orgânico (Po), dependendo da natureza do composto a que está ligado (DELGADO e TORRENT, 2000).

O fósforo inorgânico (Pi) pode ser dividido em categorias: o fósforo dos minerais primários ou estrutural, fósforo adsorvido e o P na solução do solo (encontrados em pequenas quantidades). O método de difratometria de raios X é utilizado na identificação dos minerais primários fosfatados; no entanto, estes são de difícil detecção, por fazerem parte de uma pequena fração dos minerais do solo, onde a concentração varia de 0,02 a 0,5% (LINDSAY et al., 1989). Devido a sua capacidade de formar complexos de alta energia de ligação que resultam em baixos teores na solução do solo, o fósforo inorgânico adsorvido pode ocorrer em

todos os minerais presentes no solo e pode ser encontrado adsorvido a argilas silicatadas do tipo 1:1, ligado ao ferro, alumínio, cálcio e adsorvido à matéria orgânica através de pontes de cátions (compostos ternários) e, principalmente, adsorvido a oxihidróxidos de ferro e alumínio (PARFITT, 1978).

A adsorção de P dos fertilizantes fosfatados no solo é influenciada pelo tamanho, reatividade específica da superfície dos colóides, capacidade de oclusão do colóide a que o fosfato será adsorvido, concentrações e espécies iônicas que competem com o fosfato pelo sítio de adsorção (UEHARA e GILLMAN, 1981). A reatividade da superfície de adsorção sofre variação com a presença de Ca, Fe e Al na estrutura dos colóides ou fortemente adsorvido a estes, formando pontes de cátions (THOMAS e PEASLEE, 1973).

O fósforo orgânico (Po) representa 20 a 80% do P total do solo (DALAL, 1977), sendo originado a partir dos restos culturais que são colocados ao solo, tecido microbiano e produtos de sua decomposição (STEWART e TIESSEN, 1987). A maior parte do Po é encontrado na forma de fosfatos de inositol, fosfolipídios e ácidos nucleicos. Os fosfatos de inositol são constituídos por fósforo orgânico total (10 a 80%), fosfolipídios (0,5 a 7%), ácidos nucleicos (~ 3%) e outros ésteres fosfato (> 5%) (DALAL, 1977). Os ácidos nucleicos e fosfolipídios com ligação diéster tem sua mineralização favorecida devido a sua estrutura química; no entanto, são encontrados em quantidades pequenas no solo. Por apresentarem alta energia de ligação com a estrutura química da molécula, os fosfatos monoésteres (fosfato inositol) apresentam alta carga residual e possuem mais afinidade à interação com os constituintes inorgânicos do solo, dificultando a mineralização, o que favorece seu acúmulo no solo e conseqüentemente tornando baixa a disponibilidade do nutriente para as plantas (STEWART e TIESSEN, 1987).

A fração contida na biomassa microbiana é de suma importância na nutrição das plantas em solos tropicais e subtropicais (RHEINHEIMER et al., 2000). Em torno de 2 a 24% do Po encontrado no solo é constituída pela biomassa microbiana (P microbiano) e seu dinamismo torna-se relevante para o sistema solo-planta (BROOKES et al., 1984). Para adquirir carbono, energia, elétrons e nutrientes, a biomassa microbiana do solo consome os resíduos orgânicos (NEVES, 1992), propiciando a ciclagem de nutrientes pela mineralização dos resíduos ou pela imobilização (SMECK, 1985). Como o P microbiano está imobilizado

temporariamente, diminui a adsorção específica aos colóides inorgânicos do solo (TATE et al., 1991).

## **2.4 Fósforo na planta**

Com o advento de tecnologias que incrementaram a melhoria da fertilidade dos solos do Cerrado, tornou-se viável a expansão da cultura do milho em escala comercial no Cerrado (HOROWITZ e MEURER, 2003).

As plantas absorvem P nas formas aniônicas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , que são as formas de especiação iônica de maior ocorrência nas faixas de pH usualmente encontradas nos solos, entre 4,0 a 8,5 (BARBER, 1995). Na planta, o fósforo estimula o desenvolvimento do sistema radicular, promove a resistência estrutural dos caules e, é importante nos processos de floração, fecundação, formação e maturação do grão (BARROS e CALADO, 2014).

O fósforo é um dos seis macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) de grande importância para o desenvolvimento das plantas, desempenhando papel importante na produção, na transferência e no armazenamento de energia via ATP e NADPH, em todos os processos biológicos. É componente central de processos metabólicos, incluindo fotossíntese e respiração, participa da ativação e desativação de enzimas, é elemento estrutural dos ácidos nucleicos e fosfolípidos e serve como um componente em sinais de cadeias de tradução (RAUSCH e BUCHER, 2002).

Os sintomas de deficiência de P na cultura do milho ficam evidentes nas fases iniciais dos estádios vegetativos. O crescimento das plantas é retardado e folhas e colmos ficam com uma coloração arroxeadada. Na fase reprodutiva, as espigas ficam com má formação, tortas e com falhas nas fileiras de grãos e a maturação é retardada e desuniforme (NOVAIS e SMITH, 1999). A restrição de P no início do ciclo vegetativo pode afetar o desenvolvimento da planta e comprometer a produção, mesmo que aumente a níveis adequados nos estádios subsequentes (GRANT et al., 2001).

## **2.5 Fontes de fósforo e modos de aplicação**

Em termos de utilização de adubos fosfatados, o Brasil é o quarto maior consumidor, sendo responsável por 10% do consumo mundial, superado pela China, Índia e EUA, respectivamente. No entanto, somente 47% deste nutriente utilizado é

extraído das jazidas brasileiras e o restante é suprido pelo mercado internacional, como Tunísia, China, Índia, EUA, Rússia, Canadá e outros (HECKENMÜLLER et al., 2014).

As fontes de P podem ser classificadas em solúveis, pouco solúveis e insolúveis. As fontes solúveis, quando entram em contato com solo, aumentam instantaneamente a concentração do P na solução do solo e ao longo do tempo sua eficiência diminui devido ao processo de “adsorção” ou “fixação” do P aos colóides do solo (KORNDÖRFER et al., 1999).

No mercado brasileiro, estão disponíveis as fontes de fosfatos naturais, termofosfatos e fosfatos acidulados. Devido à alta concentração  $P_2O_5$  e alta solubilidade, os fosfatos acidulados detêm a maior parte da demanda de fertilizante no mercado (NOVAIS, 2007).

Os fertilizantes acidulados têm como matéria prima os concentrados de rochas fosfáticas, onde a estrutura cristalina do mineral é quebrada por meio da ação de ácidos fortes (SAMPLE et al., 1980). A reação entre amônia anidra e o ácido fosfórico dá origem a fertilizantes fosfatados altamente solúveis, entre esses destacam-se o monoamônio fosfato (MAP- 10% N e 52%  $P_2O_5$ ) e o diamônio fosfato (DAP - 17% N e 44%  $P_2O_5$ ) que possuem solubilidade em água de 95% (INSTITUTO DA POTASSA e FOSFATO, 1998). No entanto, a alta solubilidade desses fertilizantes poderá causar desequilíbrios microbiológicos no solo. Em solos argilosos rico em ferro e alumínio, quando estes recebem altas doses de fósforo altamente solúvel, favorece a fixação nos colóides do solo (RAIJ, 1991).

Estão sendo desenvolvidas novas tecnologias para produção de fertilizantes. Dentre estas destaca-se os organominerais, que utiliza materiais orgânicos enriquecidos com fertilizante mineral para uso nos sistemas de produção agrícola (FERREIRA, 2014).

O conteúdo ruminal e o lodo de curtume da atividade frigorífica possui potencial de utilização como fonte de nutrientes (ABREU JUNIOR et al., 2005). A legislação brasileira preconiza que o fertilizante organomineral é um produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos. O uso de alternativas que diminuem os impactos ambientais vem ganhando espaço no Brasil, tornando uma opção segura para destinação de resíduos, viabilizando a sustentabilidade do setor (MARTINS et al., 2016).

De acordo com relatos de Kiehl (1985), a matéria orgânica contida no fertilizante organomineral pode melhorar ou condicionar o solo, pois influi nas suas propriedades. Porém para agir como condicionador do solo, a matéria orgânica deve ser agregada em grandes dosagens, e como a quantidade inserida no fertilizante organomineral é pequena, somente em longo prazo e uso contínuo é que se pode notar tais efeitos. No entanto, a fração orgânica do fertilizante organomineral é um condicionador imediato dos fertilizantes minerais que entram em sua composição (TIRITAN e SANTOS, 2012).

Trabalho realizado por Silva et al. (2010) demonstrou que os fertilizantes minerais disponibilizaram maiores quantidades de P para o solo, enquanto que nos fertilizantes organominerais a liberação de P foi reduzida durante o período de 60 dias de execução do experimento. De acordo com estes autores, isso pode ter ocorrido porque a matéria orgânica presente no fertilizante organomineral pode ter restringido a liberação de P, devido a fixação do fósforo disponível. Segundo Ferreira (2014), é necessário uma avaliação aprofundada desta categoria de fertilizante organomineral com solubilidade variada em diferentes tipos de solo, para avaliar o seu desempenho agrônomico, ou seja, a eficiência destes produtos no sistema solo-planta.

## **2.6 Fracionamento sequencial de fósforo no Solo**

Processos biológicos e bioquímicos regulam a disponibilidade de fósforo no solo. A longo prazo, os processos geoquímicos interferem de forma significativa na disponibilidade do elemento no sistema solo, enquanto que os processos biológicos, disponibilizam a curto prazo o nutriente para as plantas, através da mineralização da matéria orgânica do solo (CHEN et al., 2003).

Os métodos analíticos rotineiramente utilizados pelos laboratórios para determinar a fertilidade química do solo estimam a fração inorgânica de P e os resultados indicam a disponibilidade deste nutriente para as plantas. No entanto, a fração orgânica do solo pode contribuir para o fornecimento de P às plantas (RHEINHEIMER et al., 1999). De acordo com Silva e Van Raij (1999), a utilização sequencial de diferentes soluções extratoras (fracionamento) possibilita identificar e conhecer as diferentes frações do fósforo, o que permite compreender a sua dinâmica no solo. O conhecimento da natureza e da distribuição dessas frações fornecem

informações de suma importância para a avaliação da disponibilidade do fósforo no solo (TIESEN et al., 1984).

O fracionamento de fósforo identifica as formas P que estão retidas no solo nos diferentes compartimentos do solo (lábil, moderadamente lábil e não lábil). O estudo das frações leva em consideração a variação existente entre os diferentes tipos de solo, os sistemas de cultivo e as práticas de manejo como correção e adubação (PAVINATO e ROSOLEM, 2008).

Um dos precursores no uso de metodologia de separação sequencial fósforo ocorrentes em diferentes formas e estado de energia foram Chang e Jackson (1957), que propuseram diferentes tipos de extratores químicos como agente seletivo para a extração do fósforo. A utilização de extratores de forma sequencial que começa do menor para o maior poder de extração evita a extração de diferentes formas de fósforo simultaneamente. Esta técnica de separação do fósforo em diversas frações ficou conhecida como "fracionamento de fósforo". A metodologia descrita por Chang e Jackson (1957) permite agrupar o P do solo em grupos, o primeiro os fosfatos de alumínio, o segundo em fosfatos de ferro, o terceiro em fosfatos de cálcio e o quarto grupo em fosfatos oclusos (fosfatos precipitados no interior de oxihidróxidos de ferro e alumínio ou incapazes de serem detectados com os extratores usados. O método de Chang e Jackson (1957) utiliza a seguinte ordem de extratores:  $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_4\text{F}$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ . No entanto, a técnica não identifica as frações orgânicas e sua labilidade e também não separa as formas inorgânicas de acordo com o grau de disponibilidade às plantas (GATIBONI, 2003). Segundo Duda (2000), de 7 a 83% do P total do solo se encontram na forma orgânica. Trabalhos de Guerra (1996) demonstram que 5 a 86% deste podem estar na fração orgânica lábil.

Segundo Fixen e Grove (1990), vários métodos de extração sequencial foram desenvolvidos a partir do trabalho de Chang e Jackson (1957). O método de fracionamento mais utilizado atualmente é o de Hedley et al. (1982), sendo que esse método contempla as frações orgânicas e inorgânicas de fósforo e suas formas de labilidade. Segundo Gatiboni (2003), as frações de fósforo inorgânico (Pi) e orgânico (Po) do solo são estimadas através da adição sequencial de soluções de menor à maior força de extração. Os extratores utilizados de maneira sequencial são: Resina Trocadora de Ânions (Pi),  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  a pH 8,5 (Pi e Po);  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  (Pi e Po);  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  + ultrasonificação (Pi e Po);  $\text{HCl}$  1,0 mol  $\text{L}^{-1}$  (Pi) e

digestão com  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2$  (Pi + Po). A técnica proposta por Hedley e seus colaboradores sofreu modificações com o intuito de facilitar sua execução e adequá-la à realidade dos laboratórios, entre elas, na indisponibilidade de aparelho de ultrassom, que pode ser substituído pela extração com  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  + ultrasonificação por extração com  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  (CONDRON et al., 1985). Também foi alterado a ordem de extração, com a utilização do extrator  $\text{HCl}$   $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  antes do extrator  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , com o objetivo de melhorar a eficiência da extração (GATIBONI et al., 2013).

O método de Hedley et al. (1982), com as modificações de Condron e Goh (1989) classifica as formas lábeis, pouco lábeis, não-lábeis, inorgânicas e orgânicas de acordo com sua disponibilidade às plantas e utiliza de forma sequencial extratores de menor à maior força de extração: Pi determinados por resina trocadora de ânions (Pi),  $\text{NaHCO}_3$  ( $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 8,5 = Pi e Po),  $\text{NaOH}$  ( $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  = Pi e Po),  $\text{HCl}$  ( $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  = Pi),  $\text{NaOH}$  ( $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  = Pi e Po) e digestão ácida ( $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2 = \text{P}_{\text{residual}}$ ). As frações orgânicas (Po) são determinadas pela diferença entre o P-total e o Pi em cada extrator (GATIBONI et al., 2007).

As formas mais lábeis (Pi) do solo são extraídos pela resina trocadora de ânions (RTA), sendo que o Pi que está nos colóides e na solução do solo é atraído por força eletrostática (RAIJ et al., 2001). O  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 8,5 extrai parte do Pi e Po lábil que está facilmente disponíveis pelas plantas. O  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  extrai o Pi e Po quimiosorvidas nos óxidos de Fe e Al e associadas com substâncias húmicas e são considerados moderadamente lábeis. O extrator  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  extrai o Pi e Po química e fisicamente protegidos nas superfícies internas dos microagregados. O  $\text{HCl}$  extrai o Pi contido nos fosfatos de cálcio e fortemente adsorvido e o  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2$  extrai o P total residual do solo (GATIBONI, 2003).

O P lábil é composto pelas frações de Pi extraído por resina e os teores de Po e Pi extraídos por  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 8,5; o P moderadamente lábil é composto pelos teores extraídos por  $\text{NaOH}$   $0,1$  e  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  nas frações de Pi e Po e o P não lábil é extraído com  $\text{HCl}$   $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , o que permite estimar o P residual (ROTTA, 2012).

De acordo com Tokura et al. (2002), o método de fracionamento de P proposto por Hedley et al. (1982) é eficiente para avaliar o efeito dos sistemas de

cultivo, bem como quantificar e avaliar seu efeito no tempo ou em profundidades, demonstrando as alterações das formas de P.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Localização e caracterização da área experimental

O trabalho foi conduzido na Embrapa Agropecuária Oeste, em Dourados-MS, utilizando-se amostras de dois solos: um Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), textura média, de Caarapó-MS e um Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf), textura argilosa, de Dourados-MS (SANTOS et al., 2013).

O LVdf foi coletado em área nunca cultivada e adubada e o local encontrava-se coberto por vegetação espontânea, dominada por capim braquiária. O LVd foi coletado de barranco de beira de estrada e o local encontrava-se também coberto por vegetação nativa, dominada por capim braquiária.

Dois experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, um em cada solo, utilizando-se o milho (*Zea mays*) como planta teste, em vasos plásticos com capacidade de 13 dm<sup>3</sup> de solo. Após a coleta, os solos foram homogeneizados, destorroados e passados em peneira de 4 mm. Parte das amostras de cada solo foram passadas em peneiras de 2 mm de malha e submetidas às análises de atributos químicos e físicos de acordo com metodologia de Claessen et al. (1997) (Quadros 1 e 2).

**Quadro 1.** Atributos químicos (macronutrientes) dos solos Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf) antes da instalação do experimento.

| Tipo de Solo | pH                | P                   | M.O                | K   | Ca  | Mg  | Al  | H+Al | SB  | CTC  | V    |
|--------------|-------------------|---------------------|--------------------|---|-----|-----|-----|------|-----|------|------|
|              | CaCl <sub>2</sub> | mg dm <sup>-3</sup> | g kg <sup>-1</sup> | -----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ----- |     |     |     |      |     |      | %    |
| LVd          | 4,1               | 6,5                 | 5,6                | 0,7   | 0,5 | 0,2 | 0,4 | 3,3  | 1,4 | 4,7  | 30,5 |
| LVdf         | 3,9               | 0,6                 | 26,0               | 0,2   | 0,7 | 0,4 | 1,8 | 10,5 | 1,3 | 11,0 | 10,8 |

P: fósforo (Mehlich 1); M.O: matéria orgânica; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; H+Al: acidez potencial; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação por bases

**Quadro 2.** Atributos químicos (micronutrientes) e textura dos solos Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf) antes da instalação do experimento.

| Tipo de Solo | Cu                              | Fe  | Mn | Zn  | Argila             |
|--------------|---------------------------------|-----|----|-----|--------------------|
|              | ----- mg dm <sup>-3</sup> ----- |     |    |     | g kg <sup>-1</sup> |
| LVd          | 0,3                             | 0,9 | 26 | 4,0 | 163                |
| LVdf         | 0,8                             | 8,6 | 24 | 2,3 | 673                |

(Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco – Mehlich 1). Granulometria (Método Densímetro).

### 3.2 Delineamento experimental e tratamentos

Para cada solo, o delineamento experimental das frações de fósforo foi o inteiramente casualizado, distribuído em esquema fatorial 2x4. Os tratamentos foram constituídos de: duas fontes (mineral e organomineral) e quatro doses de P (0, 40, 80 e 120 mg kg<sup>-1</sup> de P).

Para avaliar os efeitos dos tratamentos sobre o diâmetro do colmo e altura de plantas, considerou-se delineamento inteiramente casualizado, distribuído em esquema fatorial 2x4x10, sendo uma vez que as medições foram realizadas em dez épocas de avaliação (4, 9, 14, 18, 23, 28, 32, 37, 42 e 49 dias após a emergência), com quatro repetições.

Na avaliação dos efeitos dos tratamentos sobre as diferentes frações de fósforo no solo, considerou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, distribuído em esquema fatorial 2x4x5, uma vez que as determinações analíticas foram feitas em amostras coletadas em 5 épocas (0, 7, 14, 28, e 49 DAE).

### 3.3 Condução do Experimento

Os solos foram acondicionados em sacos plásticos e incubados por um período de 22 dias com calcário dolomítico (26,5% CaO, 15,3% MgO, 87% de poder de neutralização (PN), 92% de eficiência relativa (ER) e 80% de PRNT, em quantidade suficiente para elevar a saturação por bases a 60% (11,15 g vaso<sup>-1</sup> no LVd e 40,24 g vaso<sup>-1</sup> no LVdf). Nesta fase, a umidade foi mantida em 100% da capacidade de campo.

No dia 26/2/2016, foi realizada a última adição de água nos sacos plásticos contendo a terra, visando à manutenção da umidade em torno de 100% da capacidade de campo. No período entre 27/2 e 10/3/2016, os sacos plásticos foram mantidos abertos, em bancadas da casa de vegetação, para haver a secagem da terra.

Em seguida, procedeu-se à pesagem, em balança analítica, de quantidades de adubo organomineral formulado 07-07-07 e de adubos minerais nitrato de amônio, mono amônio fosfato (MAP) e cloreto de potássio, em quantidades correspondentes aos tratamentos estabelecidos, conforme Quadro 3 e 4.

**Quadro 3.** Quantidades de adubo adicionado em cada vaso, de acordo com o tratamento, no Latossolo Vermelho Distrófico. Dourados-MS, 2017.

| Tratamento   | Adubo 07-07-07<br>organomineral | Monoamônio<br>fosfato<br>(MAP) | Nitrato<br>de<br>amônio | Cloreto<br>de<br>potássio |
|--|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------|
|  |                                 |                                |                         |                           |
| 1. Controle - sem fósforo                                | 0,00                            | 0,00                           | 10,73                   | 5,90                      |
| 2. 40 mg kg <sup>-1</sup> de P (organomineral 07-07-07)  | 16,86                           | 0,00                           | 7,15                    | 3,93                      |
| 3. 80 mg kg <sup>-1</sup> de P (organomineral 07-07-07)  | 33,73                           | 0,00                           | 3,58                    | 1,97                      |
| 4. 120 mg kg <sup>-1</sup> de P (organomineral 07-07-07) | 50,59                           | 0,00                           | 0,00                    | 0,00                      |
| 5. 40 mg kg <sup>-1</sup> de P (mineral)                 | 0,00                            | 2,27                           | 9,97                    | 5,90                      |
| 6. 80 mg kg <sup>-1</sup> de P (mineral)                 | 0,00                            | 4,54                           | 9,22                    | 5,90                      |
| 7. 120 mg kg <sup>-1</sup> de P (mineral)                | 0,00                            | 6,81                           | 8,46                    | 5,90                      |

**Quadro 4.** Quantidades de adubo adicionado em cada vaso, de acordo com o tratamento, no Latossolo Vermelho Distroférrico. Dourados-MS, 2017.

| Tratamento   | Adubo 07-07-07<br>organomineral | Monoamônio<br>fosfato<br>(MAP) | Nitrato<br>de<br>amônio | Cloreto<br>de<br>potássio |
|--|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------|
|  |                                 |                                |                         |                           |
| 1. Controle - sem fósforo                                | 0,00                            | 0,00                           | 9,27                    | 5,10                      |
| 2. 40 mg kg <sup>-1</sup> de P (organomineral 07-07-07)  | 14,57                           | 0,00                           | 6,18                    | 3,40                      |
| 3. 80 mg kg <sup>-1</sup> de P (organomineral 07-07-07)  | 29,13                           | 0,00                           | 3,09                    | 1,70                      |
| 4. 120 mg kg <sup>-1</sup> de P (organomineral 07-07-07) | 43,70                           | 0,00                           | 0,00                    | 0,00                      |
| 5. 40 mg kg <sup>-1</sup> de P (mineral)                 | 0,00                            | 1,96                           | 8,62                    | 5,10                      |
| 6. 80 mg kg <sup>-1</sup> de P (mineral)                 | 0,00                            | 3,92                           | 7,96                    | 5,10                      |
| 7. 120 mg kg <sup>-1</sup> de P (mineral)                | 0,00                            | 5,88                           | 7,31                    | 5,10                      |

O adubo organomineral foi elaborado a partir de resíduos do frigorífico, sendo utilizado basicamente o conteúdo ruminal e o lodo de curtume, enriquecido com adubos químicos (mono amônio fosfato - MAP, cloreto de potássio e nitrato de potássio).

Na sequência, realizou-se a mistura, em um saco plástico, destes fertilizantes com o volume de solo de cada vaso, individualmente. No dia 10/3/2016, após a homogeneização dos fertilizantes com o solo, procedeu à aplicação de solução nutritiva com micronutrientes (0,25 mg kg<sup>-1</sup> de B; 0,25 mg kg<sup>-1</sup> de Cu; 1 mg kg<sup>-1</sup> de Mn e 2 mg kg<sup>-1</sup> de Zn) de forma homogênea na superfície.

Para o preparo da solução nutritiva, foi feita a mistura dos reagentes P.A. (Quadro 5) em um balão volumétrico com capacidade para 2.000 ml, contendo cerca de 1.000 ml de água, seguida de agitação, para homogeneizar a solução, em seguida, completou-se o volume e agitou-se novamente. Cada vaso recebeu 50 ml da solução e a dose de micronutrientes aplicada nos vasos foi a mesma para os dois tipos de solos.

**Quadro 5.** Quantidade de reagentes PA utilizados para o preparo da solução nutritiva contendo boro (B), zinco (Zn), cobre (Cu) e manganês (Mn).

| Tipo de solo | Ácido bórico (g) | Sulfato de cobre (g) | Sulfato Manganoso (g) | Sulfato de zinco (g) |
|--------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| LVd          | 0,76             | 0,99                 | 1,98                  | 5,15                 |
| LVdf         | 0,66             | 0,86                 | 1,71                  | 4,45                 |

Logo após a aplicação da solução nutritiva contendo os micronutrientes, realizou-se a semeadura de cinco sementes de milho (cultivar DKB 390 PRO<sup>®</sup>) por vaso. Após a emergência das plântulas, efetuou-se o desbaste, deixando-se apenas duas plantas por vaso. Aos 4, 9, 14, 18, 23, 28, 32, 37, 42 e 49 dias após a emergência (DAE), realizou-se as avaliações de altura de plantas, com o auxílio de uma régua graduada e o diâmetro de colmo (1 cm de altura da planta) com o auxílio de um paquímetro digital, marca Digimess<sup>®</sup>, com capacidade de leitura até 200mm.

Aos 49 DAE, efetuou-se o corte das duas plantas de cada vaso, seguida da separação de folhas e colmos e acondicionamento destes em sacos de papel previamente identificados. Determinou-se a área foliar (AF), em equipamento específico, marca Li-Cor<sup>®</sup>, modelo LI-3100, da empresa LI-COR BioSciences. Na sequência, o material vegetal coletado foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 50°C e foi determinado massa de matéria seca de folha (MSF) e massa seca de colmo (MSC).

Após a pesagem do material vegetal seco, as amostras foram trituradas em moinho tipo Wiley e posteriormente realizada a análise do teor de P no tecido conforme Malavolta et al. (1997). O teor de fósforo da folha ( $\text{g kg}^{-1}$ ) de cada amostra foi multiplicado pela produção de massa seca de cada amostra respectiva ( $\text{g vaso}^{-1}$ ) e obteve-se assim o acúmulo de P ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ) na parte aérea.

No dia da semeadura do milho e aos 7, 14, 28 e 49 dias realizou a coleta de amostras de solo em cada vaso, utilizando-se um trado de rosca específico para esta finalidade. Em cada amostragem, o trado foi inserido até o fundo do vaso, para que se pudesse retirar solo da superfície até o fundo do solo.

Após a coleta, os solos foram homogeneizados, destorroados e passados em peneira de malha de 2 mm e em seguida acondicionadas em sacos de papel identificados para a determinações das frações de fósforo.

A extração das frações inorgânicas e orgânicas de fósforo no solo foi realizada conforme metodologia de Hedley et al. (1982), com modificações de Condon e Goh (1989). No fracionamento foi utilizado 0,5 g de solo para cada

amostra, visando extrair o Po (fósforo orgânico) e Pi (fósforo inorgânico) com os seguintes extratores em ordem sequencial (Figura 1): resina trocadora aniônica (Pi) (Placas AMI-7001), bicarbonato de sódio -  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  a pH 8,5 (Pi + Po); hidróxido de sódio -  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  (Pi e Po); ácido clorídrico -  $\text{HCl}$  1,0 mol  $\text{L}^{-1}$  (Pi); hidróxido de sódio -  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (Pi e Po) e digestão com  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2$  (P residual).

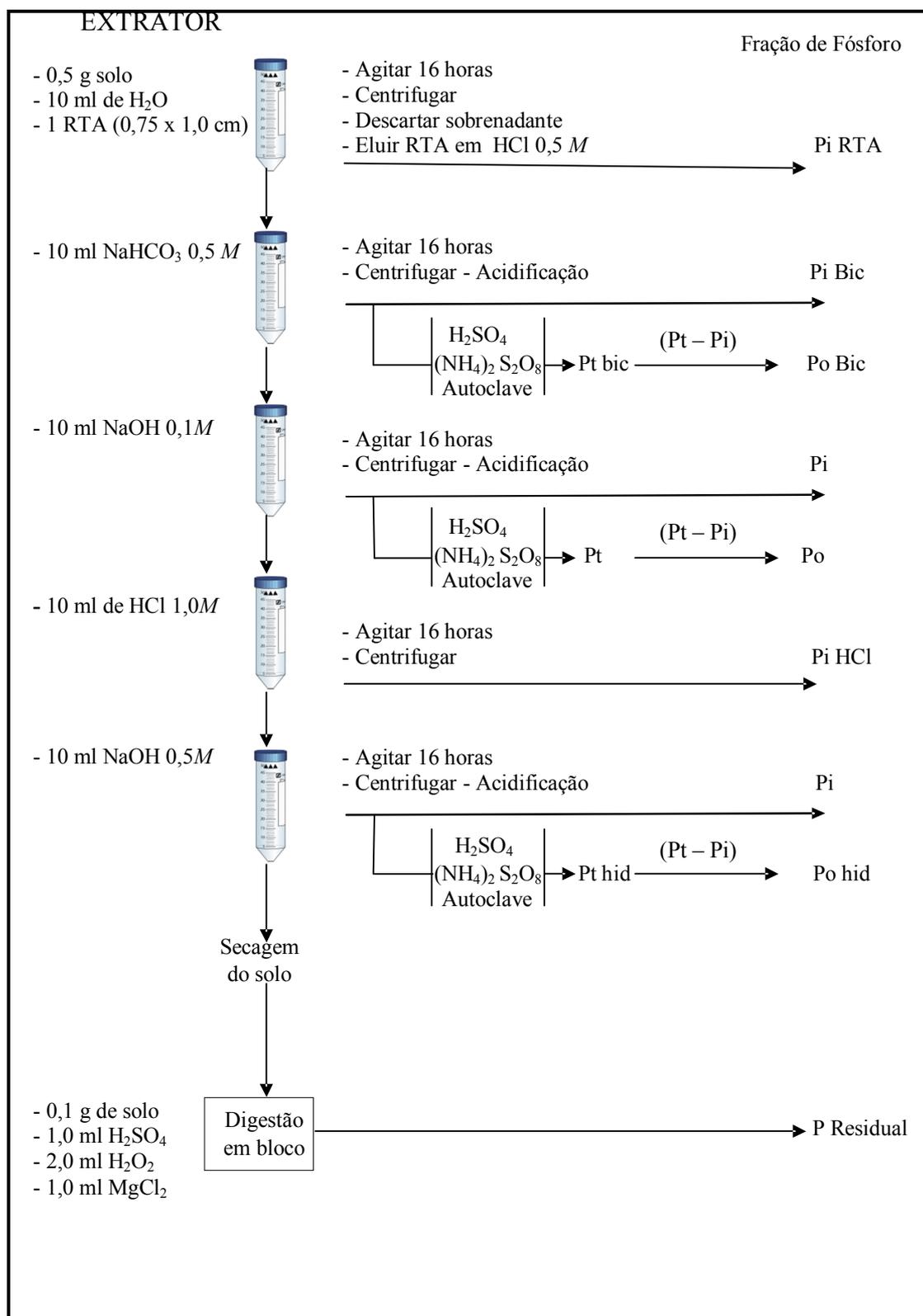
O Pi dos extratos alcalinos de  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  e  $\text{NaOH}$  0,1 e 0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  foi feito a acidificação para precipitar a matéria orgânica e posteriormente o P dos extratos ácidos foi determinado pelo método de Murphy e Riley (1962). No extrato alcalino foi determinado o P total por digestão com persulfato de amônio + ácido sulfúrico em autoclave, sendo o Po obtido pela diferença entre P total e P inorgânico das amostras. O Pi do extrato ácido foi determinado pelo método de Murphy e Riley (1962). Já o P residual foi determinado através da digestão com  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2$ .

As frações de P obtidas através do fracionamento foram separadas pela labilidade descrita por Rotta (2012), onde o P lábil é composto pelas frações de Pi extraído por resina e os teores de Po e Pi extraídos por  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  a pH 8,5; o P moderadamente lábil é composto pelos teores de  $\text{NaOH}$  0,1 e 0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  nas frações de Pi e Po e o P não lábil foi extraído com  $\text{HCl}$  1,0 mol  $\text{L}^{-1}$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2$  (P residual).

### 3.4 Análise estatística

Os dados das variáveis analisadas foram submetidos à análise de variância (ANAVA), sendo as médias comparadas pelo teste t (5% de probabilidade). Os resultados das doses de P e épocas de avaliação quando significativos empregaram-se análise de regressão. O programa estatístico utilizado foi o programa computacional Sisvar 4.2 (FERREIRA, 2014).

Optou-se por avaliar apenas a interação duplas entre os tratamentos e, quando houve interação, esta foi explicada de forma conjunta e não isoladamente. Foram ajustadas equações de regressão e avaliação da significância dos parâmetros dos modelos pelo teste f, utilizando o aplicativo computacional Sisvar 4.2.



**Figura 1.** Esquema da técnica do fracionamento de fósforo proposto por Hedley et al. (1982) com modificações de Condrol e Goh (1989).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Formas de fósforo no solo

As diferentes frações de P determinadas pelo fracionamento de Hedley et al. (1982) foram agrupadas de acordo com a labilidade, preditas pelos extratores, começando das frações lábeis ou potencialmente disponíveis para as plantas e microrganismos até formas biologicamente indisponíveis e/ou não lábeis, conforme a categorização apresentada por Rodrigues et al. (2015). A compartimentalização das formas de P no solo de acordo com a labilidade ajuda na verificação da contribuição que os fertilizantes usados como tratamentos tiveram no fornecimento de P para as plantas.

Verificou-se efeito significativo da interação entre fontes de P, doses de P e épocas de avaliação para todas as frações de P, com exceção do  $P_{RTA}$  e  $Pi_{NaOH\ 0,1}$ . O  $P_{RTA}$  apresentou efeito para as interações duplas (fontes x doses; fontes x épocas e doses x épocas). Para  $Pi_{NaOH\ 0,1}$  houve interação entre fontes x épocas e doses x épocas (Quadro 6).

#### 4.1.1 Latossolo Distrófico Típico (LVd)

##### 4.1.1.1 P Lábil do Solo ( $P_{RTA}$ , $PiNaHCO_3$ e $PoNaHCO_3$ )

O  $P_{RTA}$  é a primeira fase da extração sequencial das frações de P no fracionamento do solo. O  $NaHCO_3\ 0,5\ mol\ L^{-1}$  extrai tanto na forma inorgânica ( $PiNaHCO_3$ ) como orgânica ( $PoNaHCO_3$ ), que são consideradas biodisponíveis no solo (CROSS e SCHLESINGER, 1995). Devido à similaridade entre estas frações é possível afirmar que a diminuição do conteúdo de P na solução do solo esteja relacionada à sensibilidade que o nutriente possui nesses compartimentos (CREWS e BROOKES, 2014).

Para a fração  $P_{RTA}$ , a interação entre doses e fontes foi significativa a partir da dose de  $40\ mg\ dm^{-3}$ , com incremento de 263%, 467% e 944%, respectivamente, para a fonte mineral nas doses de 40, 80 e  $120\ mg\ dm^{-3}$  de P em relação a fonte organomineral (Quadro 7). Além disso, examinando o efeito de fontes dentro de épocas de avaliação nota-se diferença estatística somente aos 7, 14, 28 e 49 DAE, onde a fonte mineral foi superior à organomineral nas proporções de 1786%, 933%, 342% e 821%. Esse comportamento provavelmente ocorreu por que a matéria

orgânica presente no fertilizante organomineral pode ter restringido a liberação do P. Silva et al. (2010), trabalhando com diferentes fontes de fertilizantes organominerais constatou que durante 60 dias, a liberação de fósforo inorgânico foi lenta. Suas avaliações apresentavam resultados similares de liberação com o passar das coletas de solo e mantiveram médias de liberação relativamente baixas. Também foi constatado que fertilizante solúvel e com elevada dose de P apresentavam maiores liberação de fósforo para o solo com o passar dos dias de avaliação.

Os dados de  $P_{RTA}$  na interação entre doses de P e épocas de avaliação para a fonte organomineral se ajustaram ao modelo Gaussian, obtendo teor máximo de  $4,7 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $P_{RTA}$  estimado na dose  $150,8 \text{ mg dm}^{-3}$  de P aos 36,1 DAE (Figura 2a). Para a fonte mineral, os dados se ajustaram ao modelo Laurensian, com teor máximo de  $44,4 \text{ mg kg}^{-1}$  de P, estimado na dose  $114,9 \text{ mg dm}^{-3}$  de P aos 48,4 DAE (Figura 2b). Essa eficiência do fertilizante mineral é devido a solubilidade do fosfato, que ao entrar em contato com o solo promove uma intensa reação e aumenta rapidamente o P disponível; já os fertilizantes organominerais necessitam ser mineralizados, com a transformação da forma orgânica para a inorgânica (NOVAIS e SMITH, 1999). Constata-se que o P solúvel presente no organomineral não teve um efeito de solubilidade significativo em comparação ao mineral.

**Quadro 6.** Resumo da análise de variância (valores de F) para os efeitos de fontes e doses de adubação fosfatada (F) em épocas de avaliação (E) nas frações de P de um Latossolo Vermelho Distrófico típico, no município de Dourados-MS, 2017.

| Fatores de variação | Pi <sub>RTA</sub>    | Pi <sub>NaHCO<sub>3</sub></sub> | Po <sub>NaHCO<sub>3</sub></sub> | Pi <sub>NaOH0,1</sub> | Po <sub>NaOH0,1</sub> | Pi <sub>HCl</sub> | Pi <sub>NaOH0,5</sub> | Po <sub>NaOH0,5</sub> | P <sub>residual</sub> |
|---------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Fontes (F)          | 25916,3**            | 6363,6**                        | 58,5**                          | 1469,1**              | 110,1**               | 948,6**           | 51,7**                | 10,3**                | 3,9*                  |
| Doses (D)           | 4753,9**             | 1661,3**                        | 75,4**                          | 288,4**               | 57,9**                | 1313,4**          | 115,9**               | 14,3**                | 6,6**                 |
| Épocas(E)           | 1385,4**             | 730,2**                         | 226,1**                         | 60,5**                | 461,1**               | 576,3**           | 267,1**               | 51,3**                | 40,8**                |
| F x D               | 509,6**              | 356,8**                         | 48,2**                          | -249,9 <sup>ns</sup>  | -30,9 <sup>ns</sup>   | 2035,6**          | 48,2**                | 36,6**                | 21,9**                |
| F x E               | 2580,5**             | 682,3**                         | 74,0**                          | 97,5**                | 301,2**               | 176,6**           | 52,1**                | 5,3**                 | 3,5**                 |
| D x E               | 424,2**              | 203,8**                         | 60,1**                          | 38,7**                | 78,4**                | 181,1**           | 45,2**                | 12,1**                | 2,9**                 |
| F x D x E           | -1,372 <sup>ns</sup> | 117,7**                         | 80,9**                          | 21,9**                | -52,7 <sup>ns</sup>   | 305,6**           | 16,3**                | 7,7**                 | 6,4**                 |
| Média               | 9,38                 | 4,42                            | 4,34                            | 5,89                  | 11,71                 | 9,54              | 5,60                  | 5,46                  | 807,43                |
| CV(%)               | 7,33                 | 7,19                            | 11,55                           | 9,46                  | 11,81                 | 8,44              | 11,1                  | 17,34                 | 2,87                  |

<sup>(1)</sup> Pi<sub>RTA</sub>, P inorgânico extraído por resina trocadora de ânions; Pi<sub>NaHCO<sub>3</sub></sub>, P inorgânico extraído por solução de NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>NaHCO<sub>3</sub></sub>, P orgânico extraído por solução de NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>NaOH 0,1</sub>, P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>NaOH 0,1</sub>, P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HCl</sub>, P inorgânico extraído com solução de HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>NaOH 0,5</sub>, P inorgânico extraído por solução de NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>NaOH 0,5</sub>, P orgânico extraído por solução de NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P residual, P inorgânico e orgânico extraídos por H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + MgCl<sub>2</sub>. \*\*Significativo a 1% de probabilidade.

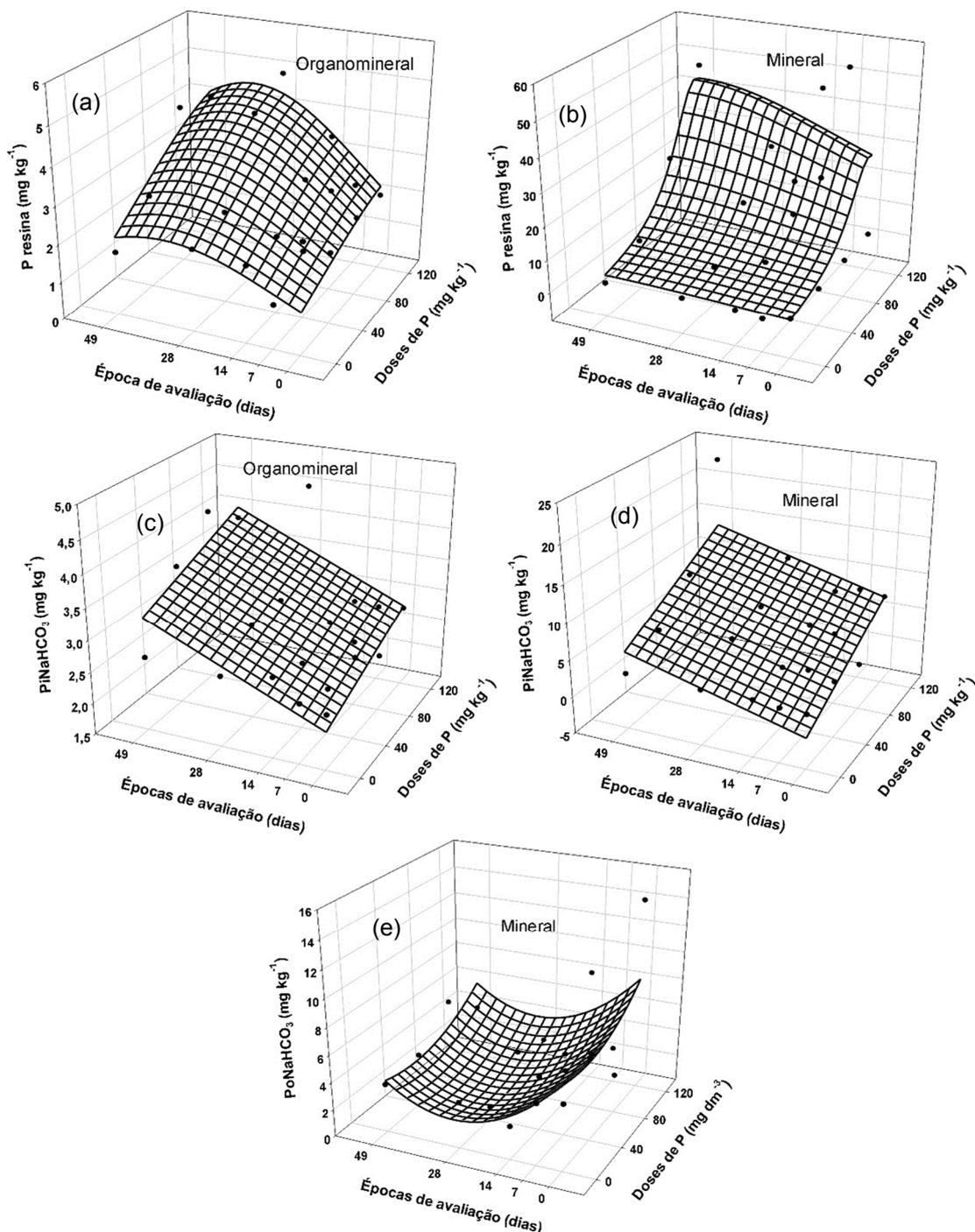
**Quadro 7.** Desdobramento da interação (fontes de P, doses de P e época de avaliação) das frações lábeis de fósforo do Latossolo Vermelho Distrófico típico, cultivado com milho. Dourados-MS.

| Fontes de P  | Doses (mg dm <sup>-3</sup> )                    |        |         |         | Época de avaliação (dias) |         |         |         |         | Equação polinomial múltipla<br>(época de avaliação x doses)               | R <sup>2</sup> |
|--------------|---|--------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---|----------------|
|              | 0   | 40     | 80      | 120     | 0                         | 7       | 14      | 28      | 49      |   |                |
|              | <b>P resina (mg kg<sup>-1</sup>)</b>            |        |         |         |                           |         |         |         |         |   |                |
| Mineral      | 2,02 a  | 8,39 a | 18,65 a | 34,97 a | 2,41 a                    | 34,52 a | 25,92 a | 14,35 a | 26,17 a | = $\frac{\dots}{\dots}$ , **  | 0,78           |
| Org. mineral | 2,02 a  | 2,31 b | 3,29 b  | 3,35 b  | 2,56 a                    | 1,83 b  | 2,51 b  | 3,25 b  | 2,84 b  | = $4,71 * \left[ \frac{\dots}{\dots} - \frac{\dots}{\dots} \right]$       | 0,83           |
|              | <b>PiNaHCO<sub>3</sub> (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |        |         |         |                           |         |         |         |         |   |                |
| Mineral      | 2,58 a  | 4,09 a | 5,69 a  | 11,27 a | 3,87 a                    | 5,51 a  | 5,31 a  | 7,82 a  | 12,57 a | = $0,8057^{ns} + 0,0692^{**}x + 0,1306^{**}y$                             | 0,81           |
| Org. mineral | 2,58 a  | 2,86 b | 3,00 b  | 3,34 b  | 2,55 b                    | 2,48 b  | 2,73 b  | 3,16 b  | 3,43 b  | = $2,103^{*} + 0,0061^{**}x + 0,0243^{**}y$                               | 0,82           |
|              | <b>PoNaHCO<sub>3</sub> (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |        |         |         |                           |         |         |         |         |   |                |
| Mineral      | 3,78 a  | 4,25 a | 3,69 b  | 6,28 a  | 7,83 a                    | 4,71 b  | 4,92 a  | 2,14 b  | 4,63 a  | = $6,301^{**} - 0,022^{ns}x - 0,288^{*}y + 0,0003^{ns}x^2 + 0,005^{*}y^2$ | 0,61           |
| Org. mineral | 3,78 a  | 4,31 a | 4,29 a  | 4,39 b  | 5,44 b                    | 5,25 a  | 3,36 b  | 3,14 a  | 3,36 b  | = $4,34$  |                |

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste t a 5% de probabilidade  
ns: não-significativo a 5% de probabilidade; \* e \*\*: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Para a fração  $Pi_{NaHCO_3}$  a interação entre fontes e doses de P somente foi significativa para as doses de 40, 80 e 120  $mg\ dm^{-3}$  de P da fonte mineral (Quadro 7), com incremento de 43%, 90% e 237% respectivamente, em relação a organomineral. Inferindo a alta solubilidade da fonte mineral em relação a organomineral. O  $Pi_{NaHCO_3}$  indica alta labilidade e os teores extraídos pela resina não representam todo o fósforo disponível do solo (HEDLEY et al., 1982; TIESSEN et al., 1984; ARAUJO et al., 1993; LINQUIST et al., 1997; GUO e YOST, 1998; YOST et al., 2000). O mesmo comportamento verificado da interação fontes e doses foi encontrado para a interação entre fontes de P e épocas de avaliação, com incrementos de 52%, 122%, 95%, 147%, 267%, respectivamente, para a fonte mineral em relação a organomineral. Esses resultados estão condizentes com os encontrados na fração  $P_{RTA}$ , pois o bicarbonato de sódio e a resina trocadora aniônica estimam o Pi lábil ou prontamente disponível às plantas. Teixeira (2013), avaliando a biodisponibilidade de P do fertilizante organomineral, relata que apesar do composto ser rico em minerais, possui baixa solubilidade e os nutrientes contidos nos resíduos orgânicos precisam ser mineralizados para serem disponibilizados para as plantas.

Para ambas as fontes de P, os dados da interação entre doses de P e épocas de avaliação se ajustaram ao modelo linear; na fonte organomineral, o teor estimado na dose 120  $mg\ dm^{-3}$  de P aos 49 DAE foi de 4,0  $mg\ kg^{-1}$  (Figura 2c), enquanto que na fonte mineral foi de 15,5  $mg\ kg^{-1}$  (Figura 2d).



**Figura 2.** Teores de P inorgânico e orgânico lábil do solo, extraídos com resina trocadora de ânions e solução de  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , em função de fonte de adubação fosfatada (organomineral e mineral), doses de fósforo ( $0, 40, 80$  e  $120 \text{ mg dm}^{-3}$  de P) e épocas de avaliação ( $0, 7, 14, 28$  e  $49$  dias) de um Latossolo Vermelho Distrófico típico, cultivado com milho no município de Dourados-MS, 2017

Avaliando a interação entre fontes e doses de P para a fração  $\text{PoNaHCO}_3$ , observa-se que não houve diferença estatística na dose  $40 \text{ mg dm}^{-3}$  de P (Quadro 7). Na dose de  $80 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, a fonte organomineral obteve um percentual 16% superior a mineral, no entanto, na dose  $120 \text{ mg dm}^{-3}$  de P a fonte mineral apresentou um

incremento de 43% sobre a organomineral. Examinando a interação de fontes e épocas de avaliação, observa-se que estatisticamente diferiram em todos os dias de avaliação e a fonte mineral sobressaiu sobre a organomineral, aos 0, 14 e 49 DAE, com aumento de 44%, 46% e 38%, respectivamente, enquanto a fonte organomineral foi melhor aos 7 e 28 DAE, com incremento de 12% e 47%, respectivamente. Existem evidências de que  $P_{O_{NaHCO_3}}$  repõe a fração de  $P_{i_{NaHCO_3}}$ , aumentando significativamente os teores de Pi e concomitantemente diminuindo Po, processo desencadeado pela mineralização (GATIBONI et al., 2007).

Para a fonte organomineral, os dados da interação entre doses de P e épocas de avaliação não se ajustaram a nenhum modelo matemático, obtendo uma média de 4,3 mg kg<sup>-1</sup>. Quando ocorre baixo acúmulo de fósforo através da adubação, as frações de Po são responsáveis pelo fornecimento de P às plantas, porém com fornecimento abaixo da demanda (SANTOS et al., 2017). A fonte mineral ajustou ao modelo parabolóide com teor mínimo de  $P_{O_{NaHCO_3}}$  de 1,6 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 2e).

#### 4.1.1.2 P Moderadamente Lábil do Solo ( $P_{i_{NaOH0,1}}$ , $P_{o_{NaOH0,1}}$ , $P_{i_{NaOH0,5}}$ e $P_{o_{NaOH0,5}}$ )

Essa fração é extraída pela solução NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, que compreende as formas inorgânicas ligadas a Fe e Al e orgânicas associadas a complexos orgânicos. O NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> contempla as formas orgânicas e inorgânicas localizadas no interior de agregados minerais do solo (MARTINEZ, 2015).

No Quadro 8 estão apresentados os desdobramentos das interações entre doses, fontes de P e época de avaliação das frações  $P_{i_{NaOH0,1}}$ ,  $P_{i_{NaOH0,5}}$  e  $P_{o_{NaOH0,5}}$ .

Analisando a interação entre fontes e doses de P observa-se que nas doses de 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P a fonte mineral diferiu estatisticamente da organomineral, resultando em teores de  $P_{i_{NaOH0,1}}$  superiores em 50%, 52% e 80% respectivamente. Já para a interação entre fontes e épocas de avaliação houve diferença estatística entre fontes em todas épocas, com destaque da fonte mineral sobre a organomineral, nas proporções de 9,4%, 145%, 67%, 66%, 103%, nesta ordem. Nos solos adubados, a maior parte do P é tamponado pelas frações inorgânicas lábeis, entretanto, em solos com baixa fertilidade, a fração de labilidade intermediária é responsável pela disponibilidade de fósforo nas formas inorgânicas e orgânicas (NOVAIS e SMITH, 1999) e isso ocorre quando o P é absorvido pelas plantas ou por microrganismos e essa fração repõe rapidamente a solução do solo (SANTOS et al., 2017).

**Quadro 8.** Desdobramento da interação entre fontes de P, doses de P e épocas de avaliação das frações moderadamente lábeis de fósforo do Latossolo Vermelho Distrófico típico, cultivado com milho. Dourados-MS.

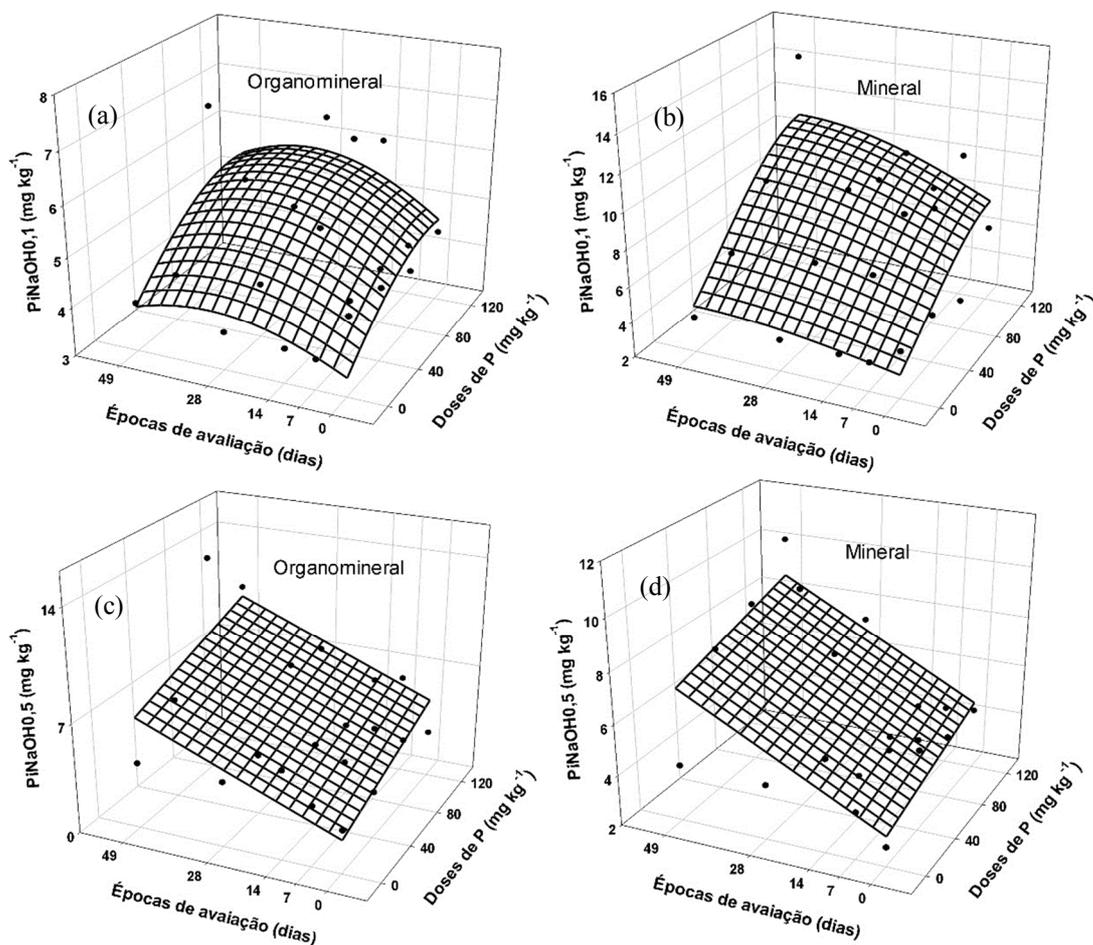
| Fontes de P  | Doses (mg dm <sup>-3</sup> )           |           |           |            | Época de avaliação (dias) |          |           |           |           | Equação polinomial múltipla<br>(época de avaliação x doses)  | R <sup>2</sup> |                                   |                                    |   |      |
|--------------|--|-----------|-----------|------------|---------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|--|----------------|-----------------------------------|------------------------------------|---|------|
|              | <b>PiNaOH 0,1 (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |           |           |            |                           |          |           |           |           |  |                |                                   |                                    |   |      |
|              | <b>0</b>                               | <b>40</b> | <b>80</b> | <b>120</b> | <b>0</b>                  | <b>7</b> | <b>14</b> | <b>28</b> | <b>49</b> |  |                |                                   |                                    |   |      |
| Mineral      | 3,94 a                                 | 6,62 a    | 8,23 a    | 9,35 a     | 4,89 a                    | 9,56 a   | 8,57 a    | 7,72 a    | 9,60 a    |  |                |                                   |                                    |   |      |
| Org. mineral | 3,94 a                                 | 4,42 b    | 5,40 b    | 5,19 b     | 4,47 b                    | 3,91 b   | 5,13 b    | 4,64 b    | 4,74 b    |  |                |                                   |                                    |   |      |
|              |  |           |           |            |                           |          |           |           |           | = 11,06 *  | · [            | $\frac{\text{ , *}}{\text{ , *}}$ | $\frac{\text{ , *}}{\text{ , *}}$  | ] | 0,77 |
|              |  |           |           |            |                           |          |           |           |           | = 5,82 **  | · [            | $\frac{\text{ , *}}{\text{ , *}}$ | $\frac{\text{ , **}}{\text{ , *}}$ | ] | 0,65 |
|              | <b>PoNaOH 0,1 (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |           |           |            |                           |          |           |           |           |  |                |                                   |                                    |   |      |
| Mineral      | 9,64 a                                 | 12,66 a   | 12,89 a   | 14,02 a    | 10,95 a                   | 5,72 b   | 8,81 a    | 8,47 b    | 32,03 a   |  |                |                                   |                                    |   |      |
| Org. mineral | 9,64 a                                 | 10,04 b   | 11,58 b   | 13,21 a    | 10,61 a                   | 10,40 a  | 8,88 a    | 9,85 a    | 14,37 b   |  |                |                                   |                                    |   |      |
|              |  |           |           |            |                           |          |           |           |           | = 8,25*+0,069 <sup>ns</sup> x-0,521 <sup>ns</sup> y+0,0003 <sup>ns</sup> x <sup>2</sup> +0,017**y <sup>2</sup> |                |                                   |                                    |   | 0,83 |
|              |  |           |           |            |                           |          |           |           |           | = 9,41**+0,008 <sup>ns</sup> x-0,192 <sup>ns</sup> y+0,0002 <sup>ns</sup> x <sup>2</sup> +0,006*y <sup>2</sup> |                |                                   |                                    |   | 0,74 |
|              | <b>PiNaOH 0,5 (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |           |           |            |                           |          |           |           |           |  |                |                                   |                                    |   |      |
| Mineral      | 4,14 a                                 | 6,41 a    | 5,64 b    | 6,11 b     | 4,71 a                    | 4,47 a   | 3,98 b    | 8,32 a    | 8,80 a    |  |                |                                   |                                    |   |      |
| Org. mineral | 4,14 a                                 | 4,61 b    | 7,11a     | 6,64 a     | 3,17 b                    | 4,67 a   | 5,42 a    | 5,49 b    | 7,90 b    |  |                |                                   |                                    |   |      |
|              |  |           |           |            |                           |          |           |           |           | = 3,191**+0,0129 <sup>ns</sup> x+0,0824**y   |                |                                   |                                    |   | 0,71 |
|              |  |           |           |            |                           |          |           |           |           | = 2,142*+0,025*x+0,1011**y   |                |                                   |                                    |   | 0,78 |
|              | <b>PoNaOH 0,5 (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |           |           |            |                           |          |           |           |           |  |                |                                   |                                    |   |      |
| Mineral      | 5,02 a                                 | 4,47 b    | 6,71 a    | 4,25 b     | 5,97 b                    | 5,37 a   | 7,08 a    | 4,00 b    | 3,31 b    |  |                |                                   |                                    |   |      |
| Org. mineral | 5,02 a                                 | 6,42 a    | 5,80 b    | 5,94 a     | 6,76 a                    | 5,94 a   | 6,25 b    | 5,31 a    | 3,96 a    |  |                |                                   |                                    |   |      |
|              |  |           |           |            |                           |          |           |           |           | = 6,131**-0,0002 <sup>ns</sup> x-0,0514*y  |                |                                   |                                    |   | 0,53 |
|              |  |           |           |            |                           |          |           |           |           | = 6,697**+0,0053 <sup>ns</sup> x-0,0623**y   |                |                                   |                                    |   | 0,61 |

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste t a 5% de probabilidade  
ns: não-significativo a 5% de probabilidade; \* e \*\*: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Para ambas as fontes de P, os dados da interação entre doses de P e épocas de avaliação se ajustaram ao modelo Gaussian para a fração  $Pi_{NaOH0,1}$  (Figuras 3a e 3b). Na fonte organomineral, o teor máximo de  $Pi_{NaOH0,1}$  foi de  $5,8 \text{ mg kg}^{-1}$  estimado na dose  $108,0 \text{ mg dm}^{-3}$  de P aos 32,2 DAE (Figura 3a); por outro lado para a fonte mineral, o teor máximo estimado foi de  $11,1 \text{ mg kg}^{-1}$ , na dose  $125,4 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, aos 50,3 DAE (Figura 3b). O que se tem observado é que em condições de aplicação de altas doses de fertilizantes fosfatados, a fração moderadamente lábil atua como dreno do P aplicado. Contudo, em ambientes de baixa aplicação deste tipo de fertilizante, esta fração atuará como fonte de P, tamponando a solução do solo, para assim atingir os requerimentos de exportação da planta cultivada (CARNEIRO et al., 2011; TOKURA et al., 2011).

Examinando a interação entre fontes e doses de P na variável  $Po_{NaOH 0,1}$ , observa-se que na dose  $120 \text{ mg dm}^{-3}$  de P não houve diferença estatística; no entanto, nas doses 40 e  $80 \text{ mg dm}^{-3}$  de P diferiu e a fonte mineral obteve percentual superior de 26%, 15% sobre a organomineral. Avaliando a interação entre fontes de P e épocas de avaliação, constata que no 14º DAE não houve diferença estatística e nos outros dias diferiu. A fonte organomineral sobressaiu no 7 (82%) e 28 (16%) DAE. A fonte mineral foi superior no 49 DAE (123%).

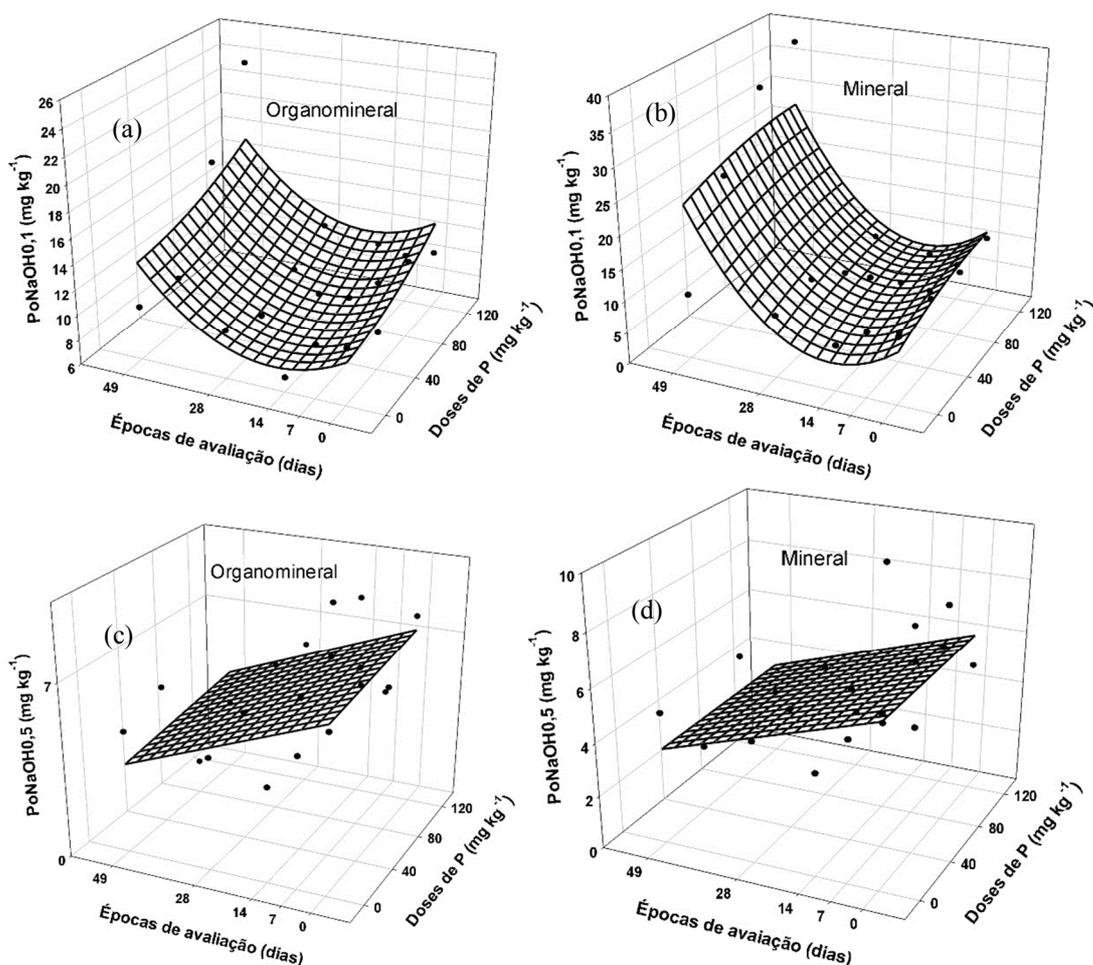
Para as interações entre doses de P e épocas de avaliação, os dados para ambas as fontes de P se ajustaram ao modelo parabolóide. Na fonte organomineral, o menor teor de  $Po_{NaOH 0,1}$  foi de  $7,7 \text{ mg kg}^{-1}$  na dose  $19,1 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, aos 16,6 DAE (Figura 4a), enquanto que, para a fonte mineral o menor teor de  $Po_{NaOH 0,1}$  foi de  $0,4 \text{ mg kg}^{-1}$  na dose  $114,8 \text{ mg dm}^{-3}$  de P aos 15 DAE (Figura 4b). Pelo fato de o Po ter uma menor adsorção no solo, o movimento do mesmo no perfil do solo é maior quando comparado com as formas inorgânicas. Além disso, as formas orgânicas não precipitam como as inorgânicas, o que favorece o movimento vertical, incrementando teores de Po em profundidade (GALVANI et al, 2008). Como resultado, a mineralização do material orgânico junto com a liberação de ácidos, pode competir pelos sítios de adsorção, aumentam sua disponibilidade nas camadas mais profundas (ROSOLEM et al., 2004)



**Figura 3.** Teores de P inorgânico moderadamente lábil do solo, extraídos pelos extratores NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>, em função de fonte de adubação fosfatada (organomineral e mineral), doses de fósforo (0, 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P) e épocas de avaliação (0, 7, 14, 28 e 49 dias) de um Latossolo Vermelho Distrófico típico, cultivado com milho no município de Dourados-MS, 2017.

Para a fração  $P_{iNaOH\ 0,5}$ , observou-se interação significativa entre fontes e doses de P observa-se que nas doses 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P, a fonte organomineral resultou em um percentual 26% e 8,7% respectivamente, superior a fonte mineral. No entanto, na dose 40 mg dm<sup>-3</sup> de P a fonte mineral apresentou um incremento de 39% sobre a organomineral. Examinando a interação entre fontes de P e épocas de avaliação, observa-se que as frações  $P_{iNaOH\ 0,5}$  diferiram entre as fontes de P, com valores significativamente maiores na fonte mineral, com incremento de 49%, 52% e 11,4%, aos 0, 28 e 49 DAE. Já aos 14 DAE, a fração  $P_{iNaOH\ 0,5}$  foi maior estatisticamente, com o uso da fonte organomineral, com incremento de 36%. As frações moderadamente lábeis podem atuar como fonte ou dreno de P disponível, ou seja, quando a adição de P, via fertilizante é maior do que a quantidade de P exportado pelo sistema (absorção pelas plantas e perdas), o fósforo remanescente é estabilizado em formas de labilidade

intermediária, que atuam como dreno do fósforo adicionado. No entanto, quando ocorre baixa adição de P, via fertilizantes e a exportação do fósforo pelo sistema é maior, a fração de labilidade intermediária atua como fonte, aumentando os teores na solução do solo da fração lábil (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001; CONTE et al., 2003; GATIBONI et al., 2007).



**Figura 4.** Teores de P orgânico moderadamente lábil do solo, extraídos pelos extratores NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>, em função de fonte de adubação fosfatada (organomineral e mineral), doses de fósforo (0, 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P) e épocas de avaliação (0, 7, 14, 28 e 49 dias) de um Latossolo Vermelho Distrófico típico, cultivado com milho no município de Dourados-MS, 2017.

Com relação à interação doses de P e épocas de avaliação para a fração  $P_{iNaOH\ 0,5}$ , em ambas as fontes de P, os dados se ajustaram ao modelo linear. Para a fonte organomineral, o teor estimado na dose de 120 mg dm<sup>-3</sup> de P aos 49 DAE foi de 10,1 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 3c), enquanto que para a fonte mineral foi de 8,8 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 3d).

Analisando-se o efeito da interação entre doses e fontes de P (Quadro 8), para a fração  $P_{O_{NaOH} 0,5}$  observa-se que nas doses 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P as fontes foram estatisticamente diferentes. Nas doses de 40 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P, as frações  $P_{O_{NaOH} 0,5}$  foram superiores em 44% e 40%, respectivamente, utilizando a fonte organomineral em relação a mineral. No entanto, na dose 80 mg dm<sup>-3</sup> de P, utilizando a fonte mineral, a fração  $P_{O_{NaOH} 0,5}$  foi 16% superior à fonte organomineral. Já para a interação entre fontes e épocas de avaliação, as duas fontes de P não diferiram aos 7 DAE, mas diferiram estatisticamente nas demais épocas de avaliação. A fonte organomineral sobressaiu sobre a fonte mineral aos 0 (13%), 28 (33%) e 49 (20%) DAE, enquanto a fonte organomineral foi superior somente aos 14 DAE (13%). Esses resultados podem ser explicados pela presença de matéria orgânica no fertilizante organomineral. Segundo Sá (2004), os íons orgânicos podem substituir os íons fosfatos nos sítios de adsorção, aumentando a disponibilidade de P para as plantas.

Para ambas as fontes de P, os dados das frações de  $P_{O_{NaOH} 0,5}$  das interações entre doses e épocas de avaliação se ajustaram ao modelo linear. Para a fonte organomineral, o teor de  $P_{O_{NaOH} 0,5}$  foi de 4,3 mg kg<sup>-1</sup> na dose estimada de 120 mg dm<sup>-3</sup> de P aos 49 DAE foi (Figura 4c), enquanto que para a fonte mineral o teor de  $P_{O_{NaOH} 0,5}$  foi de 3,6 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 4d).

#### 4.1.1.3 P Não Lábil do Solo (PiHCl e P residual)

A fração de P extraída com HCl 1 mol L<sup>-1</sup> representa as formas inorgânicas de P associadas ao Ca (CROSS e SCHLESINGER, 1995). O P residual é constituído pelas frações recalcitrantes de fósforo, sendo representadas pelo P nas substâncias húmicas, bem como formas inorgânicas de P insolúveis, que não contribuem para a nutrição das plantas, a não ser em situações de extrema deficiência de P no solo (GATIBONI et al., 2005).

Para a interação entre doses e fonte de P, a fração Pi HCl não diferiu na dose de 40 mg dm<sup>-3</sup> de P (Quadro 9). Já nas doses de 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P essa fração foi superior em 171% e 189% respectivamente, para a fonte organomineral em relação a fonte mineral. A interação entre fontes e épocas de avaliação somente foi significativa a partir do 7 DAE, e a fonte organomineral obteve um incremento de 42%, 42%, 140% e 59%, respectivamente do 7 aos 49 DAE. Nesse caso, foi notório que a fonte organomineral apresentou maiores teores na fração PiHCl; no entanto, o Pi está ligado à cálcio e está fortemente adsorvido aos colóides do solo e são formas de difícil

reversibilidade (ZHANG e MCKENZIE, 1997). Com relação a interação doses de P e épocas de avaliação, os dados de Pi HCl, para ambas as fontes de P se ajustaram ao modelo Gaussian. Para a fonte organomineral, o teor máximo de Pi HCl foi de 41,7 mg kg<sup>-1</sup> na dose 107,1 mg dm<sup>-3</sup> de P aos 33,11 DAE (Figura 5a), enquanto que na fonte mineral o teor máximo foi de 9,1 mg kg<sup>-1</sup> na dose 96,4 mg dm<sup>-3</sup> de P aos 68,1 DAE (Figura 5b).

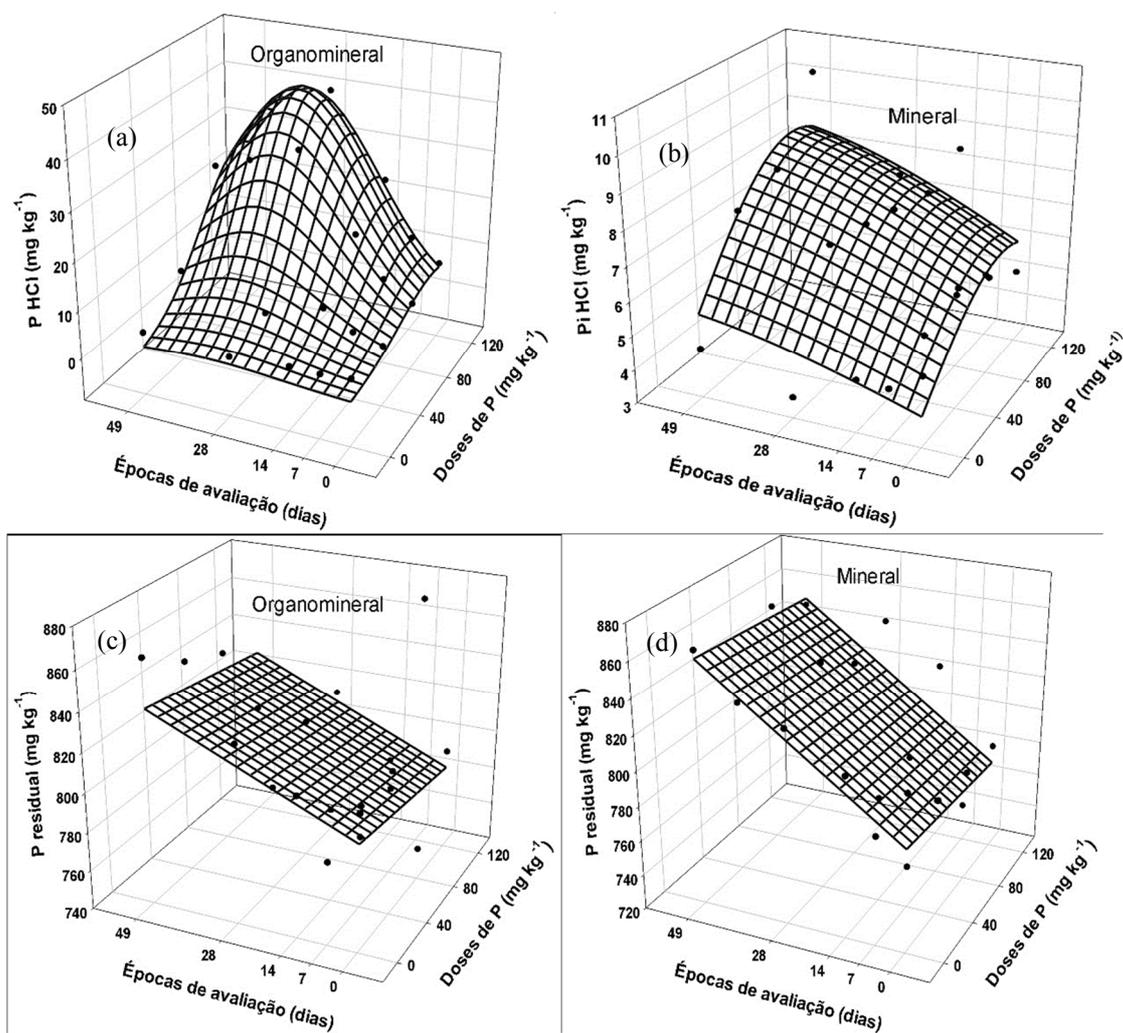
Avaliando a interação entre fontes e doses de P para a fração P residual, observa-se que não houve diferença estatística entre as fontes nas doses de 40, 80 mg dm<sup>-3</sup> de P. Já na dose 120 mg dm<sup>-3</sup> de P, a fonte mineral foi superior a fonte organomineral em 6%. Para a interação fontes e épocas de avaliação, as fontes de P somente diferiram aos 7 e 28 DAE (Quadro 9), com superioridade para a fonte mineral, com acréscimos de 2,4% e 3,4%, respectivamente. Os dados dos teores de P da fração P residual, da interação entre doses e épocas de avaliação se ajustaram ao modelo linear. Para a fonte organomineral, o teor máximo estimado na dose 120 mg dm<sup>-3</sup> de P aos 49 DAE foi de 828,5 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 5c), enquanto que na fonte mineral, foi de 851,9 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 5d). Esses resultados permitem inferir que independente da fonte de P, houve saturação dos sítios ativos de adsorção de P no LVd, contribuindo para maiores teores na fração não lábil de P (RODRIGUES et al., 2015).

O P aplicado ao solo é redistribuído lentamente para frações menos lábeis, devido às reações com a superfície de argilominerais e óxidos de Fe e Al (BARROW, 1985). Com o passar do tempo, ocorre o envelhecimento do P, pois sua alta especificidade nas reações de adsorção nos grupos funcionais de superfície do solo resulta na formação de complexos de esfera-interna monodentadas ou bidentadas (NOVAIS e SMITH, 1999). Assim, a possibilidade de dessorção do fosfato depende da quantidade de ligações que tenha o oxigênio do fosfato, já que a energia de ligação é crescente para os compostos monodentados, bidentados e binucleados (RAGHOTHAMA e KARTHIKEYAN, 2005).

**Quadro 9.** Desdobramento da interação tripla (fontes de P x doses de P x época de avaliação) das frações não lábeis de fósforo do Latossolo Vermelho Distrófico típico, cultivado com milho. Dourados-MS.

| Fontes de P                            | Doses (mg dm <sup>-3</sup> ) |         |         |         | Época de avaliação (dias) |         |         |         |         | Equação polinomial múltipla<br>(época de avaliação x doses)   | R <sup>2</sup>  |
|--|------------------------------|---------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---|---|
|  | 0                            | 40      | 80      | 120     | 0                         | 7       | 14      | 28      | 49      |   |   |
| <b>PiHCl (mg kg<sup>-1</sup>)</b>      |                              |         |         |         |                           |         |         |         |         |   |   |
| Mineral                                | 4,45 a                       | 6,93 a  | 6,81 b  | 7,27 b  | 5,88 a                    | 5,04 b  | 8,34 b  | 7,16 b  | 8,61 b  | = 9,10 ** · [ $\frac{\quad}{\quad}$ , $\frac{\quad}{\quad}$ ] | 0,76  |
| Org. mineral                           | 4,45 a                       | 6,87 a  | 18,51 a | 21,01 a | 5,41 a                    | 7,16 a  | 11,86 a | 17,17 a | 13,67 a |   | = 41,66 * · [ $\frac{\quad}{\quad}$ , $\frac{\quad}{\quad}$ ] |
| <b>P residual (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |                              |         |         |         |                           |         |         |         |         |   |   |
| Mineral                                | 819,7 a                      | 796,3 a | 805,9 a | 834,1 a | 784,2 a                   | 792,6 a | 797,2 a | 844,0 a | 842,6 a | = 779,28** - 0,0595 <sup>ns</sup> x + 1,629**y                | 0,78  |
| Org. mineral                           | 819,7 a                      | 804,3 a | 793,6 a | 785,7 b | 796,3 a                   | 773,9 b | 793,4 a | 816,2 b | 843,1 a | = 794,82** - 0,0899 <sup>ns</sup> x + 0,9079*y                | 0,54  |

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste t a 5% de probabilidade  
ns: não-significativo a 5% de probabilidade; \* e \*\*: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.



**Figura 5.** Teores de P não lábil do solo, obtidos com os extratores HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, em função de fonte de adubação fosfatada (organomineral e mineral), doses de fósforo (0, 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P) e épocas de avaliação (0, 7, 14, 28 e 49 dias) de um Latossolo Vermelho Distrófico típico, cultivado com milho no município de Dourados-MS, 2017.

#### 4.1.2 Latossolo Vermelho Distróférico (LVdf)

Verificou-se efeito significativo da interação entre fontes de P, doses de P e épocas de avaliação para todas as frações de P, com exceção do P<sub>iNaHCO<sub>3</sub></sub> e P residual. A fração P<sub>iNaHCO<sub>3</sub></sub> apresentou efeito para as interações duplas (fontes x doses; fontes x épocas e doses x épocas). Para P residual, houve interação entre fontes x épocas e doses x épocas (Quadro 10).

**Quadro 10.** Resumo da análise de variância (valores de F) para os efeitos de fontes de adubação fosfatada (F) e de épocas de avaliação (E) nas frações de P de um Latossolo Vermelho Distroférrico, no município de Dourados-MS, 2017.

| Fatores de variação | Pi <sub>RTA</sub> | Pi <sub>NaHCO<sub>3</sub></sub> | Po <sub>NaHCO<sub>3</sub></sub> | Pi <sub>NaOH0,1</sub> | Po <sub>NaOH0,1</sub> | P <sub>HCl</sub> | Pi <sub>NaOH0,5</sub> | Po <sub>NaOH0,5</sub> | P <sub>residual</sub> |
|---------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Fontes (F)          | 614,1**           | 9,9**                           | 57,5**                          | 10,6**                | 39,3**                | 245,3**          | 2,8*                  | 505,2**               | 2,74*                 |
| Doses (D)           | 3409,3**          | 73,9**                          | 18,5**                          | 47,4**                | 287,7**               | 339,4**          | 15,0**                | 638,3**               | 0,21ns                |
| Épocas (E)          | 90,6**            | 155,9**                         | 11,2**                          | 10,3**                | 14,2**                | 59,9**           | 12,2**                | 55,3**                | 38,07**               |
| F x D               | -307,1ns          | 33,9**                          | 52,9**                          | -9,5ns                | -15,9ns               | 405,0**          | 2,0ns                 | 552,9**               | 1,96ns                |
| F x E               | 229,2**           | 46,1**                          | 14,5**                          | 1,6*                  | 37,3**                | 28,7**           | 0,81ns                | 11,9**                | 3,57**                |
| D x E               | 72,1**            | 24,9**                          | 8,2**                           | 4,2**                 | 11,4**                | 21,5**           | 1,55ns                | 105,1**               | 3,13**                |
| F x D x E           | 22,2**            | -7,2ns                          | 31,3**                          | 2,9**                 | 19,2**                | 43,4**           | 2,6**                 | 109,2**               | 0,25ns                |
| Média               | 4,99              | 6,57                            | 4,88                            | 6,79                  | 54,92                 | 9,63             | 18,84                 | 26,44                 | 874,3                 |
| CV(%)               | 11,92             | 9,30                            | 18,52                           | 15,41                 | 7,97                  | 11,96            | 6,95                  | 10,07                 | 4,05                  |

<sup>(1)</sup> Pi<sub>RTA</sub>, P inorgânico extraído por resina trocadora de ânions; Pi<sub>NaHCO<sub>3</sub></sub>, P inorgânico extraído por solução de NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>NaHCO<sub>3</sub></sub>, P orgânico extraído por solução de NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>NaOH 0,1</sub>, P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>NaOH 0,1</sub>, P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HCl</sub>, P inorgânico extraído com solução de HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>NaOH 0,5</sub>, P inorgânico extraído por solução de NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>NaOH 0,5</sub>, P orgânico extraído por solução de NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P residual, P inorgânico e orgânico extraídos por H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + MgCl<sub>2</sub>. \*\*Significativo a 1% de probabilidade.

#### 4.1.2.1 P Lábil do Solo (P<sub>RTA</sub>, P<sub>iNaHCO<sub>3</sub></sub> e P<sub>oNaHCO<sub>3</sub></sub>)

Analisando-se as interações entre fontes e doses de P para a fração P<sub>RTA</sub>, observa-se que só a partir da dose de 40 mg dm<sup>-3</sup> de P as fontes diferiram estatisticamente, com incremento de 131%, 142% e 213%, respectivamente, para as doses de 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P para a fonte mineral em relação a organomineral (Quadro 11). O mesmo comportamento foi observado para a interação entre fontes de P e épocas de avaliação, onde constatou-se que aplicando a fonte mineral a fração P<sub>RTA</sub> foi 194%, 282%, 247% e 303% superior em relação a organomineral, respectivamente do 7 aos 49 DAE.

O'Hallaran (1993), avaliando o efeito do manejo e a fertilização inorgânica e orgânica nas frações de P no solo na cultura de milho cultivado de forma contínua, observou que a aplicação de adubos fosfatados inorgânicos aumentou em média 79% a participação das frações P<sub>iRTA</sub> e P<sub>iNaHCO<sub>3</sub></sub> no compartimento P lábil e, em contrapartida o P<sub>oNaHCO<sub>3</sub></sub> participou com 11% desta fração. Para a interação doses de P e épocas de avaliação, os dados da fração P<sub>RTA</sub>, em ambas as fontes de P se ajustaram ao modelo linear, com teor de P<sub>RTA</sub> de 3,5 mg kg<sup>-1</sup> estimado na dose de 120 mg dm<sup>-3</sup> de P aos 49 DAE quando a fonte de P utilizada foi a organomineral (Figura 6a); quando utilizou a fonte mineral, o teor de P<sub>RTA</sub> foi de 14,1 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 6b).

Conte (2001), avaliando a aplicação de doses de fertilizante fosfatado no acúmulo de fósforo nas frações orgânicas e inorgânicas em um Latossolo vermelho distroférico no sistema plantio direto, constatou que os maiores teores P lábil (P<sub>RTA</sub> + P<sub>iBIC</sub> + P<sub>oBIC</sub>) tinham correlação com o aumento das doses aplicadas fosfatos de alta solubilidade. Trabalho realizado por Sharpley e Sisak (1997), comparando a adição de P em forma inorgânica (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) e orgânica (cama de frango), constataram que a disponibilidade do P da cama de frango era menor devido à complexação do P com compostos orgânicos solúveis (organo-Ca, Fe, e Al).

A interação entre fontes e doses de P, para a fração P<sub>iNaHCO<sub>3</sub></sub> foi significativa nas doses de 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> (Quadro 11). Para a dose de 40 mg dm<sup>-3</sup>, a fonte organomineral resultou em um teor 11% superior em relação a mineral. Já para as doses de 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup>, os maiores teores da fração P<sub>iNaHCO<sub>3</sub></sub> foram encontrados quando se utilizou a fonte mineral, com diferenças de 25% e 27%, respectivamente. Para a interação entre fontes de P e épocas de avaliação, a fonte organomineral contribuiu com incremento de 22% nessa fração aos 28 DAE; porém, aos 7, 14 e 49 DAE, a fonte

mineral foi estatisticamente maior, com incremento da fração  $Pi_{NaHCO_3}$  em 40%, 28% e 13%, respectivamente. Nessa fração, observa-se que os percentuais de incremento contribuem ativamente para a fração lábil no suprimento do nutriente para as plantas (CROSS e SCHLESINGER, 1995; GATIBONI et al., 2007; GONÇALVES e MEURER, 2009). Os dados de  $Pi_{NaHCO_3}$  da interação entre doses de P e épocas de avaliação, para ambas as fontes de P, se ajustaram ao modelo linear. Quando a fonte utilizada foi a organomineral, o teor dessa fração foi de  $4,6 \text{ mg kg}^{-1}$  estimado na dose de  $120 \text{ mg dm}^{-3}$  de P aos 49 DAE (Figura 6c), enquanto para a fonte mineral o teor foi de  $11,5 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 6d).

O Pi extraído por  $NaHCO_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  é considerado lábil e remete a uma fração que a RTA não teve a capacidade de extrair anteriormente. Essa fração é extraída devido ao aumento do pH ocasionado pelo extrator, que resulta em um processo de troca de  $OH^-$  pelo  $H_2PO_4^-$  fracamente adsorvido aos argilominerais e óxidos de Fe e Al, portanto lábil, aumentando o teor de P na solução do solo (KOVAR e PIERZYNSKI, 2009).

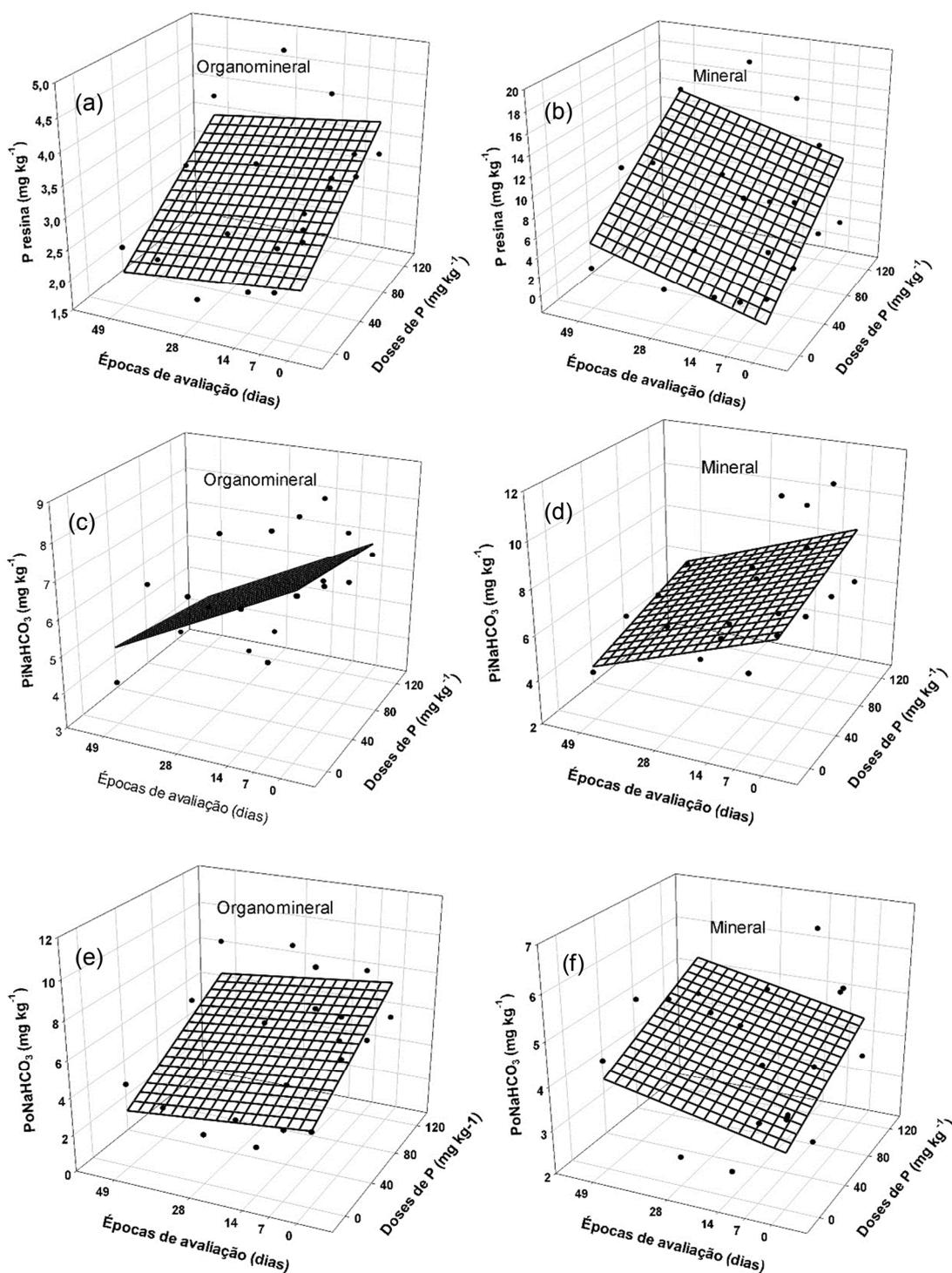
Avaliando a variável  $PO_{NaHCO_3}$  e, para a interação entre fontes e doses de P, observa-se que nas doses  $40$ ,  $80$  e  $120 \text{ mg dm}^{-3}$  de P houve diferença estatística entre as fontes, sendo que a organomineral propiciou um teor 17%, 50% e 45% superior, respectivamente, à fonte mineral (Quadro 11). Essa variação ocorreu porque o Po lábil corresponde à fração mais instável do Po, que pode se tornar disponível para as plantas com maior facilidade (HEDLEY et al., 1982), principalmente porque o P dessa fração está disponível aos microrganismos do solo (BOWMAN e COLE, 1978). Trata-se de uma fração sujeita a transformações induzidas pela atividade microbiana, tipo de solo e atividade enzimática (HEDLEY et al., 1982; BECK e SANCHES, 1994).

Para a interação entre fontes de P e épocas de avaliação, observa que as fontes foram estatisticamente iguais aos 14, 28 e 49 DAE. A fonte organomineral sobressaiu sobre a mineral aos 0 DAE (28%) e 7 DAE (63%). Estes resultados demonstram que o Po, durante o processo de mineralização, libera ânions orgânicos que pode diminuir a adsorção de P por competição ou revestimentos das superfícies dos óxidos. Além disso, esses compostos favorecem a complexação de Fe e Al, diminuindo as reações de precipitação do fosfato com esses elementos (HUE et al., 1994). Sharpley e Sisak (1997) relataram que a aplicação de esterco aumenta a atividade microbiana, e inicialmente, sequestra o P para essa fração; posteriormente, ele é disponibilizado às plantas pela sua mineralização.

**Quadro 11.** Desdobramento da interação entre fontes de P, doses de P e época de avaliação das frações lábeis de fósforo do Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com milho. Dourados-MS.

| Fontes de P  | Doses (mg dm <sup>-3</sup> ) |           |           |            | Época de avaliação (dias)                       |          |           |           |           | Equação polinomial múltipla<br>(época de avaliação x doses) | R <sup>2</sup> |
|--------------|------------------------------|-----------|-----------|------------|---|----------|-----------|-----------|-----------|---|----------------|
|              |                              |           |           |            | <b>P resina (mg kg<sup>-1</sup>)</b>            |          |           |           |           |   |                |
|              | <b>0</b>                     | <b>40</b> | <b>80</b> | <b>120</b> | <b>0</b>  | <b>7</b> | <b>14</b> | <b>28</b> | <b>49</b> |   |                |
| Mineral      | 2,38 a                       | 6,11 a    | 7,37 a    | 12,13 a    | 3,45 a  | 8,01 a   | 10,34 a   | 9,89 a    | 10,99 a   | = 0,5888 <sup>ns</sup> +0,0753**x+0,0913 <sup>ns</sup> y    | 0,79           |
| Org. mineral | 2,38 a                       | 2,64 b    | 3,05 b    | 3,87 b     | 3,31 a  | 2,72 b   | 2,71 b    | 2,85 b    | 2,73 b    | = 2,374**+0,0122**x-0,0063 <sup>ns</sup> y                  | 0,75           |
|              |                              |           |           |            | <b>PiNaHCO<sub>3</sub> (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |          |           |           |           |   |                |
| Mineral      | 6,16 a                       | 6,46 b    | 7,26 a    | 7,60 a     | 6,70 a  | 8,76 a   | 9,65 a    | 4,85 b    | 5,59 a    | = 7,218**+0,0128 <sup>ns</sup> x0,057*y                     | 0,61           |
| Org. mineral | 6,16 a                       | 7,17 a    | 5,80 b    | 5,97 b     | 6,96 a  | 6,25 b   | 7,55 b    | 5,91 a    | 4,95 b    | = 7,508**-0,0048 <sup>ns</sup> x-0,0482**y                  | 0,61           |
|              |                              |           |           |            | <b>PoNaHCO<sub>3</sub> (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |          |           |           |           |   |                |
| Mineral      | 3,51 a                       | 4,23 b    | 4,31b     | 4,91 b     | 4,08 b  | 4,08 b   | 4,47 a    | 4,91 a    | 4,89 a    | = 3,279**+0,0106*x+0,0166 <sup>ns</sup> y                   | 0,53           |
| Org. mineral | 3,51 a                       | 4,96 a    | 6,46 a    | 7,15 a     | 5,21a   | 6,66 a   | 4,16 a    | 4,42 a    | 5,15 a    | = 4,042**+0,031**x-0,0195 <sup>ns</sup> y                   | 0,60           |

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste t a 5% de probabilidade  
ns: não-significativo a 5% de probabilidade; \* e \*\*: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.



**Figura 6.** Teores de P inorgânico e orgânico lábil do solo, extraídos com resina trocadora de ânions e solução de  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , em função de fonte de adubação fosfatada (organomineral e mineral), doses de fósforo ( $0, 40, 80$  e  $120 \text{ mg dm}^{-3}$  de P) e épocas de avaliação ( $0, 7, 14, 28$  e  $49$  dias) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com milho no município de Dourados-MS, 2017.

Para a interação doses de P e épocas de avaliação, os dados da fração  $\text{Po}_{\text{NaHCO}_3}$  se ajustaram ao modelo linear, para ambas as fontes de P (Figuras 6e e 6f). Na fonte organomineral, o teor dessa fração de P foi de  $6,8 \text{ mg kg}^{-1}$ , estimado na dose de

120 mg dm<sup>-3</sup> de P, aos 49 DAE (Figura 6e), enquanto que na fonte mineral foi de 5,4 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 6f). O Po lábil nessa extração provém principalmente de ácidos nucleicos, fosfolipídios e açúcares fosfatados. Esses compostos são de fácil mineralização e passam a P disponível de forma relativamente rápida, podendo ser absorvidos pelas plantas ou imobilizados pelos microrganismos do solo (BLAKE et al., 2003; TURNER e ENGELBRECHT, 2011).

A importância da fração orgânica lábil para disponibilidade de P em solos tropicais foi destacada em outros estudos (RODRIGUES et al., 2015; LEITE et al., 2016). Vários autores verificaram que em solos intemperizados o Po, após sua mineralização, apresenta capacidade de reposição de P, quando da absorção pelas plantas (ZAMUNER et al., 2008; PARTELLI et al., 2009; DIETER et al., 2010; TIECHER et al., 2018).

De acordo com Gatiboni et al. (2007), as formas de P lábil contribuem ativamente para o suprimento de P para as plantas. Portanto, o uso de fontes de P que favoreçam o acúmulo de P nessas formas, em condições de solos com alta capacidade de adsorção de P, como os Latossolos, seriam interessantes no sentido de minimizar a reações de adsorção de P, com manutenção desse nutriente em formas de maior disponibilidade para as plantas. Entretanto, as frações lábeis, P<sub>RTA</sub>, P<sub>iNaHCO<sub>3</sub></sub> e P<sub>oNaHCO<sub>3</sub></sub> constituíram as menores frações no LVdf – tendência esperada em solos altamente intemperizados (WRIGHT e COLEMAN, 1999).

#### **4.1.2.2 P Moderadamente Lábil do Solo (P<sub>iNaOH0,1</sub>, P<sub>oNaOH0,1</sub>, P<sub>iNaOH0,5</sub> e P<sub>oNaOH0,5</sub>)**

O quadro 12 contém os desdobramentos das interações entre fontes de P, doses de P e épocas de avaliação, para as frações P<sub>iNaOH0,1</sub>, P<sub>oNaOH0,1</sub>, P<sub>iNaOH0,5</sub> e P<sub>oNaOH0,5</sub> extraídas do Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf) com a solução extratora NaOH 0,1 e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>.

Para a fração P<sub>iNaOH0,1</sub>, nas doses de 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P, as fontes de P diferiram estatisticamente, com superioridade da fonte mineral, que resultou em teores superiores de 15%, 18% e 13%, respectivamente, sobre a organomineral (Quadro 12). Já para a interação fontes de P e épocas de avaliação constatou-se que a fonte mineral também se destacou a partir do 7 DAE, propiciando teores com incremento de 23%, 17%, 32%, 18% mais elevados aos observados com a fonte organomineral, aos 7, 14, 28 e 49 DAE respectivamente. Nesta fração, observa-se que a diferença percentual entre as

duas fonte é baixa; isto ocorre porque atuam como dreno de P em solos fertilizados ou como uma fonte a curto e médio prazo à biomassa. Sua ação como tamponante pode manter os níveis de P suficientemente altos para o suprimento das plantas (CONTE et al., 2003). O extrator NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> extrai o P inorgânico ligado aos óxidos de Fe e Al e aos argilominerais com energia de ligação intermediária, pelo efeito dos ânions OH<sup>-</sup> liberados pelo extrator, que dissolvem parte do P ligado ao ferro e alumínio dos colóides (CROSS e SCHLESINGER, 1995). Para a interação doses de P e épocas de avaliação, os dados da fração P<sub>iNaOH0,1</sub> da fonte organomineral se ajustaram ao modelo parabolóide, com teor máximo de P<sub>iNaOH0,1</sub> de 5,4 mg kg<sup>-1</sup> na dose 1,79.10<sup>-3</sup> mg dm<sup>-3</sup> de P aos 22,4 DAE (Figura 7a). A fonte mineral ajustou-se ao modelo linear e o teor estimado na dose 120 mg dm<sup>-3</sup> de P aos 49 DAE foi de 8,0 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 7b).

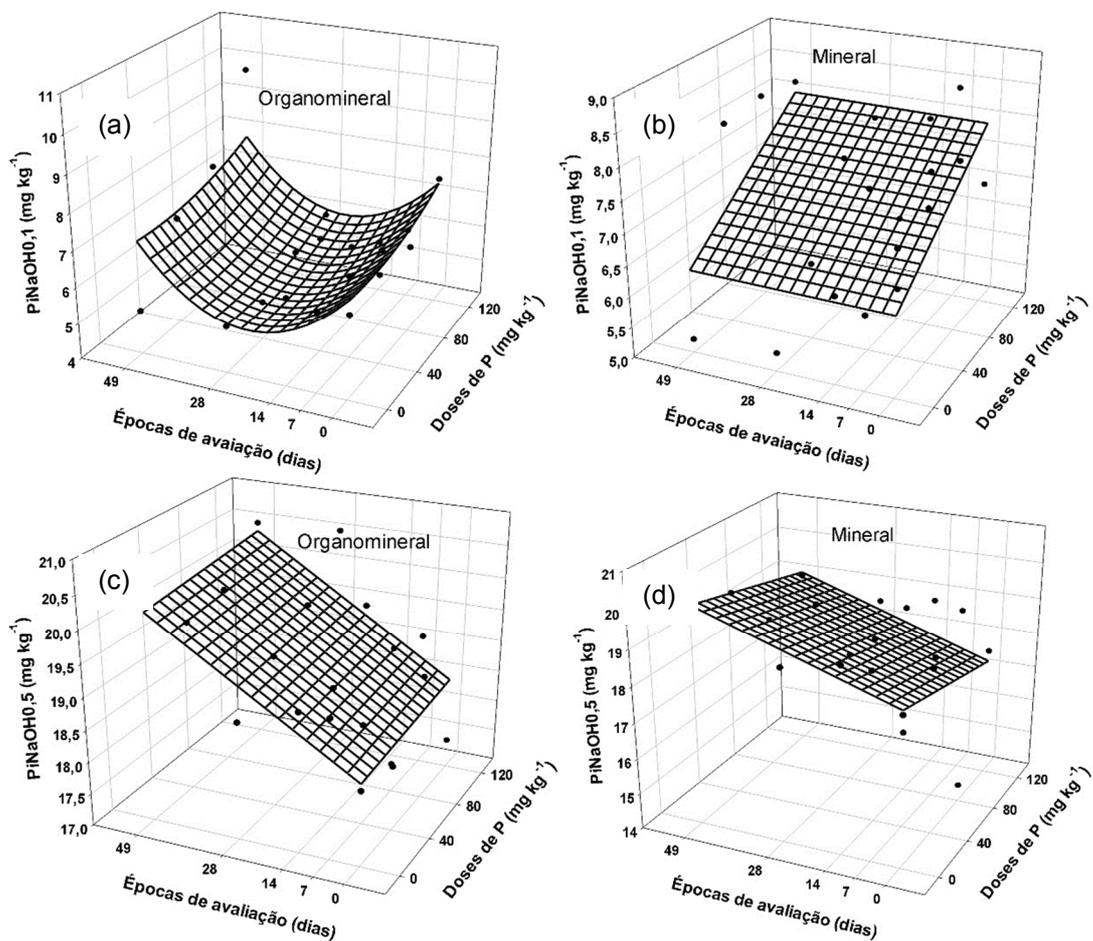
Para a fração P<sub>oNaOH 0,1</sub>, observa-se que nas doses 40 e 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P as fontes diferiram, com superioridade da fonte mineral, que elevou o teor dessa fração em 10%, 28% e 32% sobre a organomineral (Quadro 12). Avaliando fontes de P e épocas de avaliação, constata-se diferença entre as fontes a partir do 7 DAE, onde a fonte mineral propiciou teores superiores em 36%, 41%, 42% e 3%, aos 7, 14, 28 e 49 DAE. Analisando o quadro 12, percebe-se que os teores do P<sub>oNaOH 0,1</sub> são altos na fonte mineral e organomineral; o P orgânico desta fração pode se comportar como um reservatório (fator quantidade) e tamponar as formas mais lábeis de P (TIESEN et al., 1984; NOVAIS et al., 2007). Segundo Beck e Sanches (1994), a fração P<sub>oNaOH 0,1</sub> tem demonstrado ser uma importante fonte de P para o crescimento das culturas em sistemas de baixo uso de fertilizantes.

Tokura et al. (2011) avaliaram o efeito da aplicação de silício e fósforo nas formas de P em Neossolo Quartzarênico Órtico e Latossolo Vermelho Distrófico, antes e após cultivo de arroz e constataram que, entre as formas de P<sub>o</sub>, apenas o P<sub>o NaOH 0,1</sub> contribuiu para nutrição das plantas de arroz. Para a interação doses de P e épocas de avaliação, a fonte organomineral se ajustou ao modelo matemático parabolóide com teor máximo de P<sub>oNaOH0,1</sub> de 43,1 mg kg<sup>-1</sup> na dose 7,5 mg dm<sup>-3</sup> de P, aos 28,2 DAE (Figura 8a). Na fonte mineral, obteve-se um ajuste linear e o teor estimado dessa fração na dose 120 mg dm<sup>-3</sup> de P aos 49 DAE foi de 65,2 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 8b). Redel et al. (2007), relatam que à complexação de P com as substâncias húmicas pode saturar os sítios de adsorção das argilas e hidróxidos e aumentar o P<sub>o</sub> em frações que poderão ser fonte às plantas com o decorrer do tempo.

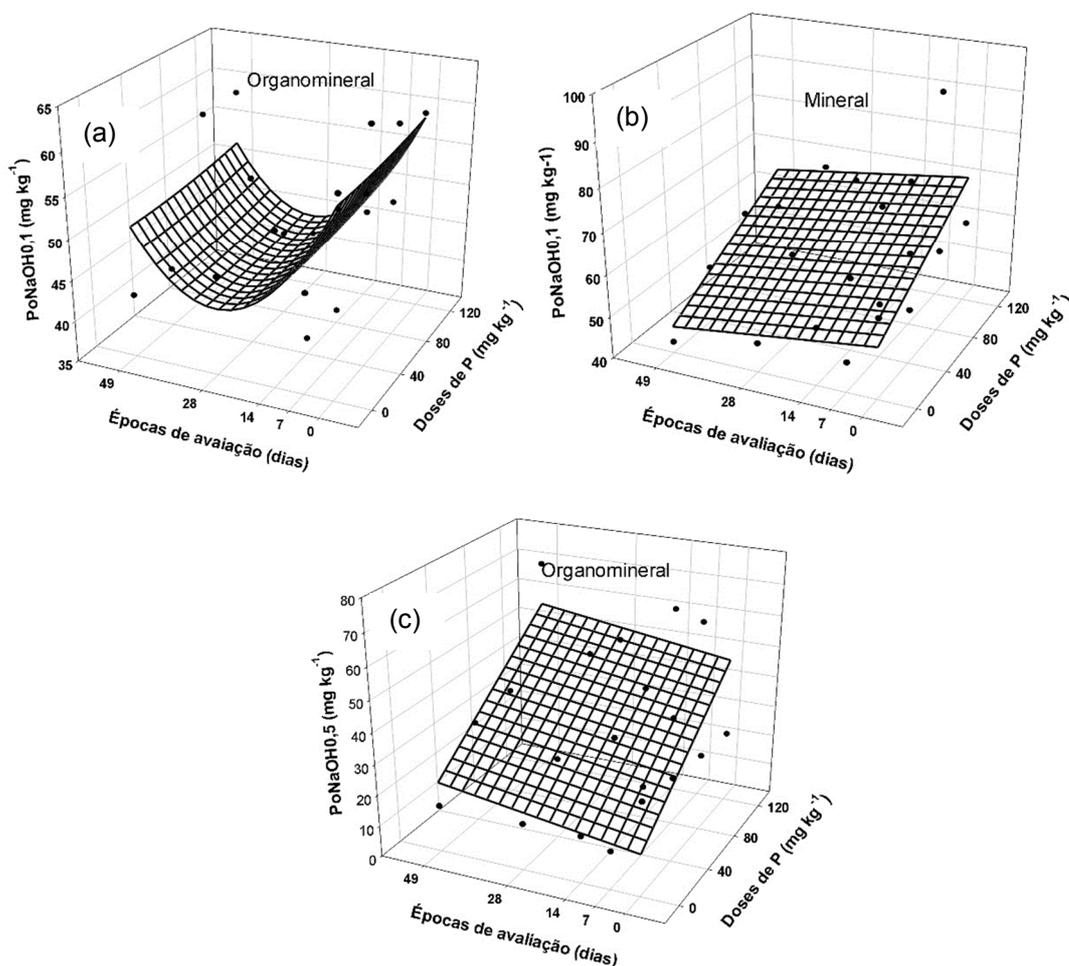
**Quadro 12.** Desdobramento da interação entre fontes de P, doses de P e épocas de avaliação, das frações moderadamente lábeis de fósforo do Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com milho. Dourados-MS.

| Fontes de P                            | Doses (mg dm <sup>-3</sup> ) |         |         |         | Época de avaliação (dias) |         |         |         |         | Equação polinomial múltipla<br>(época de avaliação x doses)  | R <sup>2</sup> |
|--|------------------------------|---------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|--|----------------|
|  | 0                            | 40      | 80      | 120     | 0                         | 7       | 14      | 28      | 49      |  |                |
| <b>PiNaOH 0,1 (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |                              |         |         |         |                           |         |         |         |         |  |                |
| Mineral                                | 6,10 a                       | 7,24 a  | 7,45 a  | 7,88 a  | 7,59 a                    | 7,18 a  | 7,41 a  | 7,19 a  | 8,24 a  | = 6,312**+0,0139**x+0,001 <sup>ns</sup> y  | 0,65           |
| Org. Mineral                           | 6,10 a                       | 6,31 b  | 6,27 b  | 6,95 b  | 7,16 a                    | 5,82 b  | 6,31 b  | 5,46 b  | 6,98 b  | = 6,7** -0,002 <sup>ns</sup> x -0,12*y +7,18E0,05 <sup>ns</sup> x <sup>2</sup> +0,003*y <sup>2</sup> | 0,66           |
| <b>PoNaOH 0,1 (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |                              |         |         |         |                           |         |         |         |         |  |                |
| Mineral                                | 49,92 a                      | 55,48 a | 64,13 a | 67,88 a | 57,47 a                   | 66,95 a | 64,50 a | 67,17 a | 50,42 a | = 52,33**+0,1563**x-0,1203 <sup>ns</sup> y   | 0,70           |
| Org. Mineral                           | 49,92 a                      | 50,34 b | 50,30 b | 51,37 b | 60,40 a                   | 49,18 b | 45,92 b | 47,36 b | 49,00 b | = 57,7** -0,0015 <sup>ns</sup> x -1,03**y +0,0001 <sup>ns</sup> x <sup>2</sup> +0,018*y <sup>2</sup> | 0,62           |
| <b>PiNaOH 0,5 (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |                              |         |         |         |                           |         |         |         |         |  |                |
| Mineral                                | 19,16 a                      | 18,86 a | 17,52b  | 18,57 a | 17,01 b                   | 17,72 b | 19,01 a | 18,72 a | 19,05 b | = 18,287** -0,0078 <sup>ns</sup> x +0,0361*y   | 0,57           |
| Org. Mineral                           | 19,16 a                      | 18,94 a | 19,17 a | 19,29 a | 18,15a                    | 18,68 a | 19,12 a | 19,47 a | 20,21 a | = 18,276**+0,0016 <sup>ns</sup> x+0,0393**y  | 0,77           |
| <b>PoNaOH 0,5 (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |                              |         |         |         |                           |         |         |         |         |  |                |
| Mineral                                | 17,62 a                      | 12,32 b | 21,07 b | 25,32 b | 18,15 b                   | 16,30 b | 26,34 b | 18,41 b | 18,67 b | = 26,44  |                |
| Org. Mineral                           | 17,62 a                      | 29,07 a | 36,15 a | 52,33 a | 25,13 a                   | 28,33 a | 43,38 a | 31,33 a | 33,63 a | = 13,6621**+0,2828**x+0,1859 <sup>ns</sup> y   | 0,81           |

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste t a 5% de probabilidade  
ns: não-significativo a 5% de probabilidade; \* e \*\*: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.



**Figura 7.** Teores de P inorgânico moderadamente lábil do solo, extraídos pelos extratores NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>, em função de fonte de adubação fosfatada (organomineral e mineral), doses de fósforo (0, 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P) e épocas de avaliação (0, 7, 14, 28 e 49 dias) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com milho no município de Dourados-MS, 2017.



**Figura 8.** Teores de P orgânico moderadamente lábil do solo, extraídos pelos extratores NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>, em função de fonte de adubação fosfatada (organomineral e mineral), doses de fósforo (0, 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P) e épocas de avaliação (0, 7, 14, 28 e 49 dias) de um Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com milho no município de Dourados-MS, 2017.

Analisando-se a interação fontes e doses de P para a fração  $P_{iNaOH\ 0,5}$ , observa-se que não houve diferença estatística nas doses 40 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P (Quadro 12). Já na dose 80 mg dm<sup>-3</sup> de P, a fonte organomineral resultou em teor 9% superior à fonte mineral. Examinando a interação fontes e épocas de avaliação, observa-se que estatisticamente as fontes não diferiram aos 14 e 28 DAE e que aos 0, 7 e 49 DAE a fonte organomineral sobressaiu sobre a mineral, com diferenças de 7%, 5% e 6%. Para a interação doses de P e épocas de avaliação, em ambas as fontes de P, os dados de  $P_{iNaOH\ 0,5}$  se ajustaram ao modelo linear. Na fonte organomineral, o teor estimado dessa fração na dose 120 mg dm<sup>-3</sup> de P aos 49 DAE foi de 20,4 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 7c), enquanto que na fonte mineral foi de 19,1 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 7d).

Para a variável  $P_{O_{NaOH\ 0,5}}$  observa-se que nas doses 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P as fontes diferiram estatisticamente, onde a fonte organomineral propiciou teores

136% e 72% e 107% superiores à mineral (Quadro 12). Examinando as duas fontes de P dentro épocas de avaliação, observa-se diferença estatística em todos os períodos de avaliação, onde a fonte organomineral sobressaiu sobre a mineral, com diferença de 39%, 74%, 65%, 70% e 80%, aos 0, 7, 14, 28 e 49 DAE, respectivamente.

Para a interação doses de P e épocas de avaliação, a fonte organomineral se ajustou ao modelo linear e o teor da fração  $P_{NaOH\ 0,5}$  estimado na dose  $120\ mg\ dm^{-3}$  de P aos 49 DAE foi  $56,7\ mg\ kg^{-1}$  (Figura 8c). Os dados de  $P_{NaOH\ 0,5}$  para a fonte mineral não se ajustaram a nenhum modelo, obtendo-se como média o teor de  $26,4\ mg\ kg^{-1}$ . Beck e Sanches (1994) relataram que em Latossolo, a fração do Po extraída com NaOH 0,5 atuou como maior fornecedora de P. Essa fração é constituída principalmente pelos ácidos húmicos e fúlvicos, sendo que os ácidos fúlvicos são considerados mais lábeis e contêm teor de P mais elevado (IVANOFF et al. 1998; SCHROEDER e KOVAR, 2006).

#### 4.1.2.3 P Não Lábil do Solo (PiHCl e P residual)

As formas de fósforo não lábeis equivalem à soma das frações extraídas por HCl e P residual, referente às formas mais estáveis de fósforo orgânico e às formas insolúveis de fósforo inorgânico (DAROUB et al., 2000).

Para a fração PiHCl, a interação entre fontes e doses de P foi significativa a partir das doses de  $40\ mg\ dm^{-3}$  de P (Quadro 13). A maior contribuição para essa fração foi obtida quando a fonte de P utilizada foi a organomineral, onde os teores foram 39%, 79% e 133% superiores à fonte mineral. Já a interação das fontes de P dentro de épocas de avaliação, indicam que as fontes diferiram a partir do 7 DAE, sendo que a fonte organomineral resultou em teores 77%, 89%, 45% e 21% maiores do que os verificados com a fonte mineral. Apesar da fonte organomineral propiciar teores maiores, esse fósforo não está disponível para as plantas, pois esta fração está relacionada com o Pi associado à cargas positivas na superfície dos óxidos do solo, formas insolúveis em água de fosfatos de cálcio, como apatitas e parte do P ocluso, conferindo baixa solubilidade (HEDLEY et al., 1994; LIU et al., 2004). Para a interação entre doses de P e épocas de avaliação, os dados de PiHCl, para ambas as fontes de P se ajustaram ao modelo linear. Na fonte organomineral, o teor da fração PiHCl estimado na dose  $120\ mg\ dm^{-3}$  de P aos 49 DAE foi de  $19,0\ mg\ kg^{-1}$  (Figura 9a), enquanto que na fonte

mineral foi de  $65,2 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 9b). As fontes de P não diferiram para a fração P residual, da interação fontes e doses de P (Quadro 13).

Já para a interação fontes e épocas de avaliação, observa-se que estatisticamente as fontes não diferiram aos 0, 14 e 49 DAE. A fonte mineral sobressaiu aos 7 DAE, com teores de 4% superiores a fonte organomineral e obteve percentual maior no 28 DAE, com acréscimo de 3% em relação a fonte mineral. Apesar dos altos teores de P no solo, o fósforo residual é composto de frações orgânicas e inorgânicas consideradas altamente recalcitrantes, e que não participam ativamente da disponibilidade de P para as plantas (STEWART e SHARPLEY, 1987; RODRIGUES, 2013). No entanto, Gatiboni et al. (2007) relatam que após 12 cultivos sucessivos sem adubação, houve diminuição desta fração no solo, indicando que em longos períodos de deficiência de P, esta fração pode disponibilizar P as plantas, mas o processo se dá em taxa insuficiente para satisfazer a demanda das plantas e manutenção de elevadas produtividades.

Para a interação entre doses de P e épocas de avaliação, os dados de P residual se ajustaram ao modelo linear para ambas as fontes e o teor de P residual estimada na dose  $120 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, aos 49 DAE foi de  $917,2 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 9c), enquanto que na fonte mineral, foi de  $911,5 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 9d). A fração residual atua como dreno de P em sistemas nos quais há adição do elemento, principalmente quando são usados adubos ou resíduos orgânicos (GODLINSKI e CHANG, 2008). Sendo assim, solos que recebem P em excesso, principalmente na forma de adubos orgânicos, ficam predispostos a acumular P na forma não lábil (BRAOS, 2013).

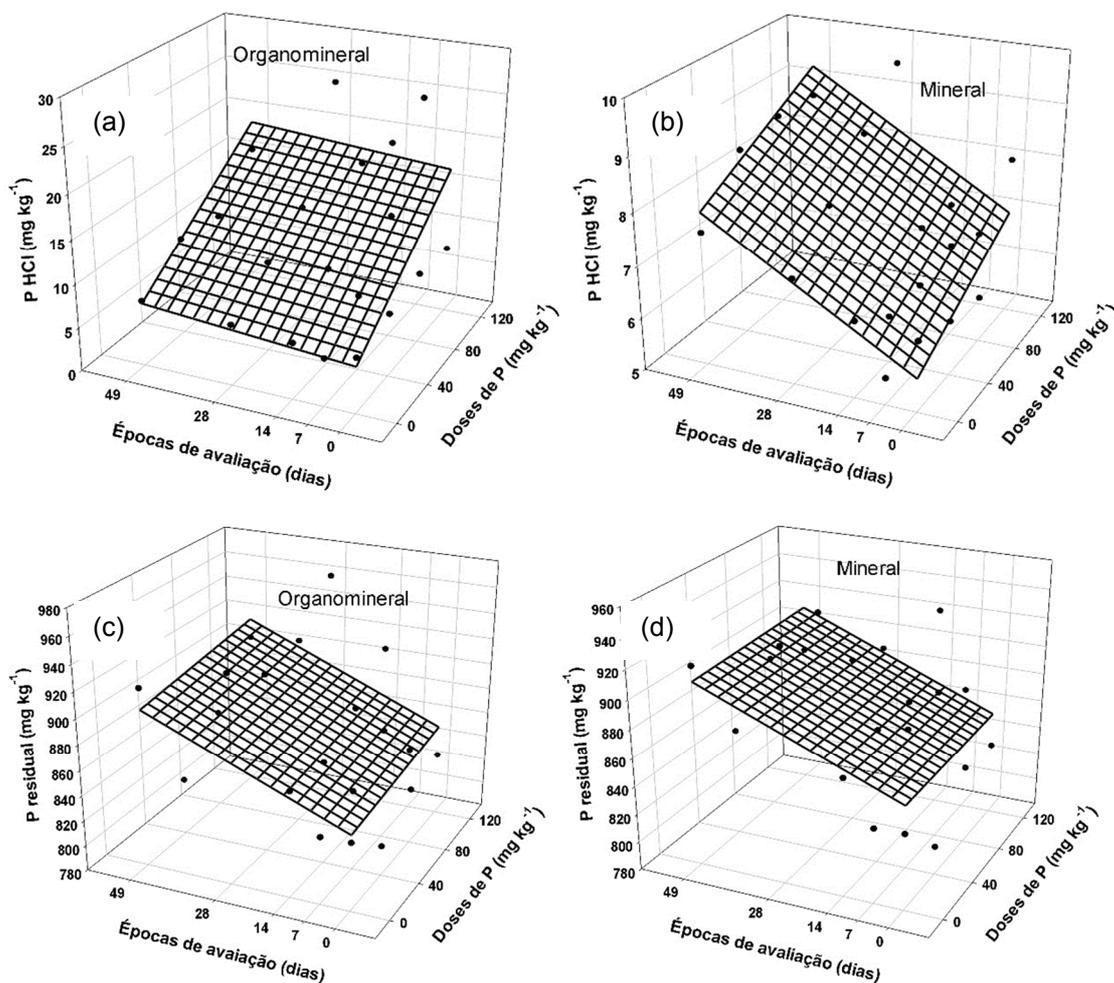
O P residual foi a fração predominante, independente da fonte de P utilizada, e foi influenciada somente pela época de avaliação aos 7 e 28 DAE (Quadro 13).

**Quadro 13.** Desdobramento da interação tripla (fontes de P x doses de P x época de avaliação) das frações não lábeis de fósforo do Latossolo Vermelho Distroférico, cultivado com milho. Dourados-MS.

| Fontes de P                            | Doses (mg dm <sup>-3</sup> ) |         |         |         | Época de avaliação (dias) |         |         |         |         | Equação polinomial múltipla<br>(época de avaliação x doses) | R <sup>2</sup> |
|--|------------------------------|---------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---|----------------|
|  | 0                            | 40      | 80      | 120     | 0                         | 7       | 14      | 28      | 49      |   |                |
| <b>PiHCl (mg kg<sup>-1</sup>)</b>      |                              |         |         |         |                           |         |         |         |         |   |                |
| Mineral                                | 6,58 a                       | 6,99 b  | 7,43 b  | 7,96 b  | 6,66 a                    | 6,63 b  | 6,64 b  | 8,69 b  | 8,68 b  | = 52,33**+0,1563**x-0,1203 <sup>ns</sup> y                  | 0,70           |
| Org. Mineral                           | 6,58 a                       | 9,70 a  | 13,26 a | 18,51 a | 7,16 a                    | 11,75 a | 12,56 a | 12,62 a | 10,54 a | = 5,35*+0,098**x+0,0389 <sup>ns</sup> y                     | 0,76           |
| <b>P residual (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |                              |         |         |         |                           |         |         |         |         |   |                |
| Mineral                                | 878,4 a                      | 871,8 a | 877,3 a | 879,0 a | 822,4 a                   | 878,5 a | 891,6 a | 912,2 b | 875,4 a | = 852,98**+0,0183 <sup>ns</sup> x+1,149*y                   | 0,53           |
| Org. Mineral                           | 878,4 a                      | 850,9 a | 872,4 a | 886,7 a | 825,1 a                   | 841,5 b | 876,1 a | 938,9a  | 885,2 a | = 839,58**+0,116 <sup>ns</sup> x+1,3003*y                   | 0,52           |

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste t a 5% de probabilidade

ns: não-significativo a 5% de probabilidade; \* e \*\*: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.



**Figura 9.** Teores de P não lábil do solo, obtidos com os extratores HCl  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ , em função de fonte de adubação fosfatada (organomineral e mineral), doses de fósforo (0, 40, 80 e  $120 \text{ mg dm}^{-3}$  de P) e épocas de avaliação (0, 7, 14, 28 e 49 dias) de um Latossolo Vermelho Distrófico, cultivado com milho no município de Dourados-MS, 2017.

As frações de fósforo do solo são divididas de acordo com a facilidade com que repõe a solução do solo. O entendimento das formas de P lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis ajuda na compreensão da dinâmica de disponibilidade do fósforo. Trabalhos utilizando o fracionamento de Hedley têm mostrado que as frações orgânicas e inorgânicas de fósforo no solo podem atuar como fonte ou dreno para a solução do solo, dependendo das suas características mineralógicas, das condições ambientais, da adubação e do manejo do solo (GATIBONI, 2003; TIECHER et al., 2012).

## 4.2 Parâmetros avaliados de plantas de milho

### 4.2.1 Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd)

O quadro 14 apresenta o resumo da análise de variância dos dados de diâmetro de colmo e altura de plantas de milho, para fontes, doses e épocas de

avaliação. Nas interações obtidas pela análise de variância dos dados pode-se constatar que os parâmetros de crescimento avaliados foram significativamente alterados pelo uso das fontes de adubação fosfatada, doses P e épocas de avaliação.

**Quadro 14.** Resumo da análise de variância (valores de F) para os efeitos de fontes de adubação fosfatada (F), doses (D) e de épocas de avaliação (E) no diâmetro do colmo e altura de plantas de milho cultivado em Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), no município de Dourados-MS, 2017.

| Fatores de variação | Diâmetro do colmo | Altura de planta |
|---------------------|-------------------|------------------|
| Fontes (F)          | 7813,62**         | 6687,45**        |
| Doses (D)           | 928,91**          | 975,65**         |
| Épocas (E)          | 869,23**          | 1519,19**        |
| FxD                 | 902,18**          | 744,16**         |
| FxE                 | 367,04**          | 734,41**         |
| DxE                 | 51,31**           | 124,53**         |
| FxDxE               | 42,58**           | 82,15**          |
| Média               | 9,21              | 19,01            |
| CV(%)               | 7,78              | 8,25             |

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

A interação entre fontes de P (mineral e organomineral) dentro de doses P na variável diâmetro do colmo, demonstra que houve diferença estatística para as doses de 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P sendo a fonte mineral superior a organomineral em 148%, 168% e 182%, respectivamente (Quadro 15).

Avaliando-se o efeito das fontes dentro de épocas de avaliação, observa-se que, no quarto dia após a emergência (DAE) não houve diferença estatística para a variável diâmetro do colmo; provavelmente, essa fase inicial as plantas estavam sendo nutridas pelo endosperma da semente. A partir do 9 aos 49 DAE observa-se que a fonte mineral contribuiu com incremento no diâmetro do colmo de 27%, 55%, 58%, 130%, 158%, 171%, 172%, 167% e 172%, respectivamente, em relação a fonte organomineral (Quadro 15). Esses percentuais estão diretamente relacionados com os resultados obtidos nas frações de P<sub>RTA</sub> e P<sub>iNaHCO<sub>3</sub></sub>, onde a fonte mineral de P proporcionou maior incremento.

**Quadro 15.** Desdobramento da interação fontes de P, doses de P e época de avaliação das variáveis altura e diâmetro de colmo do milho, cultivado no Latossolo Vermelho Distrófico típico. Dourados-MS.

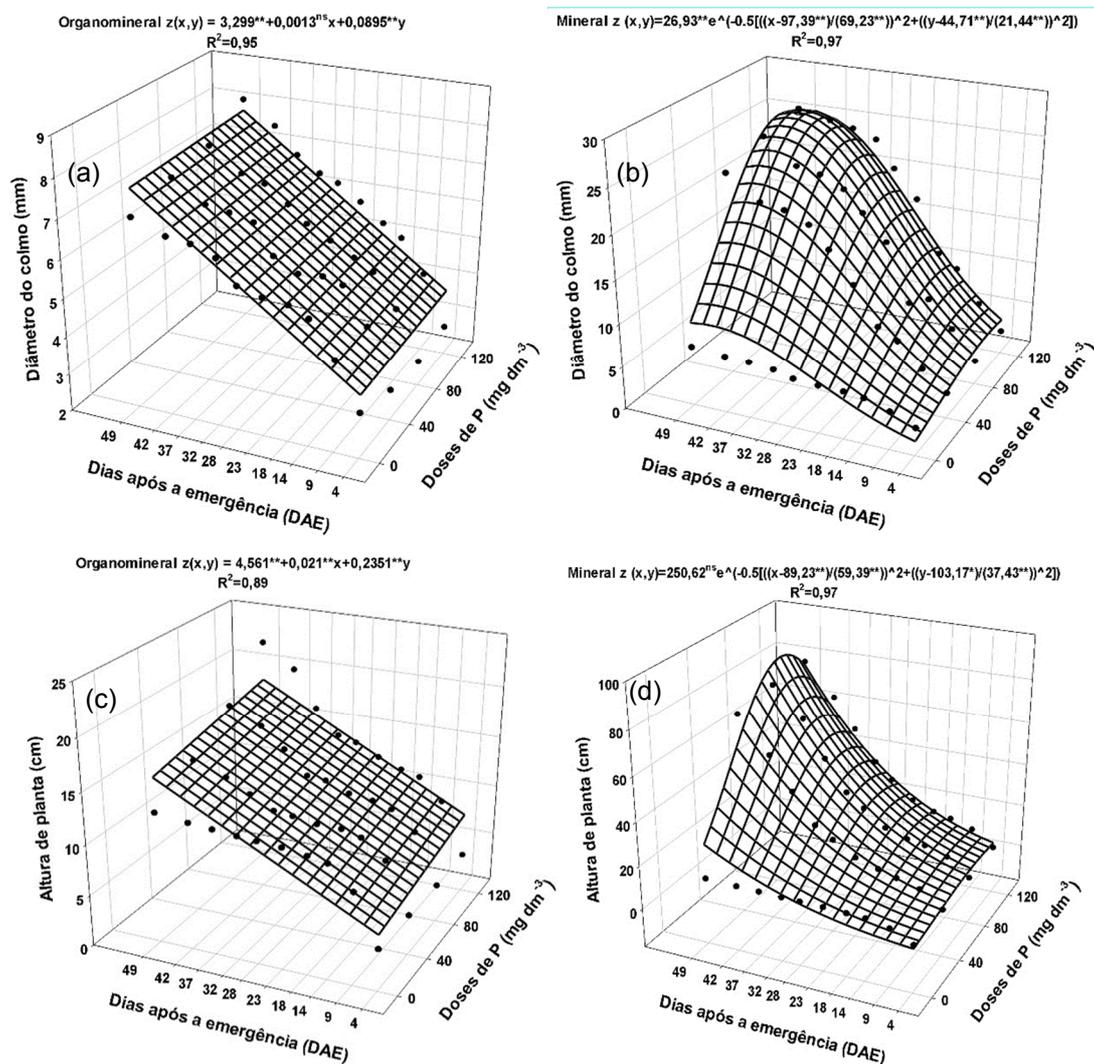
| Fontes de P   | Doses de P (mg dm <sup>-3</sup> ) |         |         |         | Dias após a emergência (dias) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|               | 0                                 | 40      | 80      | 120     | 4                             | 9       | 14      | 18      | 23      | 28      | 32      | 37      | 42      | 49      |
|               | <b>Diâmetro do colmo (mm)</b>     |         |         |         |                               |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Mineral       | 5,65 a                            | 13,99 a | 14,89 a | 16,48 a | 2,95 a                        | 5,39 a  | 8,00 a  | 8,52 a  | 12,83 a | 15,25 a | 17,36 a | 18,26 a | 18,65 a | 20,31 a |
| Organomineral | 5,65 a                            | 5,64 b  | 5,55 b  | 5,85 b  | 2,87 a                        | 4,24 b  | 5,14 b  | 5,39 b  | 5,59 b  | 5,91 b  | 6,40 b  | 6,70 b  | 6,96 b  | 7,47 b  |
|               | <b>Altura de planta (cm)</b>      |         |         |         |                               |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Mineral       | 10,92 a                           | 29,96 a | 31,57 a | 32,26 a | 4,11 a                        | 10,83 a | 13,70 a | 15,19 a | 17,77 a | 23,22 a | 27,86 a | 38,35 a | 49,77 a | 60,94 a |
| Organomineral | 10,97 a                           | 11,07 b | 11,93 b | 13,44 b | 3,91 a                        | 8,89 b  | 10,86 b | 11,30 b | 11,68 b | 12,31 b | 12,53 b | 14,05 b | 15,79 b | 17,10 b |

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste t a 5% de probabilidade.

O desdobramento dos efeitos dos tratamentos sobre o diâmetro do colmo por meio da análise de regressão evidenciou efeito linear crescente para doses de P fornecida pela fonte organomineral, com diâmetro estimado de 7,8 mm, na dose 120 mg dm<sup>-3</sup> de P, aos 49 DAE (Figura 10a). Para a fonte mineral, os dados se ajustaram ao modelo Gaussian, com diâmetro máximo estimado de 26,9 mm, na dose de 97, 4 mg dm<sup>-3</sup> de P aos 44,71 DAE (figura 10b). Observa-se que as plantas de milho apresentaram maiores diâmetros de colmo quando foram adubados com fonte mineral de P, mesmo nas menores doses de P e nos menores períodos de avaliação, quando comparado a fonte organomineral. Para ambas as fontes utilizadas foram aplicadas as mesmas quantidades de P; no entanto, na organomineral, o P é liberado de forma lenta e gradual, necessitando da ação dos microrganismos para que ocorra a mineralização do nutriente.

Segundo Grant et al. (2001), suprir adequadamente os níveis de fósforo é essencial desde os estádios iniciais de crescimento da planta e está diretamente relacionado com a produtividade, visto que, o fósforo influencia no crescimento do sistema radicular do milho e, como reflexo, interfere no desenvolvimento da parte aérea (FIDELIS et al., 2009). O colmo exerce a função de estrutura de reserva e sustentação, responsável pela translocação de fotoassimilados para os grãos, proporcionando aumento de produtividade (SORATTO et al., 2010).

Para a variável altura de planta, observa-se que nas doses de 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P, as fontes diferiram estatisticamente, com maiores valores observados quando se utilizou a fonte mineral; os incrementos em altura de planta foram 170%, 165% e 140% superiores, respectivamente, em relação ao observado com o uso da fonte mineral. Para a interação fontes e épocas de avaliação, houve diferença entre as fontes somente a partir do 9 aos 49 DAE (Quadro 15), com diferenças de 22%, 26%, 34%, 52%, 89%, 122%, 173%, 215% e 256%, respectivamente. Os solos utilizados nos experimentos possuíam baixos teores de P (Tabela 1) e, quando foi adicionado uma fonte solúvel (fonte mineral), houve rápida liberação do P para as plantas, aumentando sua concentração na solução do solo e disponibilidade para as plantas. Segundo Marschner (1995), a baixa disponibilidade de P para as plantas limita a altura da planta, acarretando plantas de baixo porte, devido a função exercida pelo P na planta na síntese de proteínas.



**Figura 10.** Diâmetro de colmo (a e b) e altura de plantas de milho (c e d), cultivado em Latossolo Vermelho Distrófico típico, durante o período de quatro a 49 dias após a emergência (DAE), sob o efeito de fontes de fósforo (organomineral e mineral) e doses de fósforo (0, 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P).

ns: não-significativo a 5% de probabilidade; \* e \*\*: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

O desdobramento dos efeitos dos tratamentos para a variável altura de planta por meio da análise de regressão evidenciou efeito linear crescente para doses de P fornecida pela fonte organomineral, com altura estimada de 16,8 cm, na dose 120 mg dm<sup>-3</sup> de P, aos 49 DAE (Figura 10c). Santana (2012) avaliou a aplicação de fertilizante organomineral na cultura do milho e não observou efeito significativo sobre a altura da planta, diâmetro do colmo, altura de inserção da espiga e o rendimento de grãos. Esse baixo crescimento está relacionado com a baixa disponibilidade de fósforo no solo, visto que, o P é importante no metabolismo das plantas, desempenhando papel fundamental na transferência de energia na célula, durante os processos de fotossíntese

e na respiração, além de componente estrutural (TAIZ e ZEIGER, 2013). Já a fonte mineral se ajustou ao modelo Gaussian, com altura máxima estimada de 250,60 cm na dose de 89,23 mg dm<sup>-3</sup> de P aos 103,17 DAE (Figura 10d).

Para as variáveis área foliar (AF), matéria seca de folhas (MSF), matéria seca de colmo (MSC) e fósforo acumulado na parte aérea de plantas de milho, houve interação significativa para os efeitos de fontes de adubação fosfatada e doses de P (Quadro 16).

**Quadro 16.** Resumo da análise de variância (valores de F) para os efeitos de fontes de adubação fosfatada (F) e doses de P (D) na área foliar (AF), matéria seca de folhas (MSF), matéria seca de colmo (MSC) e fósforo acumulado na parte aérea (P acumulado) de plantas de milho, cultivado em Latossolo Vermelho Distrófico típico, no município de Dourados-MS, 2017.

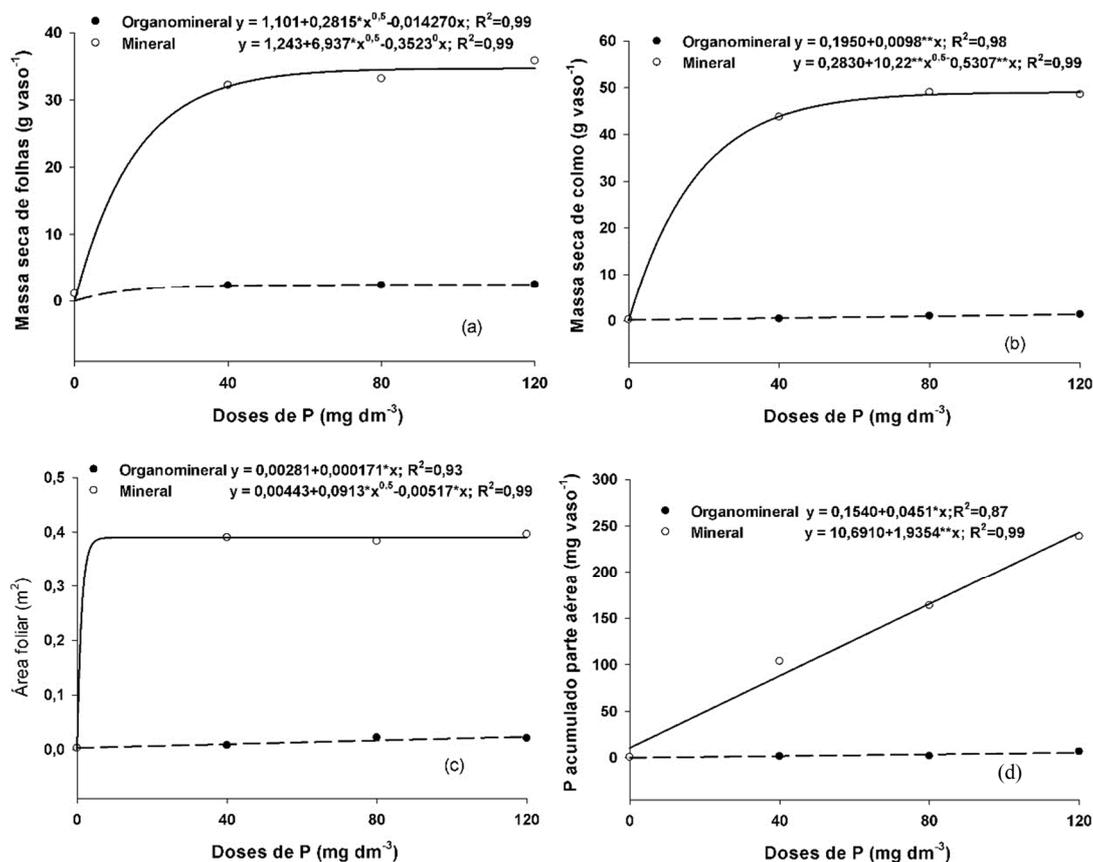
| Fatores de variação | AF        | MSF       | MSC       | P acumulado |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Fontes (F)          | 4681,03** | 6995,37** | 1381,71** | 493,11**    |
| Doses (D)           | 602,01**  | 922,36**  | 164,88**  | 84,82**     |
| FxD                 | 521,24**  | 784,20**  | 154,72**  | 77,51**     |
| Média               | 1745,71   | 13,84     | 18,10     | 64,84       |
| CV(%)               | 7,90      | 5,74      | 14,56     | 24,35       |

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

Avaliando o incremento na massa seca de folhas (Figura 11a), para ambas as fontes, os dados se ajustaram ao modelo raiz quadrada, quando utilizou-se a fonte organomineral, com valor máximo estimado de 2,5 g vaso<sup>-1</sup>, na dose de 96,9 mg dm<sup>-3</sup> de P; e quando a fonte foi a mineral, a máxima MSF foi de 35,4 g vaso<sup>-1</sup>, na dose de 96,9 mg dm<sup>-3</sup> de P.

Para MSC (Figura 11b), utilizando a fonte organomineral, os dados se ajustaram ao modelo linear, onde na dose de 120 mg dm<sup>-3</sup> de P o valor máximo estimado foi de 1,4 g vaso<sup>-1</sup>. Já para a fonte mineral, os dados se ajustaram ao modelo raiz quadrada, com máxima MSC de 49,5 g vaso<sup>-1</sup> estimada na dose de 92,7 mg dm<sup>-3</sup> de P.

Os dados de AF, para a fonte organomineral, se ajustaram ao modelo linear, com AF de 0,02 m<sup>2</sup> estimada na dose 120 mg dm<sup>-3</sup> de P (Figura 11c). Para a fonte mineral, os dados se ajustaram ao modelo raiz quadrada, com a máxima AF de 0,4 m<sup>2</sup>, estimada na dose de 78,1 mg dm<sup>-3</sup> de P.



**Figura 11.** Massa seca de folhas (a), massa seca de colmo (b), área foliar (c) e fósforo acumulado na parte aérea de plantas de milho (d), cultivado em Latossolo Vermelho Distrófico típico, no período de 49 dias após a emergência (DAE), sob o efeito de fontes de fósforo (organomineral e mineral) e doses de (0, 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P).

Em relação o P acumulado na parte aérea (Figura 11d), para ambas as fontes, os dados se ajustaram ao modelo linear. Considerando a dose de 120 mg dm<sup>-3</sup>, o P acumulado estimado quando utilizou a fonte organomineral foi de 5,6 mg vaso<sup>-1</sup>, já com a fonte mineral o P acumulado estimado foi 242,9 mg vaso<sup>-1</sup>. A deficiência inicial de P pode estar relacionado a restrições no fornecimento de carbono à planta. Em milho, a deficiência de P reduz a taxa de emissão e crescimento de folhas. Com a diminuição da área foliar, há menor captação da radiação solar e consequentemente, menor produção de carboidratos (GRANT et al., 2001).

Os resultados encontrados para diâmetro de colmo, altura de planta, MSF, MSC e P acumulado na parte aérea das plantas de milho, permite inferir a baixa liberação do P da fonte organomineral, o que resultou em menor desenvolvimento das plantas de milho. Silva et al. (2016) avaliando a resposta de plantas de milho a fósforo fornecido por composto orgânico e fertilizante mineral, observaram que em solos

arenosos o composto orgânico foi menos eficiente em fornecer fósforo às plantas de milho.

Diversos trabalhos têm demonstrado que a deficiência no suprimento de P na cultura do milho resulta em menor produção de matéria seca e menores concentrações de P na parte aérea (JUNGK e BARBER, 1974; ANGHINONI e BARBER, 1980; NOVAIS et al., 1985).

Segundo Kiehl (2008), o fertilizante organomineral, comparado ao fertilizante mineral apresenta um potencial químico reativo relativamente inferior, porém sua solubilização é gradativa no decorrer do período de desenvolvimento da cultura, quando a eficiência agronômica pode se tornar maior quando comparado com os fertilizantes minerais solúveis. A expectativa é que, ao se avaliar o efeito residual para os cultivos subsequentes, sejam evidenciadas variações de resposta decorrentes de eventuais diferenças de desempenho das fontes de fósforo em mais longo prazo, bem como das doses aplicadas nesse primeiro cultivo de milho. Há relatos de que os fertilizantes organominerais podem ter melhor eficiência agronômica ao reduzirem a adsorção de fósforo no sistema coloidal do solo (PARENT et al., 2003) e contribuírem para o aumento de suas formas mais lábeis (TIRITAN et al., 2010), aumentando, conseqüentemente, a disponibilidade do nutriente para as plantas.

#### **4.2.2 Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf)**

O quadro 17 apresenta o resumo da análise de variância dos dados de diâmetro de colmo e altura de plantas de milho para fontes, doses e épocas de avaliação. Nas interações obtidas pela análise de variância dos dados, pode-se constatar que os parâmetros de crescimento avaliados foram significativamente alterados pelo uso das fontes de adubação fosfatada, doses P e épocas de avaliação.

**Quadro 17.** Resumo da análise de variância (valores de F) para os efeitos de fontes de adubação fosfatada (F), doses (D) e de épocas de avaliação (E) no diâmetro do colmo e altura de plantas de milho cultivado em Latossolo Vermelho Distroférico, no município de Dourados-MS, 2017.

| Fatores de variação | Diâmetro do colmo | Altura de planta |
|---------------------|-------------------|------------------|
| Fontes (F)          | 4249,98**         | 5756,40**        |
| Doses (D)           | 1067,04**         | 1670,24**        |
| Épocas (E)          | 826,85**          | 2036,04**        |
| FxD                 | 480,88**          | 650,59**         |
| FxE                 | 153,62**          | 495,04**         |
| DxE                 | 61,64**           | 191,53**         |
| FxDxE               | 20,42**           | 61,65**          |
| Média               | 9,55              | 22,34            |
| CV(%)               | 8,53              | 7,86             |

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

A interação entre fontes de P (mineral e organomineral) dentro de doses P na variável diâmetro do colmo demonstra que houve diferença estatística entre fontes para as doses de 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P e a fonte mineral resultou em valores superiores aos observados com o organomineral, em 109%, 125% e 106%, respectivamente. Resultados de pesquisa com trigo demonstraram que a taxa de absorção de P proveniente do solo aumentava nos períodos iniciais de crescimento e à medida que se expandia o volume de raízes aumentava mais na planta o P oriundo do solo. Isto explica a resposta das aplicações de arranque (no plantio), mesmo quando o conteúdo de P no solo esteja relativamente alto (GRANT et al, 2001).

Avaliando-se as fontes e épocas de avaliação, observa-se que somente houve diferença estatística entre as fontes de P, a partir do 9 DAE (Quadro 18), com maior diâmetro do colmo quando se utilizou a fonte mineral, sendo a diferença de 22%, 56%, 87%, 131%, 140%, 121%, 99%, 79% e 89%, em relação a fonte organomineral.

O mesmo comportamento foi observado para a variável altura de planta. Com incremento na altura de plantas, nos tratamentos que receberam a fonte mineral de P, de 20%, 39%, 50%, 74%, 106%, 117%, 113%, 117% e 162%, respectivamente dos 9 aos 49 DAE.

A resposta do milho à aplicação de P na semeadura está relacionada com a concentração foliar de P nos estádios de V4 a V5, é nessa fase que praticamente define o potencial produtivo da planta. O suprimento adequado de P na semeadura permite maior produção grãos, devido o efeito que o P reflete no tamanho da espiga. Uma deficiência de P durante a formação da espiga, que ocorre entre os estádios V6 e V7,

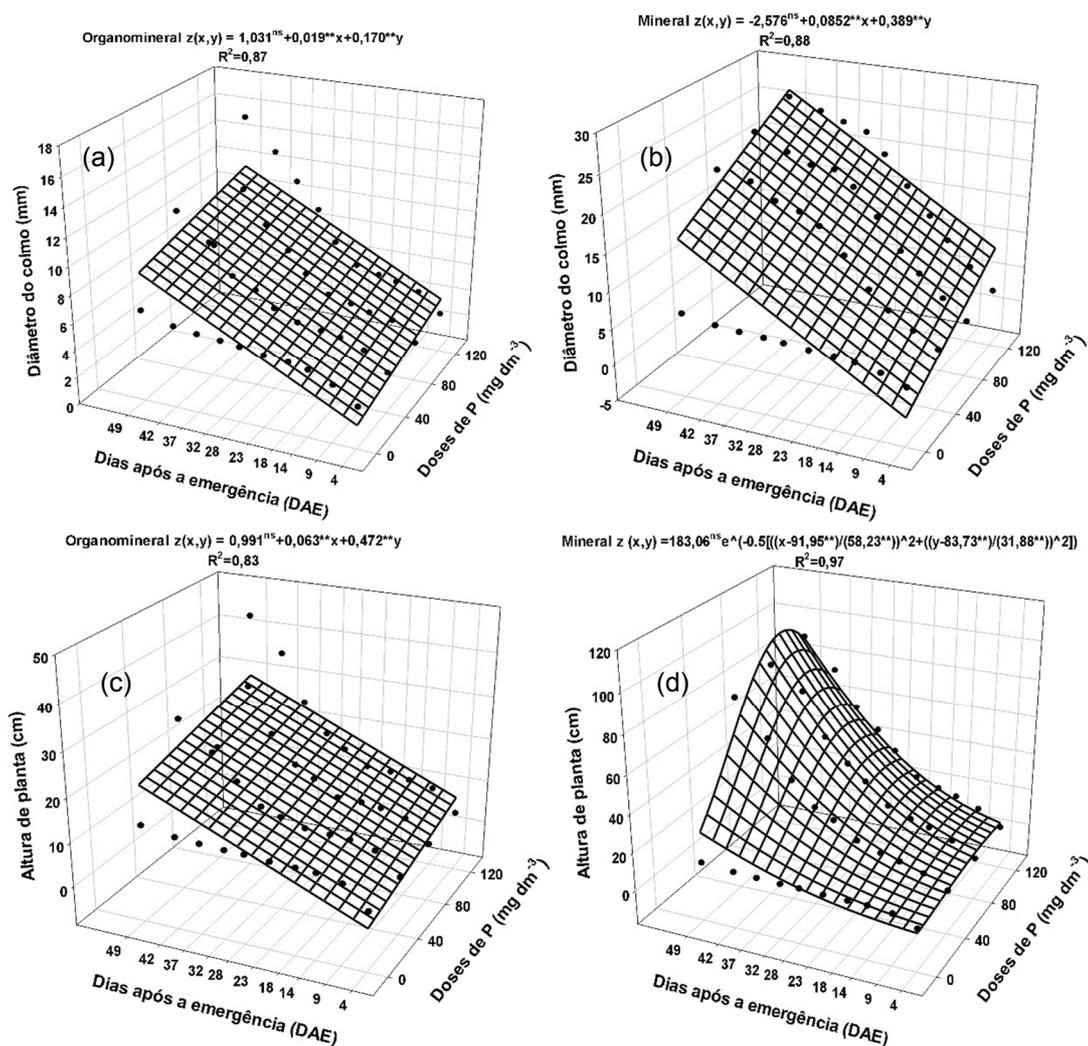
pode diminuir o tamanho da espiga, levando a um menor número de grãos por espiga (GRANT et al., 2001).

**Quadro 18.** Desdobramento da interação fontes de P, doses de P e época de avaliação, das variáveis altura e diâmetro de colmo do milho, cultivado no Latossolo Vermelho Distroférico. Dourados-MS.

| Fontes de P   | Doses de P (mg dm <sup>-3</sup> ) |         |         |         | Dias após a emergência (DAE) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|               | 0                                 | 40      | 80      | 120     | 4                            | 9       | 14      | 18      | 23      | 28      | 32      | 37      | 42      | 49      |
|               | <b>Diâmetro do colmo (mm)</b>     |         |         |         |                              |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Mineral       | 5,25 a                            | 13,73 a | 14,85 a | 16,23 a | 3,15 a                       | 5,28 a  | 7,48 a  | 9,51 a  | 12,47 a | 15,21 a | 16,78 a | 17,27 a | 18,41 a | 19,61 a |
| Organomineral | 5,25 a                            | 6,58 b  | 6,60 b  | 7,89 b  | 2,99 a                       | 4,30 b  | 4,81 b  | 5,10 b  | 5,39 b  | 6,32 b  | 7,57 b  | 8,65 b  | 10,31 b | 10,36 b |
|               | <b>Altura de planta (cm)</b>      |         |         |         |                              |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Mineral       | 10,67 a                           | 33,01 a | 36,98 a | 38,51 a | 4,82 a                       | 11,35 a | 14,82 a | 16,78 a | 19,95 a | 27,92 a | 33,63 a | 42,27 a | 57,44 a | 68,93 a |
| Organomineral | 10,67 a                           | 14,64 b | 15,43 b | 18,81 b | 4,60 a                       | 9,45 b  | 10,66 b | 11,20 b | 11,44 b | 13,53 b | 15,33 b | 19,82 b | 26,49 b | 26,36 b |

Letras minúsculas iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste t a 5% de probabilidade.

O desdobramento da interação (doses e fontes) para a variável diâmetro do colmo, para ambas as fontes de P, os dados se ajustaram ao modelo linear crescente, com diâmetros de colmo estimados de 11,6 cm e 26,7, na dose 120 mg dm<sup>-3</sup> de P, respectivamente para as fontes organomineral e mineral (Figuras 12a e 12b).



**Figura 12.** Diâmetro de colmo (a e b) e altura de planta de milho (c e d), cultivada em Latossolo Vermelho Distroférico, durante o período de quatro a 49 dias após a emergência (DAE), sob o efeito de fontes de fósforo (organomineral e mineral) e doses de fósforo (0, 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P).

ns: não-significativo a 5% de probabilidade; \* e \*\*: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

O desdobramento dos efeitos dos tratamentos para a variável altura de planta por meio da análise de regressão evidenciou efeito linear crescente para doses de P fornecida pela fonte organomineral, com altura estimada de 31,7 cm, na dose de

120 mg dm<sup>-3</sup> (Figura 12c). Já para fonte mineral, os dados se ajustaram ao modelo Gaussian e a altura de planta máxima estimada foi de 183,1 cm na dose de 92,0 mg dm<sup>-3</sup> de P (Figura 12d).

Para as variáveis AF, MSF, MSC e P acumulado na parte aérea de plantas de milho, houve interação significativa para os efeitos de fontes e doses de P (Quadro 19).

**Quadro 19.** Resumo da análise de variância (valores de F) para os efeitos de fontes de adubação fosfatada (F) e doses de P (D) na área foliar (AF), matéria seca de folhas (MSF), matéria seca de colmo (MSC) e P acumulado na parte aérea (P acumulado) de plantas de milho, cultivado em Latossolo Vermelho Distroférrico, no município de Dourados-MS, 2017.

| Fatores de variação | AF       | MSF       | MSC       | P acumulado |
|---------------------|----------|-----------|-----------|-------------|
| Fontes (F)          | 413,10** | 1035,86** | 2084,88** | 411,74**    |
| Doses (D)           | 252,49** | 338,51**  | 410,52**  | 135,70**    |
| FxD                 | 46,37**  | 115,16**  | 248,97**  | 58,47**     |
| Média               | 2153,51  | 19,19     | 25,46     | 56,36       |
| CV(%)               | 12,16    | 9,22      | 9,45      | 18,65       |

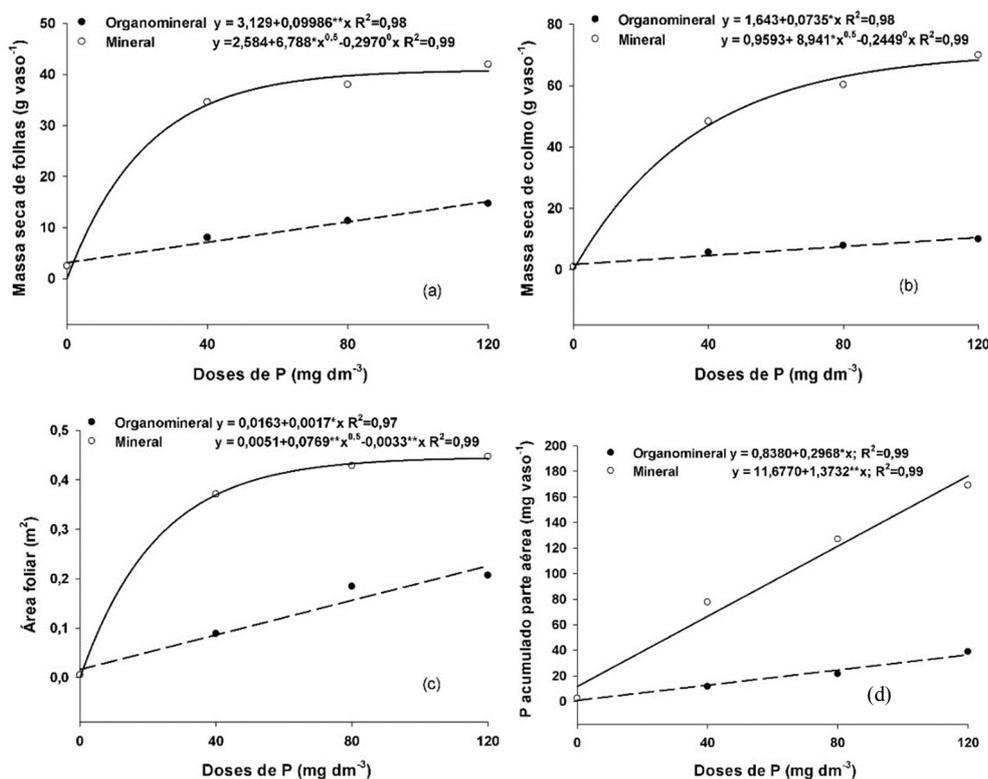
\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

Os dados de massa seca de folhas (Figura 13a), com o uso da fonte organomineral, se ajustaram ao modelo linear, com MSF de 15,1 g vaso<sup>-1</sup> estimada na dose de 120 mg dm<sup>-3</sup> de P; quando utilizou a fonte mineral, os dados se ajustaram ao modelo raiz quadrada, com MSF de 41,4 g vaso<sup>-1</sup> estimada na dose de 130,6 mg dm<sup>-3</sup> de P.

O mesmo comportamento dos dados foi verificado para MSC (Figura 13b), com estimativa de 10,5 g vaso<sup>-1</sup>, na dose de 120 mg dm<sup>-3</sup> de P, para a fonte organomineral; já a fonte mineral, os dados se ajustaram ao modelo raiz quadrada, com MSC de 62,6 g vaso<sup>-1</sup> estimada na dose de 103,2 mg dm<sup>-3</sup> de P.

A área foliar (figura 13c) respondeu linearmente ao uso de fonte organomineral e estimando-se o valor de 0,2 m<sup>2</sup> na dose 120 mg dm<sup>-3</sup>. Por outro lado, quando se utilizou a fonte mineral, a resposta seguiu o modelo raiz quadrada, com valor máximo de 0,5 m<sup>2</sup>.

O P acumulado (mg vaso<sup>-1</sup>) na parte aérea das plantas de milho (Figura 13d) para ambas as fontes de P apresentou incremento linear, com valores estimados de 36,5 mg vaso<sup>-1</sup> e 176,5 mg vaso<sup>-1</sup>, na dose de 120 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente para as fontes organomineral e mineral.



**Figura 13.** Massa seca de folhas (a), massa seca de colmo (b), área foliar (c) e fósforo acumulado na parte aérea de plantas de milho (d), cultivado em Latossolo Vermelho Distroférico, no período de 49 dias após a emergência (DAE), sob o efeito de fontes de fósforo (organomineral e mineral) e doses de fósforo (0, 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P).

Os menores diâmetros de colmo, altura de plantas, MSF, MSC, AF e P acumulado na parte aérea das plantas de milho cultivados em ambos os solos (LVd e LVdf), com o uso do organomineral pode estar relacionado à liberação lenta de nutrientes desse material. Além disso, estes solos apresentam teores baixos de P (Tabela 1), desta forma, a disponibilidade no solo não foi suficiente para o desenvolvimento adequado das plantas. A fonte mineral proporcionou maiores valores dos parâmetros avaliados nas plantas de milho, explicado pela alta solubilidade da fonte mineral.

A atuação diferenciada de fontes de fósforo em solos distintos também foi verificada por Correa et al. (2008), ao avaliarem a disponibilidade e os níveis de fósforo para as plantas de milho em dois solos (Argissolo e Latossolo), nos quais constataram que a fonte mineral proporcionou elevação dos teores de P na matéria seca e na produção de matéria seca.

Segundo Martins et al. (2016), em solos com teores muito baixos de P são necessárias adubações fosfatadas corretivas para elevar a disponibilidade de P

nível adequado para o desenvolvimento das culturas. A partir dessa etapa, adubações de manutenção com menores dosagens de P em conjunto com fonte organominerais são suficientes para garantir boas produtividades.

## 5 CONCLUSÕES

1. As fontes, doses de P e o tempo de avaliação alteraram a distribuição e a proporção das frações inorgânicas e orgânicas de fósforo no solo.
2. Para ambas as fontes avaliadas, o fósforo que foi adicionado aos solos, incrementou principalmente a fração não lábil e, em menor proporção, as frações que compõem o P lábil.
3. A fonte mineral de P proporcionou maiores incrementos no diâmetro do colmo, alturas de plantas, área foliar, massa seca de folhas, massa seca de colmo e P acumulado na parte aérea de plantas de milho.
4. O P da fonte mineral liberou mais rápido o P na fase inicial de desenvolvimento do milho.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALA, D. B.; GHOSH, A. K.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; VENEGAS, V. H. A. Phosphorus saturation of a tropical soil and related P leaching cause by poultry litter addition. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 162, p.15-23, 2012.

ABREU JUNIOR, C. H.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J. C. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa: SBCS, 2005. v. 4, p. 391-470.

ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A., LOPES, A. S. **Os Adubos e a eficiência das adubações**, 2. ed. ANDA, São Paulo, 1991. 35p.

ANGHINONI, I.; BARBER, S. A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. **Agron. J.**, 72:685-688, 1980.

ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.537-562.

ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar, intensidade e formas de acumulação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, n. 3, p. 389-396, 1993.

AZEVEDO, C. A.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 609-617, 2004.

AZEVEDO, W. R.; FAQUIN, V.; FERNANDES, L. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. C. Disponibilidade de fósforo para o arroz inundado sob efeito residual de calcário, gesso e esterco de curral aplicados na cultura do feijão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.995-1004, 2004.

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

BARROS, J. F. C.; CALADO, J. G. **A cultura do milho**. Évora, 2014. 52f. Material de apoio. Disponível em: <<https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/10804/1/Sebenta-milho.pdf>>. Acesso em 20 abril 2018.

BARROW, N. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 183-230, 1985.

BECK, M. A.; SANCHES, P. A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science**, v.34, p.1424-1431, 1994.

BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. **Soil Science**, v.125, n.2, p.95-101, 1978.

BLAKE, L.; JOHNSTON, A. E.; POULTON, P. .; GOULDING, K. W. T. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. **Plant and Soil**, v.254, n.2, p.245-261, 2003.

BRANCO, S. M.; MURGEL, P. H.; CAVINATTO, V. M. Compostagem: solubilização biológica de rocha fosfática na produção de fertilizante organo-mineral. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 3, p. 115-122, 2001.

BRAOS, L. B. **Fracionamento do fósforo orgânico em solo adubado com esterco bovino**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013.

BRASIL (2018). Ministério do Meio Ambiente. **O Bioma cerrado**. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/biomas/cerrado>> Acesso em: 20 maio 2018.

BROCH, D. L.; RANNO, S. K. **Fertilidade do solo, adubação e nutrição da cultura do milho “safrinha”**. Tecnologia de produção: milho safrinha e culturas de inverno (2009): 5-29.

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

CAMPOS, M. **Grau de saturação de fósforo em solos tropicais altamente intemperizados**. 2014. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

CARNEIRO, L. F.; DE RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; SANTOS, J. Z.; CURI, N.; REIS, T. H.; DO VALLE, L. A. Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 35, n. 2, p. 483-491, 2011.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v.84, n.1, p.133-144, 1957.

CHEN, C. R.; CONDRON, L. M.; DAVIS, M. R.; SHERLOCK, R. R. Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.177, n.3, p. 539-557, 2003.

CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB (2017). **PROJEÇÕES DO AGRONEGÓCIO**. Brasil 2016/17 a 2026/27 Projeções de Longo Prazo. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2017-a-2027-versao-preliminar-25-07-17.pdf> . Acesso em: 23 abril de 2018.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, v 36, p.199-207, 1985.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M. Effects of long-term phosphatic fertilizer application on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, p. 383-395, 1989.

CONTE, E. **Atividade de fosfatase ácida e formas de acumulação de fósforo pela aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto**. 2001. 74 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Frações de fósforo acumulada em latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 893-900, 2003.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, F. J.; SOUZA, S. K. S. C.; FERRAZ, G. B. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, p.218-224, 2008.

COUTINHO, L. M. **Bioma Cerrado**. In: KLEIN, A. L. (Ed.) *Eugen Warming e o cerrado brasileiro um século depois*. São Paulo. Editora UNESP, 77p. 2002.

CREWS, T. E.; BROOKES, P. C.: **Changes in soil phosphorus forms through time in perennial versus annual agroecosystems**, *Agric. Ecosys. Environ.*, 184, 168–181, 2014.

CROSS, A. F.; SCHLESINGER, W. H. A. **literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems**. *Geoderma*, Amsterdam, v. 64, n. 2/4, p.197-214, 1995.

CRUZ, S. C. S.; PEREIRA, F. R. S.; BICUDO, S. J.; ALBUQUERQUE, A. W.; SANTOS, J. R.; MACHADO, C. G. Nutrição do milho e da *Brachiaria decumbens* cultivado em consórcio em diferentes preparos do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.30, n. 05, p. 733-739, 2008.

DALAL, R. C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v 29, p. 83- 117, 1977.

DAROUB, S. H.; PIERCE, F. J.; ELLIS, B. G. Phosphorus fractions and fate of phosphorus-33 in soils under plowing and no-tillage. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 64, p. 170-176, 2000.

DELGADO, A.; TORRENT, J. Phosphorus forms and desorption patterns in heavily fertilized calcareous and limed acid soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 6, p. 2031-2037, 2000.

DIETER, D., ELSENBEEER, H., TURNER, B. L. **Phosphorus fractionation in lowland tropical rainforest soils in central Panama**, Catena, v. 82, 2010.

DUARTE, J. de O.; CRUZ, J. C.; GARCIA, J. C.; MATTOSO, M. J. **Economia da produção e utilização do milho**. In: CRUZ, J. C.; VERSIANI, R. P.; FERREIRA, M. T. R. (Ed.). Cultivo do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2000. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de produção, 1).

DUDA, G. P. **Conteúdo de fósforo microbiano, orgânico e biodisponível em diferentes classes de solo**. Seropédica: UFRRJ, 2000. 158p. Tese Doutorado

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2005. 388 p. Disponível em <<http://www.solos.ufmt.br/docs/solostrop/SiBCS-2005.pdf>>. Acesso em 03 Mar. 2018.

FARDEAU, J. C. 1996. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. **Fert. Res.**, 45:91-100.

FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing soils for phosphorus. In: WESTERMAN, R.L. (Ed) **Soil Testing and Plant Analysis**, 3 ed. Madison. p. 141-180, 1990.

FERREIRA, T. N.; FARIAS, A. D.; SCHWARTZ, R. A. Sistema plantio direto no Rio Grande do Sul – 1999. **Informativo EMATER**. Porto Alegre, v. 17, 04 p. 1999.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v.38, n.2, p.109-112, 2014.

FERREIRA, N. R. **Eficiência agronômica de fertilizantes organominerais sólidos e fluidos em relação à disponibilidade de fósforo**. Dissertação – UNESP, Botucatu-SP, 2014.

FIDELIS, R. R.; MIRANDA, G. V. e ERASMO, E. A. L. Seleção de populações base de milho sob alta e baixa dose de fósforo em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 4, p. 285-293, 2009.

FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA, 2001.

GALVANI, R.; KEYTI, L. F.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus sources and fractions in an oxisol under no-tilled soybean. **Scientia Agricola**. Piracicaba, v. 65, n. 4, p. 415-421, 2008.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231 p. Tese (Doutorado em Biodinâmica dos Solos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GATIBONI, L. C.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, A. F. C.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J.; LIMA, M. A. S. Phosphorus forms and availability assessed by <sup>31</sup>P NMR in successive cropped soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.36, p.2625-2640, 2005.

GATIBONI, L. C.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 691-699, 2007.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo no solo: usos e limitações. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, 2013. v. 8, p. 141-187.

GILO, E. G.; SILVA JUNIOR, C. A.; TORRES, F. E.; NASCIMENTO, E. S.; LOURENÇÃO, A. S. Comportamento de híbridos de milho no Cerrado Sul-Mato Grossense, sob diferentes espaçamentos entre linhas. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 6, p. 908-914, 2011.

GODLINSKI, F.; CHANG, C. Distribution of phosphorus forms in soil following long-term continuous and discontinuous cattle manure applications. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.72, p.90-97, 2008.

GOEDERT, W. J.; LOBATO, E.; WAGNER, E. Potencial agrícola da região dos cerrados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.15, n.1, p.1-17, 1980.

GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W. J. (Ed.). **Solos dos cerrados: tecnologia e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1985. p.129-163.

GONÇALVES G. K.; MEURER, E. J. Frações de fósforo no solo e sua relação com a absorção pelas plantas de arroz irrigado por alagamento em solos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, 33:357-362, 2009.

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial das plantas. **Informações Agrônomicas**. Piracicaba: Potafós, 2001. 5p.

GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L.; SANTOS, G. A.; FERNANDES, M. S. Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, p. 291-299, 1996.

GUO, F.; YOST, R. S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, Baltimore, v. 163, n. 10, p. 822-833, 1998.

HECKENMÜLLER, M.; NARITA, D.; KLEPPER, G. **Global availability of phosphorus and its implications for global food supply: an economic overview**. Kiel: Kiel Institute for the World Economy, 2014. 26 p.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v 46, p. 970-976, 1982.

HEDLEY M. J., KIRA G. J. D., SANTOS M. B. Phosphorus efficiency and the forms of soil phosphorus utilized by upland rice cultivars. *Plant and Soil* 158: 53-62, 1994.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA**, Piracicaba, 2003. Anais. Piracicaba, Potafos/Anda, 2003. 24p. CD-ROM.

HUE, N. V.; IKAWA, H.; SILVA, J. A. Increasing plant-availability phosphorus in a ultisol with a yard-waste compost. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.20, p.3291-3303, 1994.

IAIA, A.; M. **Avaliação do efeito da mecanização e transporte na compactação de dois tipos de solo cultivados com cana-de açúcar**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2003.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. **Produção agrícola municipal: tabela 839 – área planta, área colhida, quantidade produzida e rendimento médio de milho, 1ª e 2ª safras**. [Rio de Janeiro, 2017]. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/839>>. Acesso em: 18 Setembro 2018.

INSTITUTO DA POTASSA e FOSFATO. **Manual Internacional de Fertilidade do Solo** (Tradução e adaptação de Alfredo Scheid Lopes). 2 ed. rev. ampl. Piracicaba: Potafôs, 177p. 1998.

ISHERWOOD, K. F. World plant nutrient resources: directions for the next century. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. de (Ed.) 1999 *Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas*. Viçosa: SBCS, Lavras: UFLA/DCS, 1999. p.123-142.

IVANOFF, D. B.; REDDY, K. R.; ROBINSON, S. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols. **Soil Science**, Baltimore, v.163, p.36-45, 1998.

JUNGK, A.; BARBER, S. A. Phosphate uptake rate of corn roots related to the proportion of the roots exposed to phosphate. **Agronomy Journals**, v.66, p.554-57. 1974.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 1985. 492p.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes organominerais**. Piracicaba: E. J. Kiehl. 160p. 2008.

KORNDÖRFER, G. H.; LARA-CABEZAS, W. A.; HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 2, p. 391-396, 1999.

KOVAR, J. L.; PIERZYNSKI, G. M. **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters**. Virginia: Virginia Tech University, 2009. v. 2, 131 p.

LEITE, J. N. F. et al. Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciadas por plantas de cobertura e adubação nitrogenada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, p. 1880 - 1889, 2016.

LEITE, J. N. F. **Formas orgânicas e inorgânicas de fósforo no solo em função de plantas de cobertura e adubação nitrogenada**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015.

LINDSAY, W. L.; VLEK, P. L. G.; CHIEN, S. H. Phosphate minerals. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. SSSA, Madison, 1989, p. 1089-1130.

LINQUIST, B. A.; SINGLETON, P. W.; CASSMAN, K. G. Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up decline of available phosphorus in a ultisol. **Soil Sci.**, 162:254-264, 1997.

LIU, Q.; LOGANATHAN, P.; HEDLEY, M. J.; SKINNER, M. F. The mobilization and fate of soil and rock phosphate in the rhizosphere of ectomycorrhizal *Pinus radiata* seedlings in an Allophanic soil. **Plant and Soil**, v.264, n.1-2, p.219-229, 2004.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Solos do Cerrado: manejo da fertilidade para produção agropecuária**. São Paulo: ANDA, 2º ed., 1994. 62 p.

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

LOPES, C. M. **Caracterização química de subprodutos da indústria sucroenergética enriquecidos com fontes minerais e orgânicas submetidos a compostagem**. 2014. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola

Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

MACEDO, J. **Os solos da região dos Cerrados**: In: ALVARES, V. H., FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (Ed.). O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, p. 135-155, 1996.

MALAVOLTA, E; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Princípios e aplicações. 2ª ed. Piracicaba : POTAFOS, 1997, 319p.

MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; FARIA, T. G. Chuvas no cerrado da região centro-oeste do Brasil: análise histórica e tendência futura. **Revista Ateliê Geográfico**, v.6, n.2, p.112-130, 2012.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2ª ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MARTINEZ, M. A. **Frações de fósforo em experimento de longa duração em milho consorciado com *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, sob diferentes fontes de nitrogênio**. Dourados, MS, UFGD, 2015.

MARTINS, D. C.; RESENDE, Á. V.; GALVÃO, J. C. C.; SIMÃO, E. P.; ALMEIDA, G. O.; FERREIRA, H. L. **Características agronômicas de milho adubado com fertilizantes organominerais a base de cama de frango e fosfatos**. XXXI congresso nacional de milho e sorgo; “Milho e sorgo: inovações, mercados e segurança alimentar”; Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas – MG, 2016.

MENDES, J. F. Características químicas e físicas de alguns solos sob cerrados. REUNIÃO BRASILEIRA DOS CERRADOS, 2, 1967, Sete Lagoas. **Anais...** Sete Lagoas: Instituto de Pesquisas e Experimentação do Centro Oeste, 1967, p. 51-62.

MURPHY, J. & RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chimica Acta**, 27:31-36, 1962.

NEVES, M. C. P. Como os microrganismos do solo obtêm energia e nutrientes. In: CARDOSO, E. J. N. B.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P.(Eds.) Microbiologia do solo. **SBCS**. Campinas, 1992, p. 17-31.

NOVAIS, R. F.; FERREIRA, R. P.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Absorção de fósforo e crescimento do milho com sistema radicular parcialmente exposto a fonte de fósforo. **Pesq. Agropec. Bras.**, 20:749-754, 1985.

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

NOVAIS, R. F. Fertilidade do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, SP, 2007. 1017 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. (Eds.) **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-550.

NUNES, R. S. **Eficiência de uso do fósforo em sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada por um longo período**. Tese de Doutorado (D) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2014.

O'HALLORAN, I. P. **Effect of tillage and fertilization on inorganic and organic soil phosphorus**. Canadian Journal of Soil Science, v. 73, p. 359-369, 1993.

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

PARTELLI, F. L.; BUSATO, J. G.; VIEIRA, H. D.; VIANA, A. P.; CANELLAS, L. P. Qualidade da matéria orgânica e distribuição do fósforo no solo de lavouras orgânicas de café Conilon. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, p.2065-2072, 2009.

PARENT, L. E.; KHIARI, L. & PELLERIN, A. The P fertilization of potato: Increasing agronomic efficiency and decreasing environmental risk. **Acta Horticulturae**, n.627, p. 35-41,2003.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de Nutrientes no Solo – Decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 911-920, 2008.

RAGHOTHAMA, K.; KARTHIKEYAN, A. Phosphate acquisition. In: \_\_\_\_\_. (Ed.). **Root physiology: from gene to function**. Dordrecht: Springer, 2005. p. 37-49.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Potafos, 1991. 343p.

RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAUSCH, C.; BUCHER, M. Molecular mechanisms of phosphate transport in plants. **Planta**, Berlin, v. 216, n. 1, p. 23-37, Jan. 2002.

REDEL Y. D.; RUBIO, R.; ROUANET, J. L.; BORIE, F. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 39, p. 388-396, 2007.

RHEINHEIMER, D.; CASSOL, P. C.; KAMINSKI.; ANGHINONI, I. **Fósforo orgânico do solo**. In: Santos, G. A.; Camargo, F. A. O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.69- 89.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 24:345-354, 2000.

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

ROBOREDO, D. **Resistência mecânica do solo a penetração utilizando dois penetrômetros em um Latossolo Vermelho de Mato Grosso**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2005.

RODRIGUES, M. **Sistemas de manejo e a dinâmica das formas de fósforo e da fertilidade em solos de cerrado**. 2013. 113p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

RODRIGUES, M., PAVINATO, P. S., WITHERS, P. J. A., TELES, A. P. B., HERRERA, W. F. B. Fegacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**. 542, 1050-1061, 2015.

ROSOLEM, C. A.; MIYAZAWA, M.; FRANCHINI, J. C.; PAVAN, M. A.; COSTA, A. Soil acidity, pH and aluminum management in tropical soils: the Brazilian experience. In: WORLD SOYBEAN RESEARCH CONFERENCE, 2004, Foz do Iguaçu, 2004. **Proceedings...** p. 310-318.

ROTTA, L. R. **Fracionamento e disponibilidade de fósforo em uma cronosequência de cultivos sob plantio direto**. Mestrado. Universidade Federal de Goiás, 2012.

SÁ, J. C. M. **Adubação fosfatada no sistema plantio direto**. In: YAMADA, T.; ABDATA, S. R. S., eds. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Potafos, p. 201-220, 2004.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. J.; KAMPRATH, E. J. The role of phosphorus in agriculture. Madison: **American Society of Agronomy**, 1980. chap. 11, p. 263-310.

SANTANA, C. T. C. **Comportamento de milho (*zea mays* l.) e propriedades físicas do solo, no sistema plantio direto, em resposta a aplicação de fertilizante organomineral**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2012.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J.

F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p

SANTOS, J. K. F.; CABRAL FILHO, F. R.; DA SILVA, E. C.; TEIXEIRA, M. B.; MANSO, R. T.; SILVA, C. L. N. **Produção de matéria seca de milho sob as doses e fontes de formulados NPK mineral e organomineral**. IV INOVAGRI International Meeting, 2017.

SCHROEDER, P. D.; KOVAR, J. L. Comparison of organic and inorganic phosphorus fractions in an established buffer and adjacent production field. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.37, p.1219-1232, 2006.

SHARPLEY, A. N.; SISAK, I. Differential availability of manure and inorganic sources of phosphorus in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, 1503-1508, 1997.

SILVA, F. C.; RAIJ, B. van. Disponibilidade de fósforo avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2277-2285, 1999.

SILVA, R. M. O.; RECH, I.; FRANÇA, A. A.; SCHIAVINI, J. A.; PIRES, C. A.; BALIEIRO, F. C.; POLIDORO, J. C.; CAMPOS, D. V. B. Liberação de fósforo de fertilizantes organominerais e sua influência na fertilidade do solo. XXIX Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Guarapari – ES, 2010.

SILVA, L. B. X.; NUNES, W. A. G. A.; MACHADO, T. M. **Resposta de plantas de milho a fósforo fornecido por composto orgânico e fertilizante mineral**. EMBRAPA Dourados-MS, JIPE 2016.

SMECK, N, E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 36, p. 185-199, 1985.

SORATTO, R. P.; PEREIRA, M.; COSTA, T. A. M. e LAMPERT, V. N. Fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 511-518, 2010.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Correção da acidez do solo. In: (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2004. cap. 3, p. 81-96.

SOUSA, D. M. G. de; NUNES, R. S.; REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, J. D. G. dos. Manejo do fósforo na região do Cerrado. In: FLORES, R. A.; CUNHA, P. P. da (Ed.). **Práticas de manejo do solo para adequada nutrição de plantas no Cerrado**. Goiânia: UFG, 2016. p. 291-358.

STEWART, J. W. B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, Netherlands, v 4, p. 41-60, 1987.

STEWART, J. W. B.; SHARPLEY, A. N. **Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur**. In: FOLLETT, R. F.; STEWART, J. W. B.;

COLE, C. V.; POWER, J. F. (Ed.). Soil fertility and organic matter as critical components the production systems. Madison: SSSA, 1987. p. 101-121.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. 2013. **Fisiologia vegetal**. Artmed, Porto Alegre, Brasil.

TATE, K. R.; SPEIR, T. W.; ROSS, D. J.; PARFITT, R. L.; WHALE, K. N.; COWLING, J. C. Temporal variations in some plants and soil P pools in two pasture soils of widely different P fertility status. **Plant and Soil**, Dordrecht, v 132, p. 219-232, 1991.

TEIXEIRA, W. G. **Biodisponibilidade de fósforo e potássio provenientes de fertilizantes mineral e organomineral**. 2013. 98 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia.

THOMAS, G. W; PEASLEE. Testing soils for phosphorus. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D. (Eds.) **Soil Testing and Plant Analysis**. 1.ed. Madison: Soil Science Society of America, Inc., 1973. p.111-132.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 36, p. 271-281, 2012.

TIECHER, T., GOMES, M. V., AMBROSINI, V. G., AMORIM, M. B., BAYER, C. Assessing linkage between soil phosphorus forms in contrasting tillage systems by path analysis. **Soil, Tillage Research**, 175, 276- 280, 2018.

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

TIRITAN, C. S., SANTOS, D. H., BORDINI, R. A., FOLONI, J. S. S.; ONISHI, R. Y. (September). Produção de matéria seca de milho em função da adubação fosfatada mineral e organomineral. **Colloquium Agrariae**, v. 6, n.1, p. 01-07, 2010.

TIRITAN, C. S.; SANTOS, D. H. Resposta do milho safrinha a adubação organomineral no município de Maracaju-ms.Encontro de Ensino, Pesquisa e Extensão, Presidente Prudente. **ColloquiumAgrariae**, v. 8, n. Especial, p. 24-31, 2012.

TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C. H.; ALOVISI, A. A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.10, p.1467-1476, 2002.

TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; CURI, N.; SANTOS, J. Z. L.; ALOVISI, A. A. Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.33, p.171-179, 2011.

TURNER, B. L., ENGELBRECHT, B. M. J. **Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests** Biogeochemistry, v. 103, p. 297-315, 2011.

UEHARA, G.; GILLMAN, G.P. **The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge**. Boulder: Westview Press, Inc., 1981. 188p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. Foreign Agricultural Service (FAS). **Grain**: world markets and trade. United States: USDA/FAS, nov. 2017. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf>>. Acesso em: Fevereiro. 2018.

WRIGHT, C. J., COLEMAN, D. C. The effects of disturbance events on labile phosphorus fractions and total organic phosphorus in the southern appalachians. *Soil Science* 164:6, 391-402, 1999.

YOST, R. S., ARES, A., BAJITA, J.; WANG, X. **Diagnosing nutrient deficiencies**. Pp. 107–119. Edmond, D. et al. (Eds.) *Decision Processes for Determining Diagnostic and Predictive Criteria for Soil Nutrient Management: Workshop Proceedings*. SMCRSP Technical Bulletin 2000–03. Maligaya, the Philippines.

ZAMUNER, E. C.; PICONE, L. I.; ECHEVERRIA, H. E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. **Soil and Tillage Research**, v.99, p.131-138, 2008.

ZHANG, T. Q.; MACKENZIE, A. F. Changes of soil phosphorus fractions under long-term corn monoculture. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 61:485-493, 1997.