

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

MARIANA SILVA DE AZEVEDO

MATÉRIA ORGÂNICA E A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO APÓS  
ADUBAÇÃO FOSFATADA EM LATOSSOLOS MUITO ARGILOSOS DA REGIÃO  
DO CERRADO MINEIRO

MONTE CARMELO

2024

MARIANA SILVA DE AZEVEDO

MATÉRIA ORGÂNICA E A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO APÓS  
ADUBAÇÃO FOSFATADA EM LATOSSOLOS MUITO ARGILOSOS DA REGIÃO  
DO CERRADO MINEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Agronomia da  
Universidade Federal de Uberlândia,  
Campus Monte Carmelo, como requisito  
necessário para a obtenção do grau de  
Engenheira Agrônoma.

Orientador: Enio Tarso de Souza  
Costa

MONTE CARMELO

2024

MARIANA SILVA DE AZEVEDO

MATÉRIA ORGÂNICA E A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO APÓS  
ADUBAÇÃO FOSFATADA EM LATOSSOLOS MUITO ARGILOSOS DA REGIÃO  
DO CERRADO MINEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Agronomia,  
Campus Monte Carmelo, da Universidade  
Federal de Uberlândia, como parte dos  
requisitos necessários para obtenção do grau  
de Engenheira Agrônoma.

Monte Carmelo, 21 de novembro de 2024

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Enio Tarso de Souza Costa  
Orientador

---

Prof. Dr. Eduardo Osório Senra  
Membro da Banca

---

Prof. Dr. Ricardo Falqueto Jorge  
Membro da Banca

MONTE CARMELO

2024

## SUMÁRIO

|   |                                  |    |
|---|----------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO .....                 | 6  |
| 2 | OBJETIVO.....                    | 8  |
| 3 | REFERENCIAL TEÓRICO .....        | 8  |
| 4 | MATERIAL E MÉTODOS.....          | 11 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....     | 19 |
| 6 | CONCLUSÕES.....                  | 32 |
|   | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... | 32 |

## RESUMO

O fósforo (P) é um elemento essencial para a vida das plantas e sua limitação para produção agrícola associada ao risco de escassez desafia pesquisadores na definição das melhores formas corretas de manejo da adubação fosfatada. Solos em regiões tropicais geralmente apresentam elevada capacidade de retenção de P, fazendo com que sejam necessárias intensas aplicações de adubos fosfatados. Nesses ambientes, a mineralogia do solo assume um papel importante na adsorção de P, devido à fixação do elemento nas superfícies dos minerais. Por outro lado, a matéria orgânica do solo (MOS) contribui na disponibilidade desse nutriente às plantas. Entre as classes de solos dominantes nos ecossistemas tropicais, tem-se os Latossolos, os quais são constituídos predominantemente por minerais muito intemperizados, tais como caulinita, goethita, hematita e gibbsita. Entre esses minerais, destacam-se os sesquióxidos de ferro e alumínio, pela forte afinidade e elevada capacidade de adsorção de P. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da matéria orgânica na disponibilidade de P por meio dos extratores Mehlich 1 e 3 e Resina nos horizontes A, AB, BA e Bw de três Latossolos muito argilosos coletados na região do Cerrado Mineiro após adubação fosfatada. As amostras de solo coletadas em cada horizonte principal e transicional foram caracterizadas e doses crescentes de P (0; 22; 65; 131; 196; 240; 524; 786; 1047 e 1309 mg dm<sup>-3</sup> de P, equivalentes a 0; 100; 300; 600; 900; 1200; 2400; 3600; 4800 e 6000 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), utilizando como fonte o fosfato de cálcio (CaHPO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O PA), foram adicionadas até o valor próximo à sua capacidade máxima de adsorção. Após período de incubação (90 dias), foram realizadas quantificações do P disponível por meio dos extratores Mehlich 1 e 3 e Resina para avaliação do efeito do teor de matéria orgânica com relação a dose aplicada. O teor de matéria orgânica influenciou na capacidade de retenção de fósforo no solo e nas suas frações disponíveis extraídas pelos extratores Mehlich 1, Mehlich 3 e Resina. Os solos retêm a maior parte do fósforo adicionado (76 a 94%) ficando somente uma pequena porcentagem disponível (6 a 24%). Entre os extratores, o Mehlich 1 extraiu menores quantidades de P disponível (6%) comparado ao Mehlich 3 (15%) e a Resina (24%). De maneira geral, a maior concentração de matéria orgânica no horizonte A comparado ao Bw reduziu a adsorção de fósforo, aumentando sua disponibilidade, sendo esse aumento variável entre os extratores avaliados.

Palavras-chave: solo, fosfato, extratores, resina, Mehlich.

## 1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um nutriente limitante para a produção agrícola e, devido ao seu potencial risco de escassez, foi considerado por Cordell e Neset (2014) como um dos principais desafios ambientais globais do século XXI. Diante deste cenário, há uma preocupação crescente em equilibrar os impactos agronômicos e ambientais provocados pela adição inadequada desse nutriente no solo. O uso e manejo eficiente de fertilizantes nos sistemas agrícolas, sobretudo dos fertilizantes fosfatados, são fundamentais para alcançar elevadas produtividades reduzindo os riscos de comprometimento da qualidade ambiental (Macdonald *et al.*, 2011; Mihailescu *et al.*, 2015). Atualmente na agricultura, estão sendo aplicadas intensas quantidades de adubos fosfatados objetivando aumentar a disponibilidade de P nas camadas mais superficiais do solo (Oliveira *et al.*, 2020; Riskin *et al.*, 2013). Embora sejam necessárias aplicações de elevadas doses de fosfato para alcançar maiores produtividade, sobretudo em culturas mais exigentes e de maior valor agregado, essas elevadas doses não manejadas corretamente podem causar danos as ambientes aquáticos como a eutrofização dos corpos d'água (Pantano *et al.*, 2016).

O alto aporte de adubos fosfatados ocorre principalmente em solos muito intemperizados, como é o caso geral dos Latossolos. Isso ocorre devido a elevada capacidade desses solos de adsorver grandes quantidades de P, tendo como consequência uma limitação do nutriente para o crescimento das plantas (Vitousek *et al.*, 2010). O alto índice de intemperismo desses solos resulta no acúmulo residual dos sesquióxidos de ferro (e.g., hematita e goethita) e alumínio (e.g., gibbsita) devido a perda diferencial (Kämpf; Curi, 2000). Os íons fosfatos podem formar ligações estáveis com esses sesquióxidos contribuindo para reduzir a sua disponibilidade para as plantas. Essas ligações dos íons fosfato com a hematita, goethita e gibbsita podem ocorrer em seus sítios positivos ou por meio da troca com os hidróxidos, formando ligações covalentes e iônicas de elevada energia e tornando esses complexos altamente estáveis (Barrow, 1980; 2015).

Dentro desse contexto, a ordem dos Latossolos ocupam lugar de destaque em estudos voltados para a adsorção de P. Isso ocorre devido ao fato dessa ordem de solo apresentar uma mineralogia com grande afinidade para retenção de P, além de ocorrer em áreas onde se concentra grande parte das atividades agrícolas mais tecnificadas do país. A ordem dos Latossolos se distribuem amplamente pelo Brasil, ocupando cerca de um terço (32%) da superfície do território nacional e compondo cerca da metade (50%)

da área dos Cerrados (Ker, 1997; Ker *et al.*, 2012; Lopes; Guilherme; Ramos, 2012). Estes solos são reconhecidos como grandes “fixadores de P”, devido a elevada afinidade da composição mineralógica da sua fração argila com esse nutriente (Ker *et al.*, 1996). De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos, os Latossolos são uma ordem de solos altamente intemperizados, profundos, ácidos, com baixa capacidade de troca catiônica e presença de horizonte B latossólico (Bw). Esse horizonte é caracterizado por possuir um elevado grau de desenvolvimento pedogenético e quantidades variáveis de sesquióxidos de ferro e de alumínio, argilominerais do tipo 1:1, quartzo e outros minerais mais resistentes ao intemperismo (Santos *et al.*, 2018).

Vale informar que os minerais da fração argila de um solo se correlacionam com a composição do material de origem, o qual associado e interligado aos outros fatores de formação do solo (e.g., relevo, clima, organismos e tempo) influenciam nas transformações dos minerais primários em secundários de maior estabilidade ao longo da evolução pedogenética dos solos (Lacerda; Andrade; Quéméneur, 2001). A interação desses fatores desencadeia os processos de transformação mineralógica do solo e contribuem para a formação de minerais do tipo 1:1 e no acúmulo residual dos sesquióxidos de ferro e alumínio (Ker, 1997; Pereira *et al.*, 2020). Dentre os principais minerais presentes na fração argila dos Latossolos, destacam-se a caulinita com minerais do tipo 1:1, a gibbsita como hidróxido de alumínio, a hematita como óxido de ferro e a goethita como oxihidróxido de ferro (Alves; Lavorenti, 2004; Eberhardt *et al.*, 2008).

A caulinita corresponde ao argilomineral filossilicatado de maior representatividade na fração argila, não somente dos Latossolos, mas de maneira geral das outras classes de solo (Melo *et al.*, 2001). A hematita, goethita e gibbsita também são relativamente abundantes na fração argila dos Latossolos e estão estreitamente relacionadas com a adsorção de P promovendo um aumento considerável na capacidade máxima de adsorção desse nutriente pelo solo (Fink *et al.*, 2016b). Vários estudos, incluindo trabalhos recentes, têm destacado não somente a relação desses sesquióxidos na retenção de P, mas também a grande influência dos argilominerais na fixação desse nutriente (Antonangelo *et al.*, 2020; Fang *et al.*, 2017; Gérard, 2016).

Além dos minerais, a matéria orgânica também é um dos constituintes do solo que afeta as reações e as taxas de adsorção e dessorção de P (Fink *et al.*, 2016a,b). Isso ocorre em parte devido a ação da matéria orgânica no bloqueio de potenciais sítios da matriz mineral do solo com elevada afinidade para retenção de P, mantendo o nutriente mais disponível para as plantas (Fink *et al.*, 2016c). Por esse motivo a influência da matéria

orgânica no processo de adsorção de P vem sendo alvo de diversos estudos (Guppy *et al.*, 2005; Negassa *et al.*, 2008). A incorporação de compostos orgânicos elevando o teor de matéria orgânica no solo atua no aumento da biodisponibilidade do nutriente adsorvido pelo solo (Negassa *et al.*, 2008) e, consequentemente, na influência da fração de P disponível presente em solução (Guppy *et al.*, 2005). Quando adicionada ao solo simultaneamente ao P, a matéria orgânica, sobretudo na forma de ácido húmico, pode contribuir aumentando a mobilidade e a disponibilidade desse nutriente no sistema (Du *et al.*, 2013).

Nesse contexto é importante quantificar as interações entre componentes do solo, tais como os argilominerais, os sesquióxidos de ferro e alumínio e a matéria orgânica, com relação a capacidade de sorção e dessorção de P pelo solo. Além disso, ao entender e quantificar o resultado dessas interações, poder-se-á contribuir na proposição de recomendações mais confiáveis para garantir o uso mais eficiente e racional de fertilizantes fosfatados nos sistemas agrícolas tropicais envolvendo os solos muito intemperizados. Sabe-se que esses solos possuem elevada aptidão agrícola desde que bem manejados, sobretudo com relação aos aspectos relacionados a construção de sua fertilidade. Sem práticas adequadas de correção e manejo da fertilidade, esses solos podem se tornar improdutivos, limitando seu potencial agrícola.

## **2 OBJETIVO**

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da matéria orgânica na disponibilidade de P por meio dos extratores Mehlich 1 e 3 e resina nos horizontes A, AB, BA e Bw de três Latossolos muito argilosos coletados na região do Cerrado Mineiro após adubação fosfatada.

## **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

O P é um nutriente essencial para o desenvolvimento das plantas. Dada a natureza finita dos recursos globais do elemento (Mihailescu *et al.*, 2015) e ao seu uso intenso na adubação, esse nutriente constitui como fator limitante à produção agrícola (Cordell; Neset, 2014). Considerando a contínua expansão e intensificação da agricultura nos últimos anos, presume-se que altos aportes de fertilizantes fosfatados continuarão sendo utilizados para manter os elevados índices de produtividade (Riskin

*et al.*, 2013). Dados apontam para um possível esgotamento das reservas de rocha fosfática até o final deste século (Cordell *et al.*, 2009). Portanto, é fundamental o uso e manejo eficiente da adubação fosfatada visando manter a alta produtividade agrícola sem colocar em risco a qualidade ambiental (Macdonald *et al.*, 2011).

O P adicionado ao solo via fertilizantes apresenta grande interação com as partículas sólidas do solo, ficando em sua maior parte retido na forma de compostos de baixa reatividade (Santos *et al.*, 2008). Isso faz com que a disponibilidade de P para as plantas seja muito baixa. Alguns estudos indicam que a sorção de P está correlacionada com o intemperismo (Vitousek *et al.*, 2010), com o teor de argila do solo (Barbieri *et al.*, 2009; Mumbach *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2014), com os componentes mineralógicos presentes nessa fração argila (Camargo *et al.*, 2013; Novais *et al.*, 2007) e com o pH (Barrow; Debnath; Chatterjee, 2016). Esse último, constitui um dos fatores que também exerce efeito sobre a disponibilidade de P.

Segundo Barrow (1980, 2015), a adsorção de P ocorre inicialmente através de uma reação específica e reversível em superfícies de cargas variáveis, como a dos oxihidróxidos de ferro e alumínio. De acordo com o autor, com o decorrer do tempo ocorre a difusão do íon fosfato até os sítios específicos de retenção presentes nas superfícies desses minerais, tornando o nutriente fortemente retido no solo e indisponível para as plantas. A adsorção de íons fosfatos se correlaciona com o conteúdo e a cristalinidade desses minerais (Broggi *et al.*, 2010; Lair *et al.*, 2009). Além disso, uma elevada área superficial específica também pode contribuir com a maior capacidade de retenção de P (Yoon *et al.*, 2014). Esse processo que ocorre na superfície de minerais, associado a precipitação do nutriente na forma de fosfatos de baixa solubilidade, é comum em solos ácidos relativamente ricos em sesquióxidos de ferro e de alumínio, como é o caso geral dos Latossolos (Motta *et al.*, 2002).

Conforme já descrito, os Latossolos constituem o grupamento de solos de maior expressão geográfica no território brasileiro, ocorrendo praticamente em todas as regiões do país sob diferentes condições de clima, relevo e material de origem (Curi *et al.*, 2017; Ker, 1997). Mais de 50% da área do Estado de Minas é ocupada pelo bioma Cerrado, sendo os Latossolos a ordem predominante nessas áreas (Abreu; Garcia; Souza, 2004). É comum nesses solos a deficiência de P disponível, até mesmo quando o teor total do elemento é elevado. Isso ocorre devido a elevada capacidade do solo em fixar o P (Ker *et al.*, 1996). Conforme já descrito, isso ocorre devido aos argilominerais do tipo 1:1, como caulinita; oxihidróxidos e óxidos de ferro, como goethita e hematita,

respectivamente; e hidróxido de alumínio, como gibbsita (Lourenço, 2020; Pereira *et al.*, 2020). Desses minerais, destaca-se a caulinita como o argilomineral mais expressivo na maioria dos Latossolos (Muggle; Buurman; Van Doesburg, 2007; Schaefer *et al.*, 2008). Esse mineral está associado, geralmente, a ambientes de dessilicação e acúmulo de sesquióxidos de ferro e alumínio e, conseqüentemente, na elevada retenção de P (Gonçalves *et al.*, 2011; Nitzsche *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2020).

A mineralogia do solo exerce um papel importante no comportamento da sorção de P. Segundo Roy *et al.* (2017) em seus estudos realizados no Mato Grosso com solos de argila rica em oxihidróxidos de ferro e alumínio, verificaram elevada capacidade de sorção de P, mesmo após três décadas de adubação intensiva. Fink *et al.* (2016a) relacionaram os maiores valores de capacidade máxima de adsorção de P ao maior teor de argila, hematita e goethita presente em Latossolos. Vários outros estudos também constataram elevada afinidade entre P e sesquióxidos de ferro, especialmente goethita. Esses estudos indicaram que a presença de oxihidróxido de ferro no solo contribui de forma significativa com o aumento das taxas de adsorção de P (Camargo *et al.*, 2013; Ferreira; Fernandes; Curi, 1999; Fink *et al.*, 2016b; Kämpf; Curi, 2000; Vilar *et al.*, 2010).

Cabe salientar ainda sobre a importância da cristalinidade dos minerais da fração argila na retenção de P. Minerais de menor cristalinidade e, conseqüentemente, menor tamanho de partícula (maior área superficial específica) são mais reativos, contribuindo com uma alta capacidade de adsorção de P (Hanyabui *et al.*, 2020). Dependendo da cristalinidade dos argilominerais e de sua área superficial específica, alguns filossilicatos podem exceder a capacidade de fixação de P quando comparados aos sesquióxidos de ferro e alumínio (Antonangelo *et al.*, 2020; Gérard, 2016;), embora sejam minerais de menor ocorrência nos solos mais predominantes do território brasileiro. Borgnino; Avena; Pauli (2009) encontraram relação entre o aumento da área superficial específica em montmorilonita provocada pelo ferro (III) e elevação da sua capacidade de fixação de P.

Assim como a mineralogia, a matéria orgânica também afeta as reações e a taxa de adsorção e dessorção de P no solo (Fink *et al.*, 2016c). Essa importante condicionadora do solo atua principalmente na redução da capacidade de adsorção de P e na melhoria da disponibilidade do nutriente para plantas (Pavinato *et al.*, 2009). Isso ocorre devido a competição dos grupamentos de superfície dos compostos orgânicos com os ânions fosfatos pelos sítios de ligação na superfície dos minerais (Liu *et al.*, 2021; Mikutta *et*

*al.*, 2006). Os grupos funcionais carregados negativamente das substâncias húmicas podem interagir com os grupamentos de superfície dos minerais carregados positivamente, como dos sesquióxidos de ferro, desfavorecendo a adsorção de P (Fink *et al.*, 2016a). Além disso, os compostos orgânicos podem aumentar a disponibilidade de P no solo, por meio da complexação com os metais, como o alumínio, evitando a precipitação com P na forma de compostos inorgânicos de baixa solubilidade. Relacionado a matéria orgânica, tem-se ainda o aumento da densidade de cargas negativas da fase sólida do solo intensificando a repulsão de ânions fosfato e inibindo a atração de P pelos sítios de sorção dos minerais (Hunt *et al.*, 2007).

Com relação ao grau de atração do P por compostos orgânicos, esse será influenciado pelos tipos de grupamentos (Zhang *et al.*, 2014). Muitos trabalhos reportam sobre a influência da matéria orgânica na biodisponibilidade de P no solo, devido ao efeito ambivalente de compostos orgânicos (caráter anfótero) atuando na retenção e liberação do elemento na solução (Almeida; Torren; Barrón, 2003; Souza *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2013). Assim, muitos estudos atestaram o efeito positivo da matéria orgânica na disponibilização do elemento em solos com elevadas taxas de fixação de P (Hua *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2006; Yang; Chen; Yang, 2019).

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Coleta e identificação dos solo**

Amostras dos horizontes A, AB, BA e Bw de três classes de Latossolo com diferentes materiais de origem foram coletadas em três perfis representativos previamente selecionados, na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. As amostras foram coletadas nos três perfis na seção de 0 a 150 cm de profundidade. Os solos foram classificados como Latossolo Vermelho Acriférrico típico - LVwf, Latossolo Vermelho Ácrico típico - LVw e Latossolo Amarelo Ácrico típico - LAw (Santos *et al.*, 2018). Informações adicionais dos solos encontram-se descritas na tabela 1. As amostras foram encaminhadas ao laboratório para destorroamento, tamisagem, secagem a sombra e armazenamento para caracterização e avaliação.

Tabela 1. Informações das amostras dos solos coletados em três perfis na seção de 0 a 150 cm de profundidade

| Solo |  | Coordenadas                  | Altitude | Uso atual     | Litologia*   | Cronologia*                 | Material de origem*   |
|------|--|------------------------------|----------|---------------|--|-----------------------------|---|
| LVwf | Latossolo<br>Vermelho<br>Acriférico típico | 18°53'04.3"S<br>48°06'38.7"W | 768 m    | Pastagem      | Basalto,<br>Grupo São Bento,<br>Formação Serra Geral | Juro-cretáceo,<br>Mesozóica | Produto da decomposição do basalto<br>(saprolito)   |
| LVw  | Latossolo<br>Vermelho Ácrico<br>típico     | 18°58'24.6"S<br>47°43'30.6"W | 943 m    | Cerrado       | Cobertura Detrito-<br>laterítica                     | Cenozóico                   | Sedimentos argilosos  |
| LAW  | Latossolo<br>Amarelo Ácrico<br>típico      | 19°05'36.1"S<br>48°09'06.1"W | 984 m    | Lavoura anual | Cobertura detrito-<br>laterítica                     | Cenozóico                   | Sedimentos argiloso fortemente<br>influenciado pela ampla flutuação de<br>lençol freático |

\*Litologia, Cronologia e Material de Origem (Corrêa; Jacomine; Ker, 2011).

## **4.2 Caracterizações dos solos**

As metodologias para determinação dos atributos utilizados para caracterização do solo encontram-se descritos a seguir e os dados apresentados na tabela 2 (Cardoso, 2021).

### **4.2.1 Análise textural**

A análise textural ou granulométrica foi realizada em triplicata de acordo com a metodologia descrita no manual da Embrapa (Embrapa, 2017). Para individualização das partículas quanto ao tamanho areia ( $2 - 0,053$  mm), silte ( $0,053 - 0,002$  mm) e argila ( $<0,002$  mm) foi realizada a dispersão química e física. A dispersão química foi realizada pela adição de 100 mL de NaOH a  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  adicionados sobre 20 g de TFSA e a dispersão física pela agitação a  $360^\circ$  durante 16 horas, em agitador do tipo Wagner. Após a dispersão, a fração areia foi separada utilizando-se uma peneira com abertura de malha de 0,053 mm de diâmetro equivalente, a fração argila foi quantificada pelo método da pipeta, com base na lei de Stokes. A fração silte foi determinada pela coleta adicional da suspensão contendo a fração silte mais argila (Ruiz, 2005).

Após a dispersão e separação das frações areia, silte e argila e argila dos solos, essas frações foram quantificadas com base em peso após secagem em estufa a  $105^\circ\text{C}$  até peso constante. Determinou-se também a umidade da terra fina seca ao ar para a realização dos cálculos e determinações da frações areia, silte e argila em relação a fração terra fina seca em estufa a  $105^\circ\text{C}$  até peso constante. Os dados do teor de argila, silte e areia encontram-se na tabela 2 (Cardoso, 2021).

### **4.2.2 Potencial hidrogeniônico e estimativa do ponto de carga zero**

Para determinação do pH, foi medido, em triplicata,  $10 \text{ cm}^3$  de cada amostra na fração TFSA e transferidas para tubos tipo falcon com tampa rosqueável. Em seguida, foram adicionados 25 mL de água destilada; 25 mL de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  e de 25 mL de  $\text{KCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$  (relação adsorvente:solução igual a 1:2,5), para determinação do pH em água; pH em  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  e pH em  $\text{KCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ , respectivamente. Os tubos foram fechados e agitados horizontalmente durante 10 minutos na mesa agitadora pendular a 120 rpm. Terminado o tempo de agitação, as amostras foram deixadas em repouso por 60 minutos e, posteriormente, realizada a leitura do pH no sobrenadante da suspensão em repouso (Embrapa, 2017).

Para o cálculo do delta pH, foram utilizadas as leituras do pH em  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{KCl}$  1

mol L<sup>-1</sup> determinadas nos ensaios descritos anteriormente. O cálculo foi realizado segundo a equação 1 descrita a seguir:

$$\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O} \quad (\text{equação 1})$$

em que,  $\Delta pH$  – delta pH;  $pH_{KCl}$  – pH da amostra em KCl 1 mol L<sup>-1</sup>;  $pH_{H_2O}$  – pH da amostra em água destilada.

Os valores de delta pH ( $\Delta pH$ ) permite estimar se a carga líquida de um coloide é negativa, nula ou positiva. Dessa forma, a carga de um coloide é negativa quando o valor  $\Delta pH$  for negativo, nula quando o valor do  $\Delta pH$  for zero e positiva quando o valor do  $\Delta pH$  for positivo.

Outra aplicação das análises de pH em H<sub>2</sub>O e em KCl 1 mol L<sup>-1</sup> é a estimativa indireta do PCZ dos coloides, conforme a equação 2 ou 3 (Keng; Uehara, 1974; Uehara, 1988).

$$PCZ = 2pH_{KCl} - pH_{H_2O} \quad (\text{equação 2})$$

$$PCZ = pH_{KCl} + \Delta pH \quad (\text{equação 3})$$

Os dados do pH em H<sub>2</sub>O, pH em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, pH em KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, do delta pH e PCZ encontram-se descritos na tabela 2 (Cardoso, 2021).

#### 4.2.3 Fósforo remanescente

Para análise do fósforo remanescente, amostras de solo contendo 5 cm<sup>3</sup> foram transferidas, em triplicata, por meio de um cachimbo dosador de solo, em erlenmeyer com capacidade para 250 mL. Após adição de 50 mL de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de fósforo, as amostras foram agitadas por 15 minutos em uma mesa agitadora pendular. Em seguida, as amostras foram mantidas sobre uma bancada em repouso por 16 horas e coletado o sobrenadante para a quantificação de fósforo (Embrapa, 2017).

A curva padrão para quantificação de fósforo foi preparada utilizando fosfato de potássio (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) nas seguintes concentrações: 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 e 1,2 mg L<sup>-1</sup> de fósforo. Para a quantificação desse elemento, foram utilizados 2,5 mL do extrato e 5,0 mL da solução sulfomolibídica com ácido ascórbico. A leitura foi realizada no espectrofotômetro (colorímetro) com comprimento de onda ajustado a 725 nm. Os resultados de P rem encontram-se descritos na tabela 2 (Cardoso, 2021).

#### 4.2.4 Carbono orgânico

Para quantificação do C orgânico, as amostras de solo de cada horizonte foram

maceradas em gral de porcelana até passar totalmente em uma peneira de 0,2 mm de abertura de malha. Para realização da oxidação do carbono orgânico, 0,2 g de cada amostra foram pesadas e transferidas para o tubo de ensaio. Posteriormente, adicionaram-se 5 mL de bicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ) a  $0,1666 \text{ mol L}^{-1}$  e 10 mL de ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ). Na sequência, os tubos de ensaios foram dispostos no bloco digestor pré-aquecido a  $170 \text{ }^\circ\text{C}$  e mantidos por 30 min. Transcorrido o tempo, os tubos foram mantidos em temperatura ambiente por 15 min para resfriamento.

Após o resfriamento, foram adicionados 55 mL de água destilada, 10 mL de ácido fosfórico concentrado ( $H_3PO_4$ ) e uma pitada de fluoreto de sódio (NaF). O fluoreto foi adicionado para evitar uma possível interferência de ferro e alumínio presentes em grandes quantidades nos solos analisados. Como solução indicadora foi utilizado 0,3 mL de o-fenantrolina (ferroin) e titulação foi realizada com sulfato ferroso amoniacal [ $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ] a  $0,1999 \text{ mol L}^{-1}$ . Nas mesmas condições foram preparados 6 brancos utilizados para controles, dos quais 3 foram aquecidos e 3 permaneceram sem aquecimento. Após a quantificação dos volumes gasto para titulação das amostras, foram utilizadas as equações propostas por Mendonça e Matos (2005), para cálculo dos teores de carbono orgânico. Os dados de C orgânico e matéria orgânica do solo encontram-se descritos na tabela 2 (Cardoso, 2021).

**TABELA 2.** Atributos dos horizontes principais (A e Bw) e transicionais (AB e BA) dos solo: Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LVwf), Latossolo Vermelho Ácrico típico (LVw) e Latossolo Amarelo Ácrico típico (LAW)

| Solo | Hor.           | Areia                          | Silte    | Argila   | pH H <sub>2</sub> O | pH CaCl <sub>2</sub> | pH KCl       | $\Delta$ pH <sup>2</sup> | PCZ <sup>3</sup> | P rem <sup>4</sup>        | CO <sup>5</sup>                | MOS <sup>6</sup> |
|------|----------------|--------------------------------|----------|----------|---------------------|----------------------|--------------|--------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------|
|      |                | ----- g kg <sup>-1</sup> ----- |          |          | ---                 | ---                  | ---          | ---                      | ---              | -- mg dm <sup>-3</sup> -- | ----- g kg <sup>-1</sup> ----- |                  |
| LVwf | Ap             | 153 (±2)                       | 233 (±1) | 614 (±8) | 5,67 (±0,02)        | 4,66 (±0,02)         | 4,72 (±0,03) | -0,94 (±0,03)            | 3,79 (±0,06)     | 4,86 (±0,86)              | 19,3                           | 33,3             |
|      | AB             | 131 (±2)                       | 229 (±7) | 640 (±6) | 5,65 (±0,01)        | 5,41 (±0,02)         | 5,23 (±0,01) | -0,43 (±0,02)            | 4,80 (±0,03)     | 3,06 (±1,16)              | 13,1                           | 22,6             |
|      | BA             | 120 (±1)                       | 227 (±5) | 653 (±3) | 5,60 (±0,08)        | 5,48 (±0,03)         | 5,28 (±0,03) | -0,32 (±0,02)            | 4,96 (±0,08)     | 2,17 (±1,45)              | 10,0                           | 17,2             |
|      | Bw             | 107 (±0)                       | 239 (±1) | 654 (±0) | 6,12 (±0,06)        | 5,64 (±0,02)         | 5,88 (±0,03) | -0,27 (±0,07)            | 5,58 (±0,10)     | 0,70 (±0,50)              | 7,90                           | 13,7             |
|      | M <sup>1</sup> | 128 (±2)                       | 232 (±7) | 640 (±8) | 5,76 (±0,24)        | 5,30 (±0,44)         | 5,28 (±0,47) | -0,49 (±0,31)            | 4,78 (±0,44)     | 2,70 (±1,74)              | 12,6 (±5,0)                    | 21,7 (±8,6)      |
| LVw  | A              | 213 (±1)                       | 55 (±5)  | 732 (±4) | 5,10 (±0,01)        | 3,86 (±0,00)         | 4,14 (±0,04) | -0,97 (±0,04)            | 3,17 (±0,08)     | 11,23 (±2,10)             | 23,8                           | 41,0             |
|      | AB             | 180 (±0,2)                     | 52 (±2)  | 768 (±0) | 5,50 (±0,01)        | 4,11 (±0,01)         | 4,42 (±0,02) | -1,10 (±0,02)            | 3,32 (±0,03)     | 8,40 (±0,90)              | 17,6                           | 30,3             |
|      | BA             | 163 (±0,0)                     | 49 (±3)  | 788 (±3) | 5,53 (±0,01)        | 4,27 (±0,01)         | 4,51 (±0,01) | -1,02 (±0,02)            | 3,49 (±0,03)     | 7,80 (±0,43)              | 12,1                           | 20,8             |
|      | Bw             | 157 (±0,1)                     | 53 (±1)  | 790 (±1) | 5,67 (±0,04)        | 4,72 (±0,02)         | 5,12 (±0,04) | -0,55 (±0,08)            | 4,57 (±0,12)     | 2,98 (±1,46)              | 10,0                           | 17,2             |
|      | X <sup>1</sup> | 178 (±0,2)                     | 52 (±5)  | 770 (±4) | 5,45 (±0,24)        | 4,24 (±0,36)         | 4,55 (±0,41) | -0,91 (±0,25)            | 3,64 (±0,64)     | 7,60 (±3,42)              | 15,87 (±6,18)                  | 27,4 (±10,7)     |
| LAW  | Ap             | 173 (±0,2)                     | 210 (±8) | 617 (±5) | 6,37 (±0,03)        | 5,46 (±0,02)         | 5,56 (±0,02) | -0,82 (±0,03)            | 4,75 (±0,05)     | 9,11 (±1,11)              | 20,0                           | 34,5             |
|      | AB             | 121 (±0,0)                     | 92 (±3)  | 787 (±3) | 6,11 (±0,01)        | 5,50 (±0,01)         | 5,37 (±0,02) | -0,74 (±0,01)            | 4,63 (±0,03)     | 6,22 (±0,86)              | 14,8                           | 25,6             |
|      | BA             | 119 (±0,2)                     | 92 (±2)  | 789 (±0) | 6,24 (±0,01)        | 5,62 (±0,02)         | 5,51 (±0,01) | -0,73 (±0,02)            | 4,78 (±0,03)     | 4,06 (±2,49)              | 12,1                           | 20,8             |
|      | Bw             | 106 (±0,2)                     | 89 (±0)  | 805 (±2) | 6,74 (±0,02)        | 5,87 (±0,01)         | 5,95 (±0,03) | -0,80 (±0,01)            | 5,16 (±0,03)     | 1,08 (±0,37)              | 8,30                           | 14,3             |
|      | X <sup>1</sup> | 130 (±0,2)                     | 121 (±8) | 749 (±5) | 6,37 (±0,27)        | 5,61 (±0,18)         | 5,60 (±0,25) | -0,77 (±0,04)            | 4,83 (±0,23)     | 5,12 (±3,40)              | 13,80 (±4,93)                  | 23,8 (±8,5)      |

<sup>1</sup> X representa a média de todos os horizontes e o valor entre parênteses representa o desvio padrão da média; <sup>2</sup>  $\Delta$ pH - Delta pH calculado pela diferença entre o pH H<sub>2</sub>O e o pH KCl; <sup>3</sup> PCZ – Ponto de Carga Zero calculado pela soma do pH KCl mais o delta pH; <sup>4</sup> P rem = P remanescente; <sup>5</sup> CO – carbono orgânico e <sup>6</sup> MO – matéria orgânica do solo (MO = CO x 1,724). Fonte: (Cardoso, 2021).

### 4.3 Adubação fosfatada

Para avaliação da disponibilidade de P, amostras em triplicatas dos horizontes A, AB, BA e Bw dos três solos (LVwf, LVw e LAw) foram incubadas por um período de três meses, com doses crescentes de P, em delineamento inteiramente casualizado. Para definição das doses foram consideradas as recomendações de adubações fosfatadas para produção e para correção. Além disso, foram também estabelecidas doses baseadas nos parâmetros dos modelos de Freundlich (capacidade sortiva) e Langmuir (capacidade máxima de adsorção) conforme trabalho de (Cardoso, 2021). As doses adicionadas, utilizando como fonte o fosfato de cálcio ( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  PA), foram as seguintes: 0; 100; 300; 600; 900; 1200; 2400; 3600; 4800 e 6000  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Essas quantidades correspondem respectivamente as seguintes concentrações de P: 0; 22; 65; 131; 196; 240; 524; 786; 1047 e 1309  $\text{mg dm}^{-3}$ . O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, 120 tratamentos (3 solos, 4 horizontes e 10 doses) com três repetições totalizando 360 amostras.

Previamente à condução dos estudos, foram determinadas também em triplicata a densidade do solo deformado por meio de cachimbo medidor de volume de 50  $\text{cm}^3$  e a umidade na capacidade de campo pelo método do funil utilizando 100  $\text{cm}^3$  de solo. Para adição das doses de adubos fosfatados, foram utilizados 100  $\text{cm}^3$  de solos, os quais foram acondicionados em sacos plásticos com capacidade para 500 mL. O volume do solo foi aferido com base em peso de acordo com os valores de densidade do solo previamente determinada para cada horizonte: HA = 0,98  $\text{g cm}^{-3}$ , HAB = 1,00  $\text{g cm}^{-3}$ , HBA = 0,97  $\text{g cm}^{-3}$  e HBw = 0,98  $\text{g cm}^{-3}$  para o solo LVwf; HA = 0,89  $\text{g cm}^{-3}$ , HAB = 0,92  $\text{g cm}^{-3}$ , HBA = 0,93  $\text{g cm}^{-3}$  e HBw = 0,92  $\text{g cm}^{-3}$  para o solo LVw e HA = 0,91  $\text{g cm}^{-3}$ , HAB = 0,86  $\text{g cm}^{-3}$ , HBA = 0,88  $\text{g cm}^{-3}$  e HBw = 0,87  $\text{g cm}^{-3}$  para o solo LAw. Após a aplicação do fertilizante fosfatado, as amostras foram mantidas com umidade entre 50 a 60% da capacidade de campo durante o período de três meses para reação (90 dias). O controle da umidade foi realizado com base em peso. Após o período de incubação foram realizadas as quantificações de P por meio de diferentes extratores comumente utilizados nos manuais de recomendação de adubação das principais culturas no Brasil: Mehlich 1, Mehlich 3 e Resina. A quantificação de P foi realizada por colorimetria conforme preconizado em cada metodologia.

### 4.4 Extração do fósforo disponível

#### 4.4.1 Mehlich 1

A quantificação do fósforo disponível por meio do extrator Mehlich 1 seguiu os protocolos da Embrapa (EMBRAPA, 2017). De acordo com o manual, amostras dos solos contendo 5 cm<sup>3</sup> foram colocadas em erlenmeyer com capacidade para 250 mL. Em seguida, adicionaram-se 50 mL da solução Mehlich 1 (HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup>) e as amostras foram agitadas por 5 minutos em uma mesa agitadora do tipo orbital. Na sequência, as amostras foram mantidas em repouso sobre uma bancada por 16 horas e, posteriormente, foram coletados o sobrenadante para quantificação do P.

A curva padrão para quantificação de fósforo foi preparada utilizando fosfato de potássio (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) nas seguintes concentrações: 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 e 1,2 mg L<sup>-1</sup> de fósforo. Para a quantificação desse elemento, foram utilizados 2,5 mL do extrato e 5,0 mL da solução sulfomolibídica com ácido ascórbico. A leitura foi realizada no espectrofotômetro (colorímetro) com comprimento de onda ajustado a 660 nm.

#### 4.4.2 Mehlich 3

A quantificação do fósforo disponível por meio do extrator Mehlich 3 seguiu os protocolos da Embrapa (EMBRAPA, 2017). De acordo com o manual, amostras dos solos contendo 2,5 cm<sup>3</sup> foram colocadas em tubo falcon com capacidade para 50 mL. Em seguida, adicionaram-se 25 mL da solução Mehlich 3 (CH<sub>3</sub>COOH 0,2 mol L<sup>-1</sup> + NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 0,25 mol L<sup>-1</sup> + NH<sub>4</sub>F 0,015 mol L<sup>-1</sup> + HNO<sub>3</sub> 0,013 mol L<sup>-1</sup> + EDTA 0,001 mol L<sup>-1</sup>) e as amostras foram agitadas por 5 minutos em uma mesa agitadora do tipo orbital. Na sequência, as amostras foram mantidas em repouso sobre uma bancada por 16 horas e, posteriormente, foram coletados o sobrenadante para quantificação do P.

A curva padrão para quantificação de fósforo foi preparada utilizando fosfato de potássio (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) nas seguintes concentrações: 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 e 1,2 mg L<sup>-1</sup> de fósforo. Para a quantificação desse elemento, foram utilizados 1 mL do extrato e 13 mL da solução sulfomolibídica com ácido ascórbico. A leitura foi realizada no espectrofotômetro (colorímetro) com comprimento de onda ajustado a 880 nm.

#### 4.4.3 Resina

A quantificação do fósforo resina por meio da resina de troca aniônica seguiu os protocolos preconizados por Raij *et al.* (2001). De acordo com o protocolo analítico, amostras dos solos contendo 2,5 cm<sup>3</sup> foram colocadas em copos plásticos com capacidade para 200 mL. Em seguida, adicionaram-se 25 mL da água destilada e uma bola de vidro

e as amostras foram agitadas por 15 minutos em uma mesa agitadora do tipo orbital (170 RPM). Na sequência, retirou-se a bola de vidro, adicionou 2,5 cm<sup>3</sup> de resina tratada para uso e as amostras foram agitadas por 16 horas em uma mesa agitadora do tipo orbital. Terminado o tempo de agitação, a resina foi separada do solo e transferida para um copo plástico de 100 mL. Foram adicionados 50 mL de solução de NH<sub>4</sub>Cl 0,8 ml L<sup>-1</sup> e HCl 0,2 mol L<sup>-1</sup> e, posteriormente, as suspensões foram mantidas em repouso por 30 minutos e agitadas por 60 minutos em uma mesa agitadora do tipo orbital. Terminado o tempo de agitação, foram coletados o sobrenadante para quantificação do P.

A curva padrão para quantificação de fósforo foi preparada utilizando fosfato de potássio (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) nas seguintes concentrações: 0; 0,16; 0,32; 0,48; 0,64; e 0,80 mg L<sup>-1</sup> de fósforo. Para a quantificação desse elemento, foram utilizados 4 mL do extrato e 16 mL da solução sulfomolibídica com ácido ascórbico. A leitura foi realizada no espectrofotômetro (colorímetro) com comprimento de onda ajustado a 725 nm.

#### **4.5 Delineamento experimental e análises estatísticas**

Os dados do experimento foram submetidos à análise de variância pelo software SISVAR (Ferreira, 2011). Foi realizada a correlação linear de Pearson para os dados de caracterização da matéria orgânica, P remanescentes e P disponível. Quando detectadas diferenças significativas para os fatores solos, horizontes e doses, foi realizada análise de regressão ao nível de 5% de probabilidade. As curvas de regressão da variável P disponível em função das doses de adubação fosfatada foram apresentadas com seus coeficientes de determinação. As porcentagens de P adsorvido e disponível foram comparadas pelo teste de médias Scott-Knott. Foi também realizada a correlação linear e apresentada as regressões com seus coeficientes de determinação para comparação dos valores de P disponível determinados no três extratores: Mehlich 1 e 3 e Resina.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Matéria orgânica e disponibilidade de fósforo**

As quantidades de P remanescente e P disponível extraídas pelo Mehlich 1 e 3 e Resina apresentaram correção positiva com a matéria orgânica, com exceção para o P disponível extraído por Resina no solo LVw (Tabela 3). Os índices de correlação positivos indicam que o aumento da quantidade de MOS no solo reduz retenção de P, elevando os valores de P remanescentes e de P disponível. Resultados semelhantes foram observados em outros

estudos (Camargo *et al.*, 2013; Heredia; Cirelli, 2007; Yang; Chen; Yang, 2019).

**TABELA 3.** Correlações de Pearson dos atributos dos solos: Latossolo Vermelho Acriférico típico (LVwf), Latossolo Vermelho Ácrico típico (LVw) e Latossolo Amarelo Ácrico típico (LAW)

| Atributos <sup>1</sup> | MOS                | P rem              | P Mehlich 1 | P Mehlich 3 | P Resina           |
|------------------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------|
| <b>MO</b>              | 1,00               | 0,86 **            | 0,70 *      | 0,60 *      | 0,42 <sup>NS</sup> |
| <b>P rem</b>           | 0,86 **            | 1,00               | 0,84 **     | 0,84 **     | 0,57 <sup>NS</sup> |
| <b>P Mehlich 1</b>     | 0,70 *             | 0,84 **            | 1,00        | 0,93 **     | 0,85 **            |
| <b>P Mehlich 3</b>     | 0,60 *             | 0,84 **            | 0,93 **     | 1,00        | 0,75 **            |
| <b>P Resina</b>        | 0,42 <sup>NS</sup> | 0,57 <sup>NS</sup> | 0,85 **     | 0,75 **     | 1,00               |

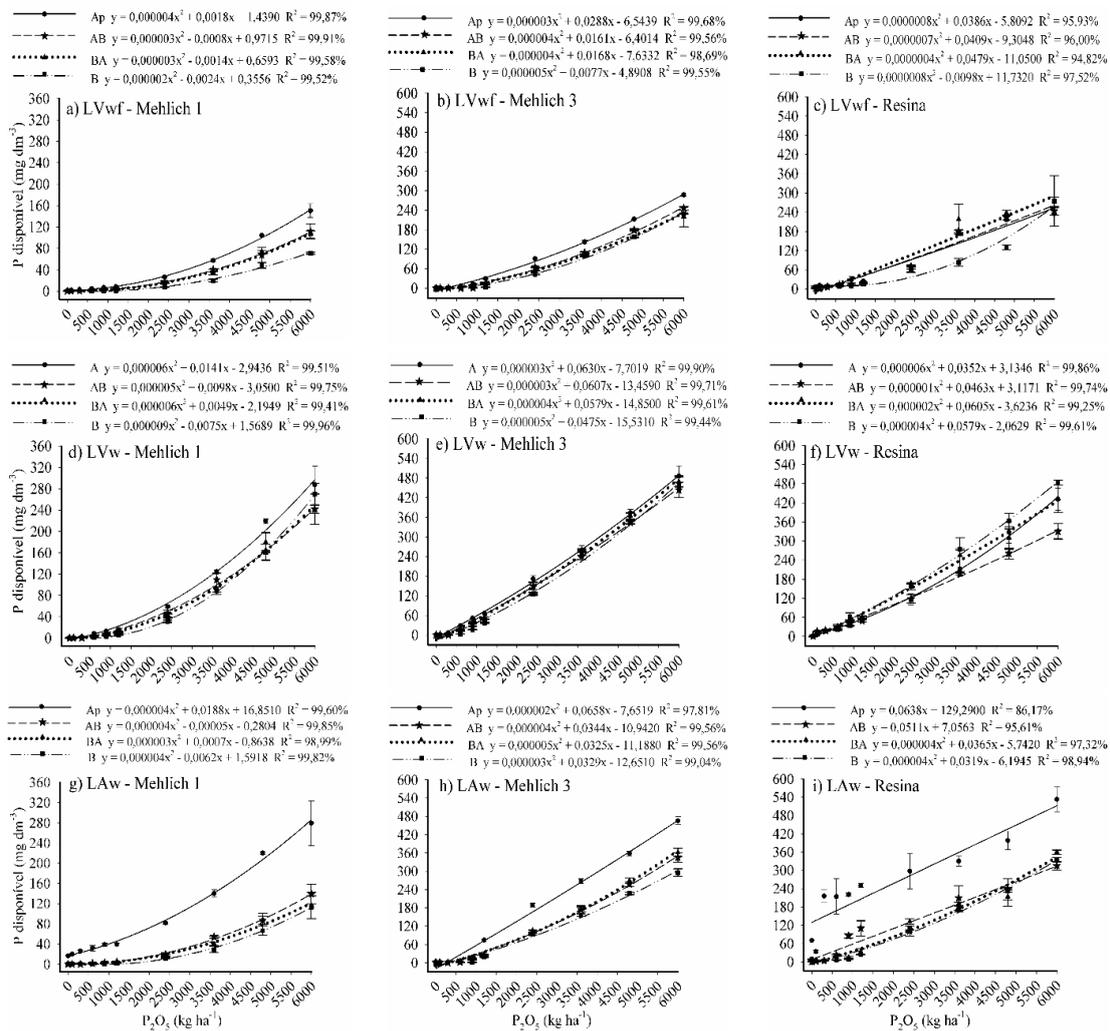
<sup>1</sup> MOS – valores de matéria orgânica do solo; P rem – médias dos valores de fósforo remanescente ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) e P Mehlich 1 e 3 e Resina – médias dos valores de fósforo disponível extraídos pelos extratores Mehlich 1 (P Mehlich 1 –  $\text{mg dm}^{-3}$ ), Mehlich 3 (P Mehlich 3 –  $\text{mg dm}^{-3}$ ) e Resina (P Resina –  $\text{mg dm}^{-3}$ ) após aubação fosfatada. Níveis de significância: \*  $P < 0,05$ , \*\*  $P < 0,01$  e NS não significativo. Número de amostras = 12.

Houve uma correlação de 0,86 entre a matéria orgânica e o P remanescente ( $P < 0,01$ ). Entre a matéria orgânica e o P disponível, foi observado uma correlação de 0,70 e 0,60 para os extratores Mehlich 1 e 3, respectivamente. O mesmo comportamento não foi observado para o extrator resina que apresentou correlação não significativa. Para as correlações positivas, constata-se que o aumento da matéria orgânica pode contribuir para maior disponibilidade de P conforme constatado por Fontana *et al.* (2008). Em seu estudo com Latossolo Vermelho distroférico envolvendo a análise de substâncias húmicas em sucessão soja/aveia, esses autores comprovaram efeito da matéria orgânica sobre os valores de P remanescente e concluíram que o sistema de plantio direto contribui para redução da adsorção e precipitação de P. Dessa forma, as práticas de manejo aplicadas para preservar a matéria orgânica no solo pode ser benéfica para otimizar a absorção de P pelas plantas (Cui *et al.*, 2011).

Outros estudos atestaram o efeito positivo da matéria orgânica na disponibilização do P em solos com elevadas taxas de fixação desse nutriente (Hua *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2010; Souza, *et al.*, 2006). Isto pode ser explicado devido a interação dos minerais com a matéria orgânica bloqueando os sítios de retenção de P e aumentando a quantidade de P disponível (Camargo *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2021; Mikutta *et al.*, 2006). Além disso, ocorre um aumento das cargas negativas na fase sólida do solo, o que intensifica a repulsão dos ânions fosfatos e reduz a atração do P pelos locais de sorção (Hunt *et al.*, 2007).

## 5.2 Fósforo disponível após incubação

As quantidades de P disponível extraídas pelo Mehlich 1 e 3 e resina aumentaram em função das quantidades de  $P_2O_5$  adicionadas para todos os horizontes A, AB, BA e Bw em todos os solos LVwf, LVw e LAw (Figura 1). Esse aumento do P disponível apresentou um comportamento quadrático para os extratores Mehlich 1 e 3 e resina para todos os horizontes (A, AB, BA e Bw) e solos (LVwf, LVw e LAw), com exceção para o extrator resina que apresentou comportamento linear nos horizontes A e AB para o solo LAw.



**FIGURA 1.** Quantidade de P disponível ( $mg\ dm^{-3}$ ) em função das quantidades adicionadas de  $P_2O_5$  ( $kg\ ha^{-1}$ ). Fósforo disponível extraído pelo Mehlich 1 (a, d, g), Mehlich 3 (b, e, h) e resina (c, f, i) dos horizontes principais e transicionais (A, AB, BA e Bw) do Latossolo Vermelho Acriférico típico (LVwf), Latossolo Vermelho Ácrico típico (LVw) e Latossolo Amarelo Ácrico típico (LAw).

Observou-se que as regressões apresentaram os valores dos coeficientes de

determinação ( $R^2$ ) elevados com destaque para os extratores Mehlich 1 e 3 que apresentaram valores acima de 98%. Para o extrator resina, os coeficientes de correlação foram acima de 95% para as equações quadráticas e de 86% para as equações lineares. Vale destacar que o comportamento quadrático, no qual o coeficiente angular da função quadrática é positivo, a curva possui a concavidade voltada para cima. A concavidade voltada para cima indica uma elevada afinidade do P pelo solo conforme observada nas curvas representadas na figura 1. Observou-se com o aumento da quantidade aplicada de  $P_2O_5$ , um pequeno incremento na quantidade de P disponível. Esse incremento é menor nas primeiras doses e tende a aumentar com a elevação da quantidade de  $P_2O_5$  aplicada. Esse comportamento não é observado na equação linear, na qual a quantidade de P disponível aumenta de forma constante e diretamente proporcional a elevação das doses aplicadas.

De maneira geral, o horizonte A de cada solo apresentou as maiores concentrações de P disponível quantificadas pelo extrator Mehlich 1 e 3. O comportamento semelhante entre os extratores Mehlich 1 e 3 se deu provavelmente devido a similaridade com relação a acidez do meio para extração do P presentes no solo (Reis *et al.*, 2020). Já o comportamento da resina divergiu em relação ao Mehlich 1 e 3, sobretudo pelo fato da extração não envolver ação ácida e propiciar uma reação de troca no pH atual do solo. Cabe salientar que o comportamento do P disponível quantificado pelo extrator resina no horizonte A do solo LAw, divergiu do comportamento desse mesmo extrator para os outros solos devido ao fato do horizonte A desse solo apresentar inicialmente uma maior quantidade de P disponível.

Mumbach *et al.* (2020) observaram que há um aumento no P disponível em função da adição de P no solo. É correto inferir que os sítios adsorptivos do solo retém o elemento até atingir um ponto de saturação, o que pode ocorrer após intensas aplicações do fertilizante (Barrow; Debnath, 2014). Vale ressaltar que o ponto de saturação no solo demanda grandes quantidades aplicadas de adubos fosfatados. No manejo da adubação, essas quantidades são ainda mais elevadas quando se considera as quantidades de P extraídas pelas culturas e exportadas pelas colheitas (Barrow; Debnath, 2014; Syers; Johnston; Curtin, 2008).

Observa-se que o extrator Mehlich 1 extrai menores quantidades de P disponível quando comparado aos extratores Mehlich 3 e resina, os quais extraíram valores mais semelhantes. Matos *et al.* (2023) também constataram maior teor de P extraído pela resina em solos argilosos. Cabe ressaltar que os métodos Mehlich 1 e 3 são característicos por

apresentarem maior capacidade de extração de P em solos ácidos. Já a resina não apresenta limitação quanto ao pH, sendo eficaz tanto em solos ácidos quanto alcalinos (Arruda; Lana; Pereira, 2015). De acordo com Novais *et al.* (2007), solos com pH elevado, sobretudo aqueles mais argilosos, tendem a reduzir o poder de extração do Mehlich 1. Nesse sentido, a solução extratora Mehlich 3, também tem sua capacidade extratora reduzida. Penn *et al.* (2018) em seu estudo, relatam uma redução na capacidade do flúor da solução Mehlich 3 em extrair P em pH mais elevado. Outro fator contribuinte para a redução da capacidade extratora dos métodos, está relacionada as mudanças nas formas de P presentes no solo, que varia de acordo com a alteração do pH.

### 5.3 Porcentagem de fósforo disponível

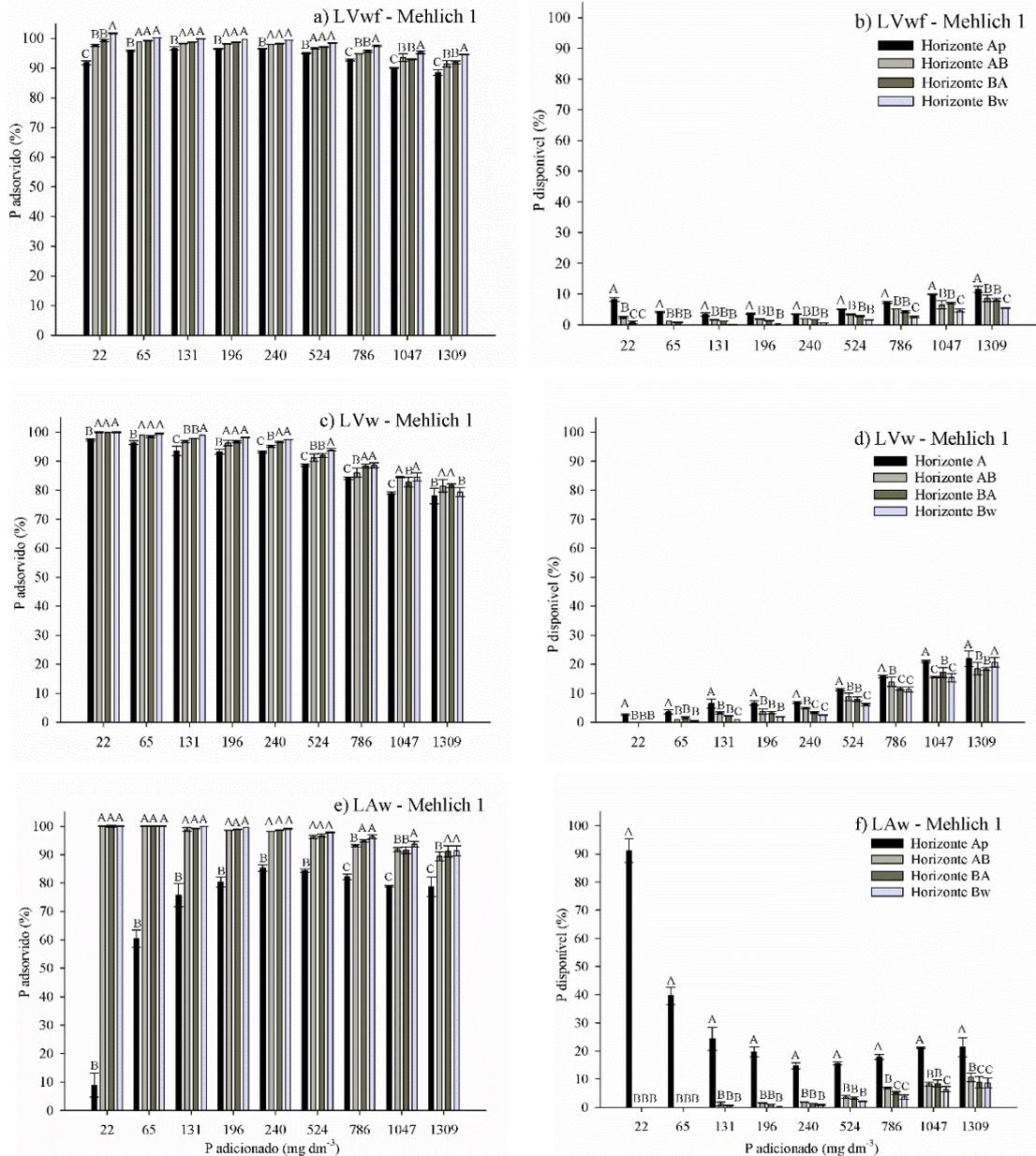
Grande parte do P adicionado ficou retido no solo, como pode ser observado nas figuras 2, 3 e 4, sobretudo nos horizontes subsuperficiais AB, BA, Bw. O solo LVwf, em todos os horizontes e nas diferentes quantidades de P aplicadas, com base no extrator Mehlich 1, reteve (88-100%) do P e disponibilizou (0-12%) desse nutriente em relação a quantidade de P aplicada (Figura 2). Para o extrator Mehlich 3 (Figura 3), esse solo reteve (78-100%) e disponibilizou (0-22%) e para o extrator resina (Figura 4), esse mesmo solo reteve (51-94%) e disponibilizou (6-49%).

Já o solo LVw, em todos os horizontes e nas diferentes quantidades de P aplicadas, com base no extrator Mehlich 1 (Figura 2), reteve (78-100%) do P e disponibilizou (0-22%) do P com relação a quantidade de P aplicada. Para o extrator Mehlich 3 (Figura 3), esse solo reteve (63-100%) e disponibilizou (0-37%) e para o extrator resina (Figura 4), esse mesmo solo reteve (30-83%) e disponibilizou (17-70%).

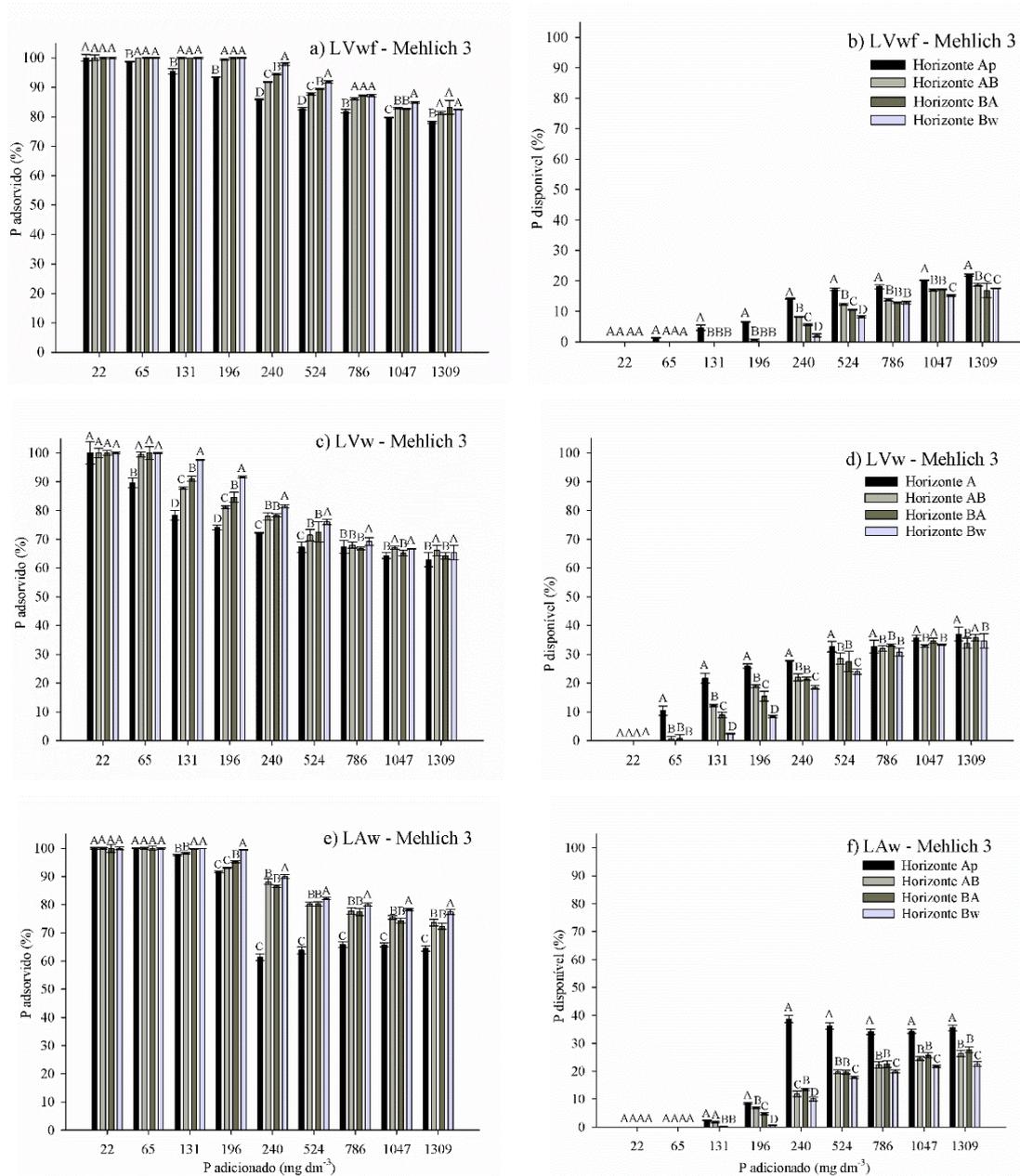
Com relação ao solo LAw, em todos os horizontes e nas diferentes quantidades de P aplicadas, com base no extrator Mehlich 1 (Figura 2), reteve (9-100%) do P e disponibilizou (0-91%) do elemento com relação a quantidade de P aplicada. Para o extrator Mehlich 3 (Figura 3), esse solo reteve (61-100%) e disponibilizou (0-39%) e para o extrator resina (Figura 4), esse mesmo solo reteve (0-96%) e disponibilizou (4-100%).

Considerando a média geral para todos os solos, horizontes e doses, com base no extrator Mehlich 1 (Figura 2), constatou-se que a retenção dos solos foi de 90% do P adicionado e somente 10% do nutriente ficou disponível; com base no extrator Mehlich 3 (Figura 3), constatou-se que a retenção dos solos foi de 86% do P adicionado e somente 14% do nutriente ficou disponível; e com base no extrator resina (Figura 4), constatou-se que a retenção dos solos foi de 69% do P adicionado e somente 31% do nutriente ficou

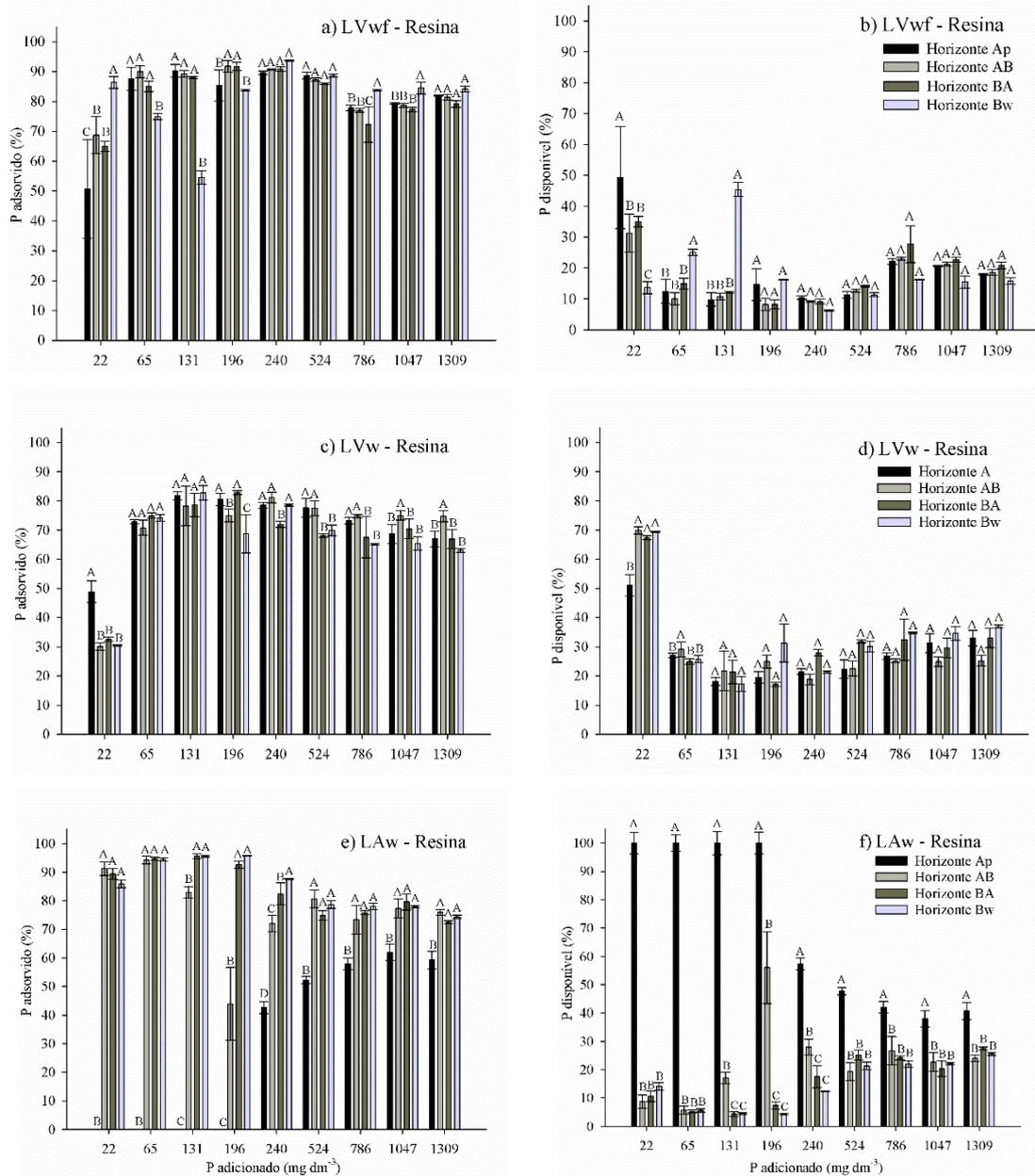
disponível.



**FIGURA 2.** Porcentagem de fósforo adsorvido (Pads) e disponível (Pdisp) quantificados no extrato Mehlich 1 após adição de doses crescente de P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) nos horizontes principais e transicionais (A, AB, BA e Bw) do Latossolo Vermelho Acriférico típico (LVwf – a e b), Latossolo Vermelho Ácrico típico (LVw – c e d) e Latossolo Amarelo Ácrico típico (LAw – e e f). Medias seguidas das mesmas letras não diferenciam entre si entre os grupos de colunas, pelo teste de Scott-Knott, com 5% de probabilidade.



**FIGURA 3.** Porcentagem de fósforo adsorvido (Pads) e disponível (Pdisp) quantificados no extrato Mehlich 3 após adição de doses crescente de P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) nos horizontes principais e transicionais (A, AB, BA e Bw) do Latossolo Vermelho Acriférico típico (LVwf – a e b), Latossolo Vermelho Ácrico típico (LVw – c e d) e Latossolo Amarelo Ácrico típico (LAw – e e f). Medias seguidas das mesmas letras não diferenciam entre si entre os grupos de colunas, pelo teste de Scott-Knott, com 5% de probabilidade.



**FIGURA 4.** Porcentagem de fósforo adsorvido (Pads) e disponível (Pdisp) quantificados no extrato resina após adição de doses crescente de P ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) nos horizontes principais e transicionais (A, AB, BA e Bw) do Latossolo Vermelho Acriférico típico (LVwf – a e b), Latossolo Vermelho Ácrico típico (LVw – c e d) e Latossolo Amarelo Ácrico típico (LAW – e e f). Medias seguidas das mesmas letras não diferenciam entre si entre os grupos de colunas, pelo teste de Scott-Knott, com 5% de probabilidade.

A elevada retenção de P pelos solos foi certamente influenciada pelo elevado teor de argila (Tabela 2) e pela mineralogia dessa fração, conforme já descrito para a ordem dos Latossolos. Uma mineralogia composta por sesquióxidos de ferro e de alumínio e argilominerais do tipo 1:1 (Santos *et al.*, 2018), a qual contribui com a elevada

capacidade de retenção de P e, conseqüente, diminui a quantidade de P disponível (Fink *et al.*, 2016c). Deve-se ainda considerar que a quantidade de P disponível poderia ainda ser menor se não houvesse o efeito da matéria orgânica (Tabela 2), a qual contribui de forma inversa, reduzindo a quantidade de P adsorvido e elevando a quantidade de P disponível.

A contribuição para maior disponibilidade de P fica evidente também ao observar o comportamento do elemento nas figuras 2, 3 e 4. Nos solos LVwf, LVw e LAw, a menor retenção e a maior disponibilização de P em função das quantidades adicionadas geralmente ocorreram no horizonte A, seguido dos horizontes AB, BA e Bw. Esse comportamento está associado com o teor de matéria orgânica, o qual foi maior no A e reduziu consecutivamente nos horizontes AB, BA e Bw (Tabela 2). Compostos orgânicos, presentes em maior concentração no horizonte A atuam na redução da adsorção de P pelo solo e no aumento da fração disponível de P para as plantas.

A maior concentração de matéria orgânica (Tabela 2) no horizonte A comparado ao horizonte Bw foi igual a 19,6 g kg<sup>-1</sup> (1,96%) para o solo LVwf; 23,8 g kg<sup>-1</sup> (2,38%) para o solo LVw e 20,2 g kg<sup>-1</sup> (2,02%) para o solo LAw. Quando se compara esse valor, a disponibilidade de P do horizonte A, com maior teor de matéria orgânica, em relação ao horizonte Bw, com menor teor de matéria orgânica, tem-se uma redução na retenção de P em detrimento ao aumento na sua disponibilidade da ordem de: i) 4,6% para o solo LVwf, 4,1% para o solo LVw e 27,0% para o solo LAw quantificado por meio do extrator Mehlich 1 (redução média 11,9% na retenção de P); ii) 5,4% para o solo LVwf, 8,0% para o solo LVw e 10,8% para o solo LAw quantificado por meio do extrator Mehlich 3 (redução média 8,1% na retenção de P); e 0,4% para o solo LVwf e 54,9% para o solo LAw quantificado por meio do extrator resina (redução média 27,7% na retenção de P). O solo LVw para o extrator resina teve comportamento inverso, os horizontes com menor quantidade de matéria orgânica (horizontes AB, BA e Bw) reteram menos e disponibilizaram mais 5,6% de P em relação ao horizonte A, com maior quantidade de matéria orgânica.

A redução na retenção de P pode ocorrer por meio da competição pelos sítios com potenciais adsorptivos de P, aumento da densidade de cargas negativas na superfície dos minerais do solo e pela própria ligação com o P formando complexos de maior solubilidade e complexando o alumínio e, conseqüentemente, evitando a formação de compostos insolúveis com o P (Fink *et al.*, 2016c; Souza *et al.*, 2006). Camargo *et al.* (2013) identificaram correlação positiva entre matéria orgânica e P, destacando a

interação dos compostos orgânicos e os sesquióxidos de ferro e alumínio, reduzindo os sítios de retenção de P.

A maior quantidade de P disponível foi extraída no solo LVw (Mehlich 1 = 57 mg dm<sup>-3</sup>; Mehlich 3 = 129 mg dm<sup>-3</sup>; resina = 128 mg dm<sup>-3</sup>), seguido do LAw (Mehlich 1 = 27 mg dm<sup>-3</sup>; Mehlich 3 = 89 mg dm<sup>-3</sup>; resina = 99 mg dm<sup>-3</sup>) e por fim LVwf (Mehlich 1 = 28 mg dm<sup>-3</sup>; Mehlich 3 = 66 mg dm<sup>-3</sup>; resina = 81 mg dm<sup>-3</sup>), para os extratores Mehlich 1 e 3 e resina, respectivamente. Isso corrobora com a afirmação de que quanto maior o P remanescente (Tabelas 2 e 3), menor a adsorção de P e, conseqüentemente, maior a concentração de P disponível (Brasil *et al.*, 2020). Os mecanismos de adsorção de P no solo também são fortemente afetados pelo pH. Rosa; Caponi; Júnior (2016) identificaram maior disponibilidade de P à medida que aumenta o pH, identificando o pH 6,5 como faixa ideal para a disponibilização do elemento. Conforme observado na tabela 2, o pH moderadamente ácido presente nesses solos pode ter contribuído com a eficiência dos extratores Mehlich 1 e 3 evitando o esgotamento da solução extratora (Penn *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2020; Rosa; Silva; Maluf, 2018).

Os três extratores foram eficientes na avaliação do P disponível (Mumbach *et al.*, 2018; Steiner *et al.*, 2012), embora o Mehlich 1 tenha apresentado as menores proporções de P disponível, sobretudo nas menores doses de P adicionado, mesmo tendo na sua composição a presença de ácidos fortes (Simonete *et al.*, 2015). Esse comportamento pode estar relacionado a limitação do método em extrair algumas formas de P ligado a oxihidróxidos de ferro e alumínio presentes nos Latossolos (Ker, 1997). Resultados semelhantes foram obtidos em outros estudos (Bortolon; Gianello, 2008; Matos *et al.*, 2023; Medeiros *et al.*, 2021).

Outro fator que pode ter contribuído com esse resultado foi a pouca disponibilidade de P ligado a Ca nestes solos, forma facilmente extraída pelos métodos Mehlich 1 e 3 que possuem solução ácida (Bortolon; Gianello, 2008, Medeiros *et al.*, 2021). Tem-se também de considerar a influência da matéria orgânica na redução da eficiência do método devido ao aumento do poder tampão do solo (Brasil *et al.*, 2020). Além disso, devido a característica da solução extratora Mehlich 1 e tendo em vista a sensibilidade desse extrator às diferentes texturas do solo (Bortolon; Gianello, 2008; Bortolon; Gianello; Schlindwein, 2009) utiliza-se como forma de minimizar a limitação deste método, a separação dos solos nas seguintes classes texturais: solos arenosos de 0 a 15% de argila, solos de textura média de 15 a 35% de argila, solos argilosos de 35 - 60% de argila e solo muito argilosos 60 a 100 % de argila (Ribeiro;

Guimarães; Alvarez, 1999). Classificação essa já inserida nos manuais para interpretação da classe de P disponível, como utilizada nos Estados de Minas Gerais, do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e outros (Ribeiro; Guimarães; Alvarez, 1999; Bortolon; Gianello, 2008; Martha Júnior; Vilela; Souza, 2007). Vale aqui destacar que ambos os solos avaliados nesse estudo se enquadram na classe de solos muito argilosos (> 60% de argila – Tabela 2).

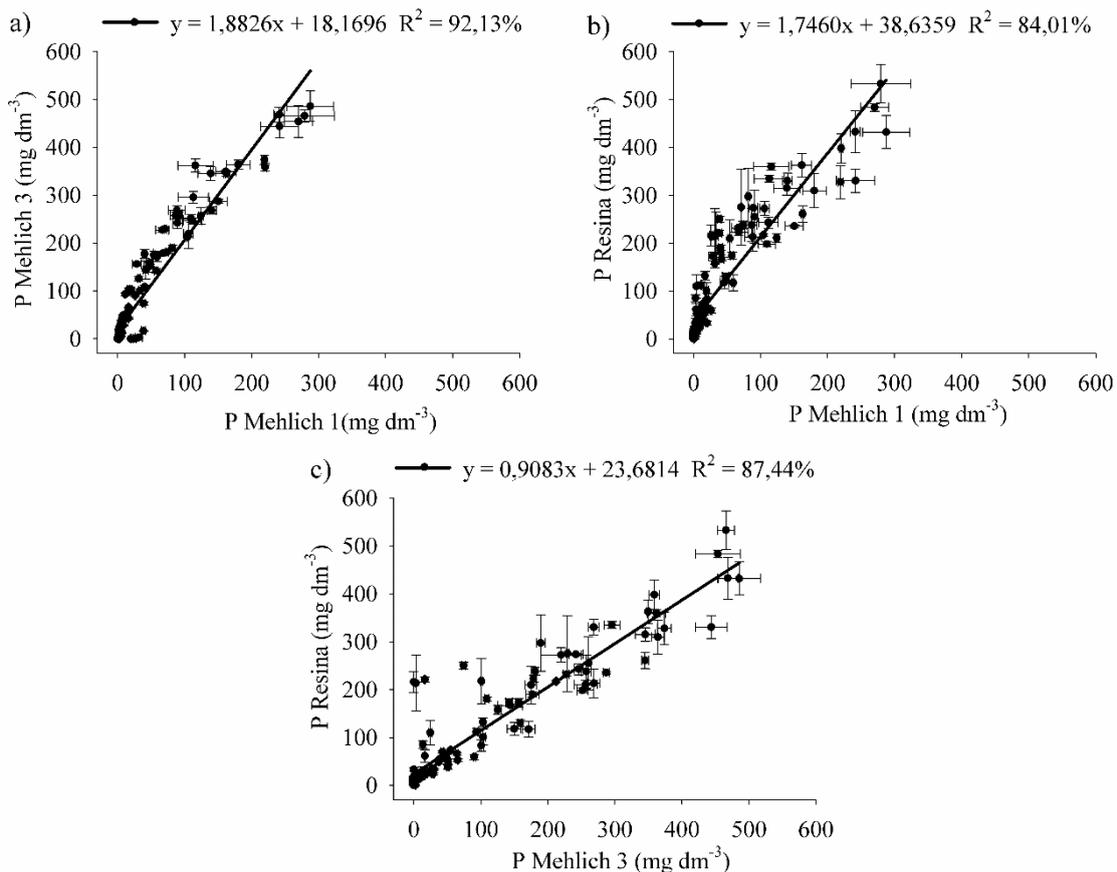
Em contraposição nos extratos Mehlich 3 e resina foram quantificadas as maiores quantidades de P disponível. Bortolon; Gianello; Schindwein (2009) descreveram que o Mehlich 3 extrai menores quantidades de P em relação ao Mehlich 1, em solos argilosos. Entretanto, esse comportamento não foi observado neste estudo, sendo o Mehlich 3 e a resina os métodos que extraíram as maiores quantidades de P. Por outro lado, Matos *et al.* (2023) identificaram que o Mehlich 3 extraiu valores semelhantes à resina na maioria das doses que foram estudadas, corroborando com os resultados do presente estudo. Mumbach *et al.* (2018), estudando solos com texturas diferentes, também obtiveram valores de P disponível similares para ambos os extratores, atribuiu-se esse resultado à mineralogia da fração argila dos solos. Tanto Mehlich 3 quanto resina extrai preferencialmente o P ligado aos oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, presentes nos solos avaliados (Matos *et al.*, 2023; Mumbach *et al.*, 2018, 2020; Roy *et al.*, 2017).

A resina tem sido apregoada como o extrator mais eficiente para estimar o P disponível. Isso ocorre devido a forma de extração do elemento, a qual envolve o mecanismo de troca entre a resina e solo, simulando a extração que ocorre pelas raízes das plantas (Silva; Raij, 1999). A utilização da resina promove maior assertividade quanto ao teor de P disponível no solo, pois reduz os problemas de superestimação do elemento (Arruda; Lana; Pereira, 2015). Cabe aqui ressaltar, que todos os extratores possuem suas potencialidades e limitações. Assim, torna-se necessário o uso de tabelas específicas para interpretação do P disponível de acordo com cada extrator.

#### **5.4 Correlação dos extratores**

O comportamento dos três extratores variou consoante a composição de seus reagentes e sua reação com os diferentes tipos de solo (Figura 5). Observou-se que o extrator Mehlich 1 extraiu menores valores de P que o Mehlich 3 e a resina. Esses resultados podem ser observados pela figura 5a e 5b. Na figura 5a, observa-se que as distribuições dos pontos ascendem mais próximos ao eixo y (extrator Mehlich 3) em comparação ao eixo x (extrator Mehlich 1). Isso pode ser comprovado pelo valor do

coeficiente angular, que mede o grau de inclinação da reta, o qual apresentou valor igual a 1,88 ( $y = 1,88x + 18,17$   $R^2 = 92,13\%$ ). O mesmo comportamento pode ser observado também na figura 5b, na qual os pontos também se encontram mais próximos ao eixo y (extrator resina) em comparação ao eixo x (extrator Mehlich 1). Nessa regressão, o coeficiente angular da reta apresentou valor igual a 1,75 ( $y = 1,75x + 38,64$   $R^2 = 84,01\%$ ). Esse resultado corrobora com outros estudos (Freitas *et al.*, 2013; Bortolon; Gianello; Schlindwein, 2009; Steiner *et al.*, 2012). De maneira geral, a quantidade de P extraída pela solução Mehlich 3 e resina foram mais semelhantes. Pode-se observar pela figura 5c, que o coeficiente angular de inclinação da reta foi de 0,91 ( $y = 0,91x + 23,68$   $R^2 = 87,44\%$ ), portanto mais próximos de um (1). Constataram-se que os pontos tendem a se concentrar mais no meio da figura, somente um pouco mais afastados do eixo x (extrator Mehlich 3) e um pouco mais próximos do eixo y (extrator resina).



**FIGURA 5.** Correlação de fósforo disponível ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) extraídos pelo Mehlich 1, Mehlich 3 e Resina em amostras dos horizontes principais e transicionais A, AB, BA e Bw do Latossolo Vermelho Acriférrico típico (LVwf), Latossolo Vermelho Ácrico típico (LVw) e Latossolo Amarelo Ácrico típico (LAW) após adição de doses crescentes de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

De maneira geral constata-se que os valores dos coeficientes de determinação das regressões ( $R^2$ ) foram considerados elevados. Essas correlações possibilitam comparar as quantidades de P disponível quantificadas em cada extrator. Pelos coeficientes angulares das retas é possível verificar que o extrator Mehlich 3 extrai 1,88 vezes mais P comparado ao extrator Mehlich 1 e o extrator resina extrai 1,75 vezes mais P em relação ao extrator Mehlich 1, para os solos estudados. Quando se compara os extratores resina e Mehlich 3 observa-se que o extrator resina extrai 0,91 vezes do P disponível comparado ao extrator Mehlich 3. Comportamentos semelhantes desses extratores foram observados por outros autores (Bortolon *et al.*, 2011; Mumbach *et al.*, 2018; Rolim *et al.*, 2008; Souza Júnior *et al.*, 2012). A solução Mehlich 1 extrai P em uma ordem de prioridade, onde as formas fosfatadas de menor energia de ligação são preferencialmente extraídas. Solos argilosos com alta capacidade tamponante, tendem a diminuir a eficiência do método em termos de capacidade de extração (Steiner *et al.*, 2012), além de outras características, como a quantidade de sesquióxidos de ferro e alumínio presente no solo e a capacidade de troca de cátions (Bortolon *et al.*, 2011; Gatiboni *et al.*, 2015; Rolim, 1998). Estes atributos contribuem para aumentar a taxa de readsorção de P no extrato durante o tempo de reação de 16 horas determinado na metodologia, reduzindo os valores de P extraído (Tedesco *et al.*, 1995). Por sua vez, a solução Mehlich 3 não apresenta limitações de readsorção, extraindo preferencialmente formas de P ligado a oxihidroxidos de ferro e alumínio e fosfato de cálcio mais solúvel (Bortolon; Gianello; Schlindwein, 2009). Isso pode ter contribuído com os maiores valores de P extraído em Mehlich 3 comparado ao Mehlich 1 (Moreira; Malavolta, 2001).

A resina, tal como o Mehlich 3, apresentou valores de P disponível mais elevados em relação ao Mehlich 1. Isso deve-se a característica de troca iônica do bicarbonato retido na resina com o fosfato presente no solo, até que atinja um equilíbrio químico entre o solo e a resina (Gonçalves *et al.*, 2012; Silva; Rajj, 1999; Simões Neto *et al.*, 2009). Simonete *et al.* (2015) em seu estudo com cultivo de arroz em solos inundados, identificaram que a resina extraiu menos P devido a uma maior aptidão do método em extrair P ligado a alumínio, em relação às formas de P ligado a ferro. Assim como o Mehlich 1 e 3, a resina é também sensível à textura dos solos, associado a isso a mesma não possui capacidade de extração de formas de P ligado a cálcio (Mumbach *et al.*, 2018; Mumbach *et al.*, 2020; Santos; Kliemann, 2005).

## 6 CONCLUSÕES

O teor de matéria orgânica influenciou na capacidade de retenção de fósforo no solo e nas suas frações disponíveis;

Os solos reteram a maior parte do fósforo adicionado (76 a 94%) e somente uma pequena porcentagem ficou disponível (6 a 24%);

O extrator Mehlich 1 extraiu menores quantidades de P disponível (6%) comparado aos extratores Mehlich 3 (15%) e Resina (24%).

O extrator Mehlich 3 extrai 1,88 vezes e o extrator resina extrai 1,75 vezes mais fósforo disponível comparado ao extrator Mehlich 1. Já o extrator resina extrai 0,91 vezes mais P disponível comparado ao extrator Mehlich 3.

A maior concentração no horizonte A comparada ao Bw de: i) 1,96% de matéria orgânica no solo LVwf aumentou a disponibilidade de P em 4,6% no extrato Mehlich 1, 5,4% no extrato Mehlich 3 e 0,4% no extrato resina; ii) 2,38% de matéria orgânica no solo LVw aumentou a disponibilidade de P em 4,1% no extrato Mehlich 1 e 8,0% no extrato Mehlich 3 e reduziu a disponibilidade de P em 5,6% no extrato resina; e iii) 2,02% de matéria orgânica no solo LAw aumentou a disponibilidade de P em 27,0% no extrato Mehlich 1; 10,8% no extrato Mehlich 3 e 54,9% no extrato resina.

Conclui-se que matéria orgânica aumenta a disponibilidade de P e a fração de P disponível foi variável entre os extatores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R. B.; GARCIA, J.; SOUZA, M. L. S. **Cerrado mineiro: desafios e perspectivas**. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais, p. 44, 2004. Disponível em: <https://dspace.almg.gov.br/handle/11037/689?mode=full>  
Acesso em: 27 de novembro de 2024.

ALVES, M. E.; LAVORENTI, A. Remaining phosphorus and sodium fluoride pH in soils with different clay contents and clay mineralogies. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 3, p. 241-246, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000300006>

ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e

adsorção defosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil.

**Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 985-1002, 2003. DOI:

<https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000600003>

ANTONANGELO, J. A.; FIRMANO, R. F.; ZHANG, H.; COLZATO, M.; ABDALA, D. B.; CARVALHO, H. W. P.; JUNIOR, A. O.; ALLEONI, L. R. F. Phosphorus speciation by P- XANES in an Oxisol under long-term no-till cultivation. **Geoderma**, v. 377, p. 114580, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114580>

ARRUDA, E. M.; LANA, R. M. Q.; PEREIRA, H. S. Fósforo extraído por Mehlich I e resina de troca aniônica em solos submetidos á calagem. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 4, p. 1107-1117, 2015. Disponível em:

<https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/22170/16730>

BARBIERI, D. M.; JUNIOR, J. M.; ALLEONI, L. R. F.; GARBUIO, F. J.; CAMARGO, L. A. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 6, p. 819-826, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000600015>

BARROW, N. J.; DEBNATH, A. Effect of phosphate status on the sorption and desorption properties of some soils of northern India. **Plant and Soil**, 378, p. 383-395, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2042-8>

BARROW, N. J.; DEBNATH, A.; CHATTERJEE, S. Effect of pH and prior phosphate application on the reaction of fluoride with soils from northern India. **European Journal of Soil Science**, v. 67, n. 3, p. 294-302, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12337>

BARROW, N. J. Soil phosphate chemistry and the P-sparing effect of previous phosphate applications. **Plant and Soil**, v. 397, n. 1–2, p. 401–409, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2514-5>

BARROW, N. J. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. **The role of phosphorus in agriculture**, p. 333-359, 1980. DOI:

<https://doi.org/10.2134/1980.roleofphosphorus.c14>

BORGNINO, L.; AVENA, M. J.; PAULI, C. P. Synthesis and characterization of Fe (III)-montmorillonites for phosphate adsorption. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 341, n. 1-3, p. 46-52, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.03.037>

BORTOLON, L; GIANELLO, C. Interpretação de resultados analíticos de fósforo pelos extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2751-2756, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000700019>

BORTOLON, L; GIANELLO, C; SCHLINDWEIN, J. A. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para o milho pelos métodos Mehlich-1 e Mehlich-3. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 4, p. 305-312, 2009. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/995/99515590007.pdf> Acesso em 24 de Julho de 2023.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; WELTER, S.; ALEMIDA, R.G.O; GIASSON, E. Simultaneous extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils and potassium recommendations for crops in Southern Brazil. **Pedosphere**, v. 21, n. 3, p. 365-372, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60137-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60137-9)

BRASIL, E. C; ARAUJO, S; VIEGAS, I; DANTAS, R. C. R. Métodos de análise do solo e representação dos resultados. 2020. In: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIEGAS, I. J. M. (Ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1127237/1/LV-RecomendacaoSolo-2020-57-61.pdf>. Acesso 24 de julho de 2023.

BROGGI, F.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; OLIVEIRA, A. C. Avaliação da disponibilidade, adsorção e níveis críticos de fósforo em diferentes solos. **Revista Ceres**, v. 57, p. 247-252, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000200017>

CAMARGO, L. A.; JUNIOR, J. M.; PEREIRA, G.T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena**, v. 100, p. 100-106, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.07.016>

CARDOSO, F. S. **Adsorção e dessorção de fosfato em horizontes com diferentes quantidades de matéria orgânica em Latossolos do Cerrado no Triângulo Mineiro**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2021, 52 p. DOI: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/32939/1/AdsorcaoDessorcaoFosfato.pdf>

CORDELL, D.; DRANGERT, J; WHITE, S. "The story of phosphorus: global food security and food for thought". **Global environmental change**, v. 19, n. 2, p. 292-305, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>

CORDELL, D.; NESET, T. S. S. Phosphorus vulnerability: a qualitative framework for assessing the vulnerability of national and regional food systems to the multi-dimensional stressors of phosphorus scarcity. **Global Environmental Change**, v. 24, p. 108-122, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.11.005>

CORRÊA, G. F.; JACOMINE, P. K. T.; KER, J. C. Guia de Campo – Reunião Técnica Itinerante de Classificação e Correlação de Solos. XXXIII – Congresso Brasileiro de Ciência do Solo – **Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, p. 99, 2011.

CUI, H. J.; WANG, M. K.; FU, M. L.; CI, E. Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, p. 1135-1141, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0405-9>

CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; TORRADO, P. V.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Pedologia: solos dos biomas brasileiros**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2017. 597 p.

DU, Z. Y.; WANG, Q. H.; LIU, F. C.; MA, H. L.; MA, B. Y.; MALHI, S. S. Movement of phosphorus in a calcareous soil as affected by humic acid. **Pedosphere**, v. 23, n. 2, p. 229-235, 2013. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60011-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60011-9)

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; BECQUER, T.; GUIMARÃES, M F. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sobpastagens no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1009-1016, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300010>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª edição revisada e ampliada. Editores TEIXEIRA et al. Brasília, Distrito Federal: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. 573p.

Disponível em:

[https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1085209/1/Manual deMetodosdeAnalisedeSolo2017.pdf](https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1085209/1/Manual%20de%20MetodosdeAnalisedeSolo2017.pdf)

FANG, H.; CUI, Z.; HE, G.; HUANG, L.; CHEN, M. Phosphorus adsorption onto clay minerals and iron oxide with consideration of heterogeneous particle morphology. **Science of the Total Environment**, v. 605–606, p. 357–367, 2017. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.133>

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 507- 514, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300003>

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Phosphorus adsorption and desorption in undisturbed samples from subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**,

v. 179, n. 2, p. 198–205, 2016a. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201500017>

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 62–68, 2016b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.07.017>

FINK, J. R.; INDA, A. V.; TIECHER, T.; BARRÓN, V. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 4, p. 369–379, 2016c. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542016404023016>

FONTANA, A.; PEREIRA, M.G.; SALTON, J.C.; LOSS, A.; CUNHA, T.J.F. Fósforo remanescente e correlação com as substâncias húmicas em um Latossolo Vermelho sob diferentes sucessões de cultura em plantio direto. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 14, p. 1-6, 2008. Disponível em: <https://periodicos-old.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/CAST/article/view/1900> Acesso em: 28 de novembro de 2024.

FREITAS, I. F. D; NOVAIS, R. F; VILLANI, E. M. D. A; NOVAIS, S. V. Phosphorus extracted by ion exchange resins and Mehlich-1 from Oxisols (Latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 667-677, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300013>

GATIBONI, L. C., SMYTH, T. J; SCHMITT, D. E; CASSOL, P. C; OLIVEIRA, C. M. B. D.. Limites críticos ambientais de fósforo no solo para avaliar seu risco de transferência para águas superficiais no estado de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1225-1234, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140461>

GÉRARD, F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphatesorption in soils: A myth revisited. **Geoderma**, v. 262, p. 213-226, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.036>

GONÇALVES, G. K.; MEURER, E. J.; BORTOLON, L.; GONÇALVES, D. R. N. Relação entre óxidos de ferro e de manganês e a sorção de fósforo em solos no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1633-1639, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500017>

GONÇALVES, G. K.; BORTOLON, L.; MEURER, E. J.; GONÇALVES, D. R. N.; SOUSA, R. O. D.; FAGUNDES, S. M. Extratores de fósforo para o arroz irrigado em solos adubados com fosfato natural reativo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 11, n. 3, p. 196-204, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/202024>

GUPPY, C. N.; MENZIES, N. W.; MOODY, P. W.; BLAMEY, F. P. C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Soil Research**, v. 43, n. 2, p. 189-202, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR04049>

HANYABUI, E.; APORI, S. O.; FRIMPONG, K. A.; ATIAH, K.; ABINDAW, T.; ALI, M.; ASIAMA, J. Y.; BYALEBEKA, J. Phosphorus sorption in tropical soils. **AIMS Agriculture and Food**, v. 5, n. 4, p. 599-616, 2020. DOI: <https://10.3934/agrfood.2020.4.599>

HEREDIA, O. S.; CIRELLI, A. F. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. **Geoderma**, v. 137, n. 3-4, p. 426-431, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.00>

HUA, Q.; LI, J.; ZHOU, J.; WANG, H.; DU, C.; CHEN, X. Enhancement of phosphorus solubility by humic substances in ferrosols. **Pedosphere**, v. 18, n. 4, p. 533-538, 2008. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(08\)60044-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60044-2)

HUNT, J. F.; OHNO, T.; HE, Z.; HONEYCUTT, W.; DAIL, B. Inhibition of phosphorus sorption to goethite, gibbsite, and kaolin by fresh and decomposed organic matter. **Biology and Fertility of Soils**, v. 44, n. 2, p. 277-288, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-007-0202-1>

SOUZA JÚNIOR, R. F. D.; OLIVEIRA, F. H. T. D.; SANTOS, H. C.; FREIRE, F. J.; ARRUDA, J. A. D. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o

fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 159-170, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100017>

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: Indicadores de atributos e ambientes pedogenéticos e geoquímicos. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.107-138.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Genomos**, v. 5, n. 1, p. 17-40. 1997. DOI:<https://doi.org/10.18285/geonomos.v5i1.187>

KER, J. C.; FONTES, M. P. F.; SOUZA, A. R.; RESENDE, M. Adsorção de fósforo em alguns solos latossólicos: relação entre mineralogia e efeito da calagem. **Ceres**, v.43, n. 246, p. 1-11, 1996. Disponível em: <http://www.ceres.ufv.br/ojs/index.php/ceres/article/view/2317/0>

KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; TORRADO, P. V. **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. 343 p.

LACERDA, M. P. C.; ANDRADE, H.; QUÉMÉNEUR, J. J. G. Transformações mineralógicas ao longo de perfis de alteração pedogenética na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 4, p. 799 - 809, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000400003>

LAIR, G. J.; ZEHETNER, F.; KHAN, Z. H.; GERZABEK, M. H. Phosphorus sorption-desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River. **Geoderma**, v. 149, n. 1-2, p. 39-44, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.11.011>

LIU, J.; LU, H.; WU, L.; KERR, P. G.; WU, Y. Interactions between periphytic biofilms and dissolved organic matter at soil-water interface and the consequent effects on soil phosphorus fraction changes. **Science of The Total Environment**, v. 801, p. 149708, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149708>

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S. J. The saga of agricultural development of the Brazilian Cerrado. **International Potash Institute**, Latin America, v. s/n, n. 32, p. 29-56, nov. 2012.

LOURENÇO, M. Avaliação da capacidade máxima de adsorção de fósforo na fração argila de Latossolos da região do Triângulo Mineiro. 2020. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. DOI: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/25658>

MACDONALD, G. K.; BENNETT, E. M.; POTTER, P. A.; RAMANKUTTY, N. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 7, p. 3086-3091, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1010808108>

MARTHA JÚNIOR, G. B.; VILELA, L.; SOUZA, D. M. G. (Eds). **Cerrado: uso eficiente de corretivos e fertilizantes em pastagens**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. 224 p.

MATOS, C. H. L. D; MELO, V. F; UCHÔA, S. C. P; PEREIRA, R. D. A; NASCIMENTO, P. P. R. R. Phosphorus extractants for soils in the humid tropical region of Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, 54, p. e20228372, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20230042>

MEDEIROS, M. D. O. N; OLIVEIRA, F. H. T. D; PRESTON, W; PAIVA, M. R. D. F. C; GÓIS, H. M. D. M. N. Comparação de métodos de extração de fósforo disponível em solos do semi-árido. **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210062>

MELO, V. F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P. F. Chemical and mineralogical properties of kaolinite-rich Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**. v. 65, n. 4, p. 1324-1333, 2001. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541324x>

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa - UFV; 2005. 107 p.

MIHAILESCU, E.; MURPHY, P. N. C.; RYAN, W.; CASEY, I. A.; HUMPHREYS, J. Phosphorus balance and use efficiency on 21 intensive grass-based dairy farms in the South of Ireland. **The Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 3, p. 520-537, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859614000641>

MIKUTTA, R., KLEBER, M., TORN, M. S.; JAHN, R. Stabilization of Soil Organic Matter: Association with Minerals or Chemical Recalcitrance. **Biogeochemistry**, v. 77, p. 25–56, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-005-0712-6>

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Fontes, doses e extratores de fósforo em alfafa e centrosema. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 36, n. 12, p. 1519- 1527, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001001200009>

MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O; RAIJ, B. V; NETO, A. E. F; LIMA, J. M. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: Influência da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 349-359, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200008>

MUGGLE, C. C.; BUURMAN, P.; VAN DOESBURG, J. D. J. Weathering trends and parent material characteristics of polygenetic Oxisols from Minas Gerais, Brazil: I. Mineralogy. **Geoderma**, v. 138, n. 1-2, p. 39-48, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.10.008>

MUMBACH, G. L.; OLIVEIRA, D. A.; WARMLING, M. I.; GATIBONI, L. C. Quantificação de fósforo por Mehlich 1, Mehlich 3 e Resina Trocadora de Ânions em solos com diferentes teores de argila. **Revista Ceres**, v. 65, p. 546- 554, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201865060010>

MUMBACH, G. L., GATIBONI, L. C; DALL'ORSOLETTA, D. J; SCHMITT, D. E; PESSOTTO, P. P; OLIVEIRA, C. M. B. Phosphorus extraction with soil test methods affected by soil P sorption capacity. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.

20, p. 1882-1890, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00259-1>

NEGASSA, W.; DULTZ, E.; SCHLICHTING, A.; LEINWEBER, P. Influence of specific organic compounds on phosphorus sorption and distribution in a tropical soil. **Soil Science**, v.173, n. 9, p. 587-601, 2008. DOI: <https://10.1097/SS.0b013e3181847eef>

NITZSCHE, R. P.; PERCIVAL, J. B.; TORRANCE, J.K.; STIRLING, J.A.R.; BOWEN, J.T. X-ray diffraction and infrared characterization of Oxisols from central and southeastern Brazil. **Clay Minerals**, v. 43, n. 4, p. 549-560, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.4.03>

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. 1a. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

OLIVEIRA, C. M. B.; GATIBONI, L. C.; MIQUELLUTI, D. J.; SMYTH, T. J.; ALMEIDA, J. A. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia em Latossolo Bruno em razão de diferentes ajustes do modelo Langmuir. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1805-1815, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000600015>

OLIVEIRA, L. E. Z.; NUNES, R. S.; SOUSA, D. M. G.; FIGUEIREDO, C. C. Dynamics of residual phosphorus forms under different tillage systems in a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v. 367, p. 114254, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114254>

PANTANO, G.; GROSSELI, G. M.; MOZETO, A. A.; FADINI, P. S. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Química Nova**, v. 39, p. 732-740, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20160086>

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 105, n. 1, p. 149-155, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.07.001>

PENN, C. J; RUTTER, E. B; ARNALL, D. B; CAMBERATO, J; WILLIAMS, M; WATKINS, P. A discussion on Mehlich-3 phosphorus extraction from the perspective of governing chemical reactions and phases: Impact of soil pH. **Agriculture**, v. 8, n. 7, p. 106, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture8070106>

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BEUTLER, S. J.; TORRES, J. L. R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 508-514, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500010>

PEREIRA, T. T. C.; OLIVEIRA, F. S.; FREITAS, D. F.; DAMASCENO, B. D.; DIAS, A. C. A mineralogia dos solos tropicais: estado da arte e relação com o uso e manejo. **Geonomos**, v. 28, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v28i1.29650>

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tripicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. Disponível em: [http://lab.iac.sp.gov.br/Publicacao/Raij\\_et\\_al\\_2001\\_Metod\\_Anal\\_IAC.pdf](http://lab.iac.sp.gov.br/Publicacao/Raij_et_al_2001_Metod_Anal_IAC.pdf). Acesso em 12 de agosto 2023.

REIS, J. V. D; ALVAREZ, V. H. V; DURIGAN, R. D; PAULUCIO, R. B; CANTARUTTI, R. B. Interpretation of soil phosphorus availability by Mehlich-3 in soils with contrasting phosphorus buffering capacity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, 2020. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20190113>

RIBEIRO, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V, V. H. (Eds). **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo para o Estado de Minas Gerais, 1999, 359 p.

RISKIN, S. H.; PORDER, S.; NEILL, C.; FIGUEIRA, A. M. S.; TUBBESING, C.; MAHOWALD, N. The fate of phosphorus fertilizer in Amazon soya bean fields. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1619, p.20120154, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0154>

ROLIM, M. V. **Fósforo disponível pelos extratores Mehlich-1, resina em esfera e em lâmina, em amostras de solos submetida as diferentes graus de moagem.** 1998. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998. 73 p. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/12029> Acesso em 26 de Julho de 2024.

ROLIM, M. V.; NOVAIS, R. F. D.; NUNES, F. N.; ALVAREZ V, V. H. Efeito da moagem do solo no teor de fósforo disponível por Mehlich-1, resina em esferas e em lâmina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1181-1190, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300026>

ROSA, A.; CAPONI, L. H.; JÚNIOR, L. A. Z. Disponibilidade de fósforo em um latossolo vermelho em função do pH do solo. **Acta Iguazu**, v. 5, n. 5, p. 108–115, 2016. DOI: <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v5i5.15975>

ROSA, S. D.; SILVA, C. A.; MALUF, H. J. G. M. Interação ácido húmico-fertilizantes fosfatados e fósforo extraível em solos de textura contrastante. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 49, p. 32-42, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180004>

ROY, E. D.; WILLIG, E.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; VAZQUEZ, F. F.; PEGORINI, L.; SPERA, S. A.; PORDER, S. Soil phosphorus sorption capacity after threedecades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 249, n. 1, p. 206 –214, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.004>

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 297-300, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000200015>

SANTOS, J. Z. L.; NETO, A. E. F.; RESENDE, A. V.; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 705- 714, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200025>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, J. C. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 353 p. E- book. Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em 26 de Julho de 2023.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, v. 43, n. 1, p. 137-154, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.1.11>

SILVA, F. C.; RAIJ, B. V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 267-288, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000200016>

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 840-848, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000700005>

SIMONETE, M. A.; ERNANI, P. R.; MORO, L.; TEIXEIRA-GANDRA, C. F. A.; GATIBONI, L. C. Eficiência de métodos analíticos na predição da disponibilidade de fósforo para arroz irrigado em solos catarinenses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1151-1160, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140797>

SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; TORRES, P. R. F.; BALIZA, D. P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 975-983, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000600007>

STEINER, F., LANA, M. M. C.; ZOZ, T.; FRANDOLOSO, J. F.; FEY, R. Extraction methods and availability of phosphorus for soybean in soils from Paraná State, Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 3, p. 1005-1013, 2012. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445744113015>

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. **FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin**, v. 18, n. 108, p. 5-50, 2008. Disponível em: <https://soil5813.okstate.edu/Spring2012/Syers%202008.pdf>  
Acesso em 24 de Julho de 2023.

TEDESCO J. M.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEM, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, planta e outros materiais**. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2 ed., 1995, 174 p. Disponível em:  
[https://rolas.cnpt.embrapa.br/arquivos/manual\\_rolas.pdf](https://rolas.cnpt.embrapa.br/arquivos/manual_rolas.pdf) Acesso em 12 de Julho de 2023.

VILAR, C. C.; COSTA, A. C. S.; HOEPERS, A.; JUNIOR, I. G. S. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1059-1068, 2010. DOI:  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400006>

VITOUSEK, P. M.; PORDER, S.; HOULTON, B. Z.; CHADWICK, O. A. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen–phosphorus interactions. **Ecological applications**, v. 20, n. 1, p. 5-15, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1890/08-0127.1>

YANG, X.; CHEN, X.; YANG, X. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 85-91, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.016>

YOON, S.; LEE, C.; PARQUE, J.; KIM, J.; KIM, S. B.; LEE, S. H.; CHOI, J. W. Estudos cinéticos, de equilíbrio e termodinâmicos para adsorção de fosfato a nanopartículas magnéticas de óxido de ferro. **Revista de Engenharia Química**, v. 236, p.341-347, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.053>

YU, W.; DING, X.; XUE, S. LI, S.; LIAO X.; WANG, R. Effects of organic-matter application on phosphorus adsorption of three soil parent materials. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 13, n. 4, p. 1003-1017, 2013. DOI:

<http://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000079>.

ZHANG, C.; DING, S.; XU, D.; TANG, Y.; WONG, M. H. Bioavailability assessment of phosphorus and metals in soils and sediments: a review of diffusive gradients in thin films (DGT). **Environmental Monitoring and Assessment**, v.186, p. 7367–7378, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3933-0>.