

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

ESTUDO DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO  
ATRAVÉS DOS EXTRATORES MEHLICH-1, MEHLICH-3,  
BRAY-1 E OLSEN COM USO DE FERTILIZANTES EM  
ARGISSOLO E LATOSSOLO DA AMAZÔNIA CENTRAL

MICHELE FERNANDES PEREIRA

MANAUS

2019

MICHELE FERNANDES PEREIRA

ESTUDO DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO ATRAVÉS DOS  
EXTRATORES MEHLICH-1, MEHLICH-3, BRAY-1 E OLSEN COM USO  
DE FERTILIZANTES EM ARGISSOLO E LATOSSOLO DA AMAZÔNIA  
CENTRAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós - Graduação em Química,  
Universidade Federal do Amazonas, como  
parte dos requisitos para a obtenção do título  
de Mestre em Química, área de  
concentração: Química Analítica.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio dos Santos Farias

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria do Rosário Lobato Rodrigues

Coorientador: Prof. Dr. Genilson Pereira Santana

MANAUS

2019

### Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

P436e Pereira, Michele Fernandes  
Estudo da disponibilidade de fósforo através dos extratores Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e Olsen com uso de fertilizantes em Argissolo e Latossolo da Amazônia Central / Michele Fernandes Pereira. 2019  
58 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Dr. Marco Antônio dos Santos Farias  
Coorientadora: Dr. Genilson Pereira Santana  
Coorientador: Dra. Maria do Rosário Lobato Rodrigues  
Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Fosfato. 2. Solos amazônicos. 3. fósforo disponível. 4. Extratores. 5. fósforo remanescente. I. Farias, Dr. Marco Antônio dos Santos II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

Disponibilidade de fósforo com e sem adição de fertilizantes em  
Argissolo e Latossolo da Amazônia Central

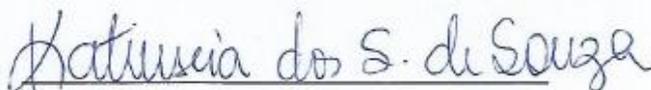
**MICHELE FERNANDES PEREIRA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Química,  
do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas como  
requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Química.

Aprovada em 16 de dezembro de 2019.



Prof. Dr. MÁRCO ANTONIO DOS SANTOS FARIAS  
Presidente/Orientador - DQ/UFAM



Profa. Dra. KATIUSCIA DO SANTOS DE SOUZA  
Membro Interno - DQ/UFAM



Prof. Dr. FRANCISCO ADILSON HARA  
Membro Externo - FCA/UFAM

Dedico este trabalho primeiramente a **Deus**, que me deu coragem para enfrentar esse desafio.

Aos meus pais (*em memória*),

**Maria José Fernandes da Costa e João Moreno  
Pereira,**

por todo amor e exemplo de batalha.

À minha filha,

**Fernanda Pereira Braga,**

Pela compreensão, carinho e força durante essa jornada.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pela força para enfrentar e vencer esse desafio;

Em memória aos meus pais, que em vida batalharam e venceram cada desafio pela família, principalmente minha mãe, Maria, que me oportunizou o estudo, para que eu seguisse caminhos que ela tanto sonhou;

A minha filha Fernanda, pela compreensão, paciência e força ao longo da realização do trabalho;

Ao Prof. Dr. Genilson Pereira Santana, um excelente e exemplar professor, pelo imenso apoio, incentivo, paciência e confiança.

Ao Prof. Dr. Marcos Farias, por aceitar ser meu orientador.

À Dra. Maria do Rosário Lobato Rodrigues, pelo apoio, ensinamento e força.

Aos colaboradores Emanuel dos Santos Alencar, Lucivaldo dos Santos Fernandes, Maria da Conceição L. Campelo e Simone Alves de Souza, pelo apoio na realização deste trabalho.

À Sra. Maria Perpétua Beleza Pereira, pela amizade e compreensão e, principalmente, pelo excelente trabalho de revisão

Ao José Francisco Aparecido Braga, pelo apoio incondicional.

À Dra. Karina Ferreira, minha oftalmologista, que cuida dos meus olhos como se fosse minha mãe, para vencermos o glaucoma.

Ao Bob, meu cachorrinho, companheiro nas madrugadas, em claro, de estudo.

Aos meus amigos, por compreenderem minha ausência;

À Embrapa e à Universidade Federal do Amazonas.

A todas as pessoas que torceram por mim durante a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

*“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez.”*

*Thomas Edison*

## RESUMO

A presença do fósforo em solo é geralmente exigida na avaliação de fertilidade do solo, e sua disponibilidade para as plantas é um limitante para as produções agrícolas. Encontrados em toda a Bacia Amazônica, o Argissolo e o Latossolo - são solos com baixa disponibilidade e quantidade de fósforo, por consequência é necessária a recomendação de uso de fertilizantes para o aumento da produção agrícola. O objetivo deste trabalho foi avaliar a disponibilidade de fósforo em Latossolo e Argissolo da região Amazônica, sem e com aplicação de doses de fontes de fosfato natural reativo e superfosfato triplo no período de 30 dias. As amostras foram coletadas nas profundidades de 0 cm – 20 cm e 20 cm – 40 cm de um Latossolo na trilha ecológica da Embrapa Amazônia Ocidental (Rodovia AM-010) e de um Argissolo no Campo Experimental do Caldeirão (Estrada Manoel Urbano - Iranduba). As amostras de solo foram secas e peneiradas em malha de 2 mm e a caracterização foi feita por análise de pH, matéria orgânica, Na, K, P, fósforo remanescente, Ca, Mg, Al, Fe, Zn, Mn, Cu, textura (areia, silte e argila) e mineralogia (difração de raios X) e avaliação da disponibilidade de fósforo pelos extratores Mehlich-1 (M1), Mehlich-3 (M3), Bray-1 (B) e Olsen (OL). Os resultados de fósforo disponível para o Latossolo foram de 1,00 mg L<sup>-1</sup> (0 cm – 20 cm e 20 cm – 40 cm) e para Argissolo, 2,00 mg L<sup>-1</sup> (0 cm–20 cm) e 1,00 mg L<sup>-1</sup> (20 cm – 40 cm). O Latossolo apresentou textura argilosa com teor de argila de 657,00 g kg<sup>-1</sup> (0 cm - 20 cm) e 657,50 g kg<sup>-1</sup> (20 cm – 40 cm); e o Argissolo, argilo-arenosa com teor de argila 351,50 g kg<sup>-1</sup> (0 cm–20 cm) e 409,50 g kg<sup>-1</sup> (20 cm–40 cm). Para o fósforo remanescente obtiveram-se para o Latossolo (0 cm - 20 cm) 16,73 mg L<sup>-1</sup> e 17,38 mg L<sup>-1</sup> (20 cm - 40 cm) e para o Argissolo (0 cm - 20 cm) 20,35 mg L<sup>-1</sup> e 15,62 mg L<sup>-1</sup> (20 cm - 40 cm). Os resultados observados corroboram a deficiência de fósforo disponível na região, por isso, é necessário conhecer mais o padrão de comportamento do fósforo nos Argissolos e Latossolos da Amazônia e identificar seu potencial de adsorção. Em relação à disponibilidade de P, os resultados mostram que em todos os experimentos, o Mehlich-1 (M1) foi a solução extratora que mais extrai fósforo tanto para o Latossolo como para o Argissolo utilizando o fertilizante Arad. Enquanto para o fertilizante SPT identificou-se que as soluções extratoras M1, M3 e B extraíram quantidades de P semelhantes e o OL apresentou valores mais baixos para os dois solos estudados. Contudo, é possível sugerir que fontes de P com menor solubilidade em água podem ser agronomicamente mais eficientes em solos altamente intemperizados e com altos teores de argila.

**Palavras-chave:** fosfato; solos amazônicos; fósforo disponível; extratores; P-rem; CMAP.

## ABSTRACT

The presence of phosphorus in soil is generally required for soil fertility assessment, and its availability to plants is a limiting factor for agricultural yields. Found throughout the Amazon basin, Argisol and Latosol, are soils with low availability and phosphorus, therefore, the recommendation of fertilizer use is necessary to increase agricultural production. The objective of this work was to evaluate phosphorus availability in Oxisol and Argisol in the Amazon region, with and without application of doses of reactive natural phosphate sources and triple superphosphate over a period of 30 days. Samples were collected at depths 0–20 and 20–40 cm from an Oxisol on the Embrapa Occidental Amazon Trail (AM 010 Highway) and from an Ultisol on the Caldeirão Experimental Field (Manoel Urbano - Iranduba Road). The soil samples were dried and sieved in 2 mm mesh and their characterization were made by pH analysis, organic matter, Na, K, P, remaining phosphorus, Ca, Mg, Al, Fe, Zn, Mn, Cu, texture. (sand, silt and clay) and mineralogy (X-ray diffraction) and evaluation of phosphorus availability by Mehlich-1 (M1), Mehlich-3 (M3), Bray-1 (B) and Olsen (OL) extractors. The available phosphorus results for Oxisol were 1,00 mg L<sup>-1</sup> (0 cm – 20 cm and 20 cm – 40 cm) and Argisol, 2,00 mg L<sup>-1</sup> (0 cm – 20 cm) and 1,00 mg L<sup>-1</sup> (20 cm – 40 cm). The Oxisol presented clay texture with a clay content of 657,00 g kg<sup>-1</sup> (0 cm – 20 cm) and 657,50 g kg<sup>-1</sup> (20 cm – 40 cm) and the clayey clay argisol 351,50 g kg<sup>-1</sup> (0 cm – 20 cm) and 409,50 g kg<sup>-1</sup> (20 cm – 40 cm). For the remaining phosphorus it was obtained for the Oxisol (0 cm – 20 cm) 16,73 mg L<sup>-1</sup> and 17,38 mg L<sup>-1</sup> (20 cm – 40 cm) and Argisol (0 cm – 20 cm) 20,35 mg L<sup>-1</sup> and 15,62 mg L<sup>-1</sup> (20 cm – 40 cm). The observed results corroborate the available phosphorus deficiency in the region; therefore, it is necessary a better knowledge of the phosphorus behavior pattern in the Argisols and Oxisols of the Amazon and to identify its adsorption potential. Regarding the availability of P, the results show that in all experiments, Mehlich-1 (M1) was the extracting solution that most extracts phosphorus for both Oxisol and Argisol using Arad fertilizer. While for SPT fertilizer, it was identified that the extraction solutions M1, M3 and B extracted similar amounts of P and the OL presented lower values for both studied soils. However, we can suggest that P sources with lower water solubility may be more agronomically efficient in highly weathered and high clay soils.

**Keywords:** phosphate; Amazonian soils; available phosphorus; extractors; P-rem; CMAP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de distribuição do fósforo .....	13
Figura 2: Perfis típicos de Argissolo e Latossolo existentes em Rio Preto da Eva, AM .....	16
Figura 3: Precipitação do fósforo de acordo com pH do solo.....	20
Figura 4: Mecanismo de adsorção de fosfato .....	21
Figura 5: Modelos clássicos de isotermas de adsorção.....	25
Figura 6: Difratoograma de raios X das amostras de Latossolo a 0 cm - 20 e 20 cm - 40 cm .....	37
Figura 7: Difratoograma de raios X das amostra de Argissolo a 0 cm - 20 e 20 cm - 40 cm .....	38
Figura 8: Latossolo e Argissolo (0 cm - 20 cm): adsorção de P <i>versus</i> fertilizante Arad .....	39
Figura 9: Latossolo e Argissolo (20 cm - 40 cm): adsorção de P <i>versus</i> fertilizante Arad .....	41
Figura 10: Latossolo e Argissolo (0 cm - 20 cm): adsorção de P <i>versus</i> fertilizante SPT .....	42
Figura 11: Latossolo e Argissolo (20 cm - 40 cm): adsorção de P <i>versus</i> fertilizante SPT .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultado de análise química do solo a 0 cm – 20 cm e 20 cm - 40 cm de profundidade .....	35
Tabela 2: Resultado de análise de granulometria ( $\text{g kg}^{-1}$ ) .....	36
Tabela 3: Resultado de análise de fósforo remanescente .....	37
Tabela 4: Faixa de extração de P em relação ao M1 - Fertilizante Arad (0 cm - 20 cm) .....	38
Tabela 5: Faixa de extração de P em relação ao M1 - Fertilizante Arad (20 cm - 40 cm) .....	40
Tabela 6: Faixa de extração de P em relação ao M1 - Fertilizante SPT (20 cm - 40 cm) .....	43
Tabela 7: Características dos fertilizantes fosfatados .....	45
Tabela 8: Parâmetros para equação de Langmuir em relação a adsorção de P .....	45
Tabela 9: Equações de isoterma de Langmuir, capacidade máxima de adsorção de P, energia de adsorção e fator de capacidade de P máximo para Argissolo e Latossolo .....	46
Tabela 10: Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) do solo, da fração areia e da fração areia lavada em amostras (0 cm - 20 cm) de solos do Ceará .....	46
Tabela 11: Equação de Langmuir, $R^2$ e capacidade máxima de adsorção de P em Latossolo (0 cm – 20 cm e 20 cm - 40 cm) .....	47
Tabela 12: Equações de Langmuir, capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), energia de adsorção e fator capacidade de fósforo máximo ( $\text{FCP}_{\text{máx}}$ ) para os solos estudados .....	48
Tabela 13: Coeficiente de variação das soluções extratoras .....	47

## LISTA DE SIGLAS

- a – Energia de adsorção de fósforo
- Al – Alumínio
- AM – Amazonas
- Ar – Argissolo
- B – Bray-1
- b – Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP)
- C – Fator capacidade
- Ca – Cálcio
- CNA – Citrato neutro de amônio
- CT – Capacidade tampão
- Ct – Caulinita
- Cu – Cobre
- CV – Coeficiente de variação
- DPS – Grau de saturação do fósforo
- DRX – Difração de raios X
- EDTA – Ácido diaminotretacético
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- $FCP_{max}$  – Fator de capacidade de fósforo máximo
- Fe – Ferro
- FN – Fosfato natural
- H + Al – Acidez potencial
- I – Fator intensidade
- IFAM/CMDI – Instituto Federal do Amazonas / Campus Manaus Distrito Industrial
- K – Potássio
- La – Latossolo
- LSCN – Laboratório de síntese e caracterização de nanomateriais
- m% – Saturação por alumínio
- M1 – Mehlich-1
- M3 – Mehlich-3
- Mg – Magnésio

Mn – Manganês

Na – Sódio

OL – Olsen

P – Fósforo

P<sub>i</sub> – Fósforo inorgânico

P<sub>o</sub> – Fósforo orgânico

P<sub>rem</sub> – Fósforo remanescente

P<sub>total</sub> – Fósforo total

P<sub>solução</sub> – Quantidade de fósforo na solução do solo

P<sub>sorvido</sub> – Quantidade de fósforo sorvido

Q – Fator quantidade

Q – Quartzo

S – Soma de bases

SPT – Superfosfato triplo

T – Capacidade de troca catiônica

TFSA – Terra fina seca ao ar

UV – Vis – Ultravioleta visível

V% – Saturação de bases

Zn – Zinco

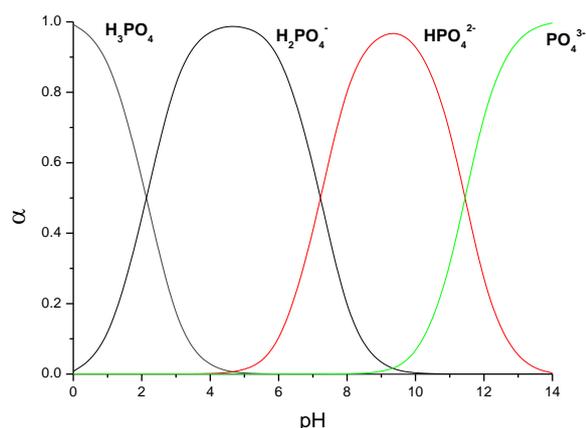
## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
CAPÍTULO I – A QUESTÃO DO FÓSFORO NOS LATOSSOLOS E ARGISSOLOS DO BRASIL – REVISÃO.....	17
1 Introdução.....	17
2 Disponibilidade de fósforo no solo.....	19
3 Estratégias para determinar a disponibilidade de fósforo no solo.....	21
CAPÍTULO II – EFEITO DO USO DE FÓSFORO EM LATOSSOLO E ARGISSOLO DA REGIÃO DE MANAUS.....	27
1 Introdução.....	27
2. Objetivos .....	29
2.1 Objetivo Geral .....	29
2.2. Objetivos Específicos .....	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	30
3.1 Local de instalação do experimento .....	30
3.2 Coleta e preparo das amostras.....	30
3.3 Análises física e química das amostras.....	31
3.4 Difração de raios X (DRX).....	32
3.5 Determinação de fósforo remanescente ( $P_{rem}$ ).....	32
3.6 Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP).....	32
3.7 Determinação da disponibilidade de fósforo usando os extratores M1, M3, B e OL .....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	34
4.1 Caracterização mineralógica, química e classificação textural.....	34
4.2 Estudo da disponibilidade de fósforo com os extratores.....	38
5 CONCLUSÕES.....	50
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

## 1 INTRODUÇÃO

O fósforo é um elemento essencial e insubstituível em todas as células vivas, tanto vegetais como animais. As plantas o absorvem em grandes quantidades da solução do solo como íons de ortofosfato, principalmente  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . Dependendo da classe de solo, a concentração de fósforo é muito pequena, tipicamente da ordem de  $10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$  (ROBERTS; JOHNSTON, 2015). Além disso, a quantidade de fósforo na maioria dos solos pode ser dividida em fósforo inorgânico ( $\text{P}_i$ ) e orgânico ( $\text{P}_o$ ) (ZHU; LI; WHELAN, 2018). Conseqüentemente, o fósforo total ( $\text{P}_{\text{total}}$ ) existente no solo é distribuído em incontáveis formas químicas e quantidade variáveis. Dependendo das condições físicas e químicas e da classe do solo, o ortofosfato pode ser mais ou menos disponível para as plantas (ZHU; LI; WHELAN, 2018).

Dentre as variáveis que determinam a disponibilidade de fósforo, o valor de pH da solução do solo exerce influência direta nas formas dos íons ortofosfatos ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ ). Em pH 4,0-5,0, a forma predominante é o íon  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ; com aumento do valor de pH, passa a prevalecer o íon  $\text{HPO}_4^{2-}$  e depois o íon  $\text{PO}_4^{3-}$  (Figura 1). Outro fator que interfere na disponibilidade do fósforo para as plantas são as reações abióticas e bióticas (ZHU; LI; WHELAN, 2018). Deve ser mencionado também a transformação de outras forma de  $\text{P}_i$  e  $\text{P}_o$  em ortofosfato e/ou outras formas de fósforo por mineralização microbiana. Por isso, a atividade microbiana é considerada uma fonte e/ou consumidora de ortofosfato no solo, sendo um fator crítico na disponibilidade do fósforo para as plantas.



**Figura 1:** Diagrama de distribuição do fósforo.

Particularmente na região Amazônica, onde os Latossolos e Argissolos constituem mais de 70% dos solos, com alta taxa de intemperização, baixa capacidade de troca catiônica principalmente de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ , altos teores de  $\text{Al}^{3+}$ , acidez elevada, baixa

disponibilidade de nutrientes, elevada saturação por  $\text{Al}^{3+}$  e deficiências de fósforo, a fertilização desempenha papel importante na eficiência da produção agrícola (SALDANHA et al., 2017). Como mais de 80% do fósforo aplicado como fertilizante pode ficar indisponível para a absorção de plantas logo após a sua aplicação, ficando retido no solo via sorção, precipitação (tipicamente por reação com  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  em solos ácidos e  $\text{Ca}^{2+}$  em calcário solos) ou imobilização microbiana, justifica-se um estudo sobre a disponibilidade do fósforo nos dois principais solos da região Amazônica (ROBERTS e JOHNSTON, 2015; ZHU; LI; WHELAN, 2018).

Withers et al. (2018) consideram uma grande expansão econômica e ambiental na agricultura brasileira o aumento da exigência de fertilizantes tendo como base o fósforo. Esse nutriente é muito usado na fertilização das culturas no Brasil; estima-se que foram aplicadas, aproximadamente, 45,7 milhões de toneladas de fósforo no Brasil até a década de 1970. Todavia, nem todo fósforo aplicado nas culturas é absorvido pela planta, devido à reação dos minerais de argila, em especial óxidos de ferro e alumínio, gerando alta capacidade de adsorção e baixa disponibilidade do nutriente (NOVAIS et al., 2007).

No cenário atual, as minas de rocha fosfáticas do Brasil fornecem apenas quantidades limitadas de fósforo, devido à baixa solubilidade das rochas ígneas e aos altos custos de processamento. A alta demanda por fertilizantes de fósforo e a forte dependência de importações tornam a agricultura brasileira vulnerável a futura escassez de fósforo. Essa afirmação fundamenta-se nas reservas globais de rochas fosfáticas, recursos naturais finitos e críticos (WITHERS et al., 2018).

Os fertilizantes fosfatados mais utilizados na produção de culturas agrícolas são aqueles solúveis em água, apesar de algumas limitações, como a necessidade de acidulação com enxofre (produto importado) e concentrados fosfáticos, como matéria-prima com alto teor de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e baixo conteúdo de impurezas. Por essa razão, é necessário estabelecer um uso racional desses fertilizantes na agricultura. Comumente recomenda-se a avaliação do comportamento de disponibilidade no solo como estratégia de otimização da produção agrícola em solos (LANA et al., 2004).

Por exemplo, Prado; Fernandes; Roque (2001) observaram que uma fertilização com o superfosfato triplo em doses crescentes aumenta a produção de grãos de milho em aproximadamente  $4,21 \text{ t ha}^{-1}$  em relação à testemunha em Latossolo vermelho na região do Triângulo Mineiro. Por outro lado, a ausência da fertilização fosfatada reduz a produtividade agrícola significativamente. Como exemplo, a literatura reporta o trabalho de Lana et al.

(2004), que mostraram ser a produção de alface diretamente relacionada à dosagem de superfosfato triplo.

Evidentemente, a relação entre produção agrícola e dosagem de fertilizante fosfatado depende da capacidade de adsorção dos solos. Deve ser mencionado que no solo o processo de adsorção se contrapõe à absorção de fósforo, principalmente pela ligação covalente. Como está ligado covalentemente, a quantidade solúvel de fósforo é reduzida e conseqüentemente a fertilidade do solo também reduz. Em termos gerais, a quantidade de sítios capazes de realizar ligações covalentes afeta a eficiência e o uso do fertilizante fosfatado (RAIJ, 1991; FONTES & WEED, 1996). Por causa disso, em solos como os Latossolos do Cerrado, que têm alta capacidade de fixação de fósforo, a demanda de fertilizantes fosfatados é grande. Sendo assim, o aumento da produtividade agrícola, nesse caso, exige altas quantidades do fertilizante como forma de aumentar a produção.

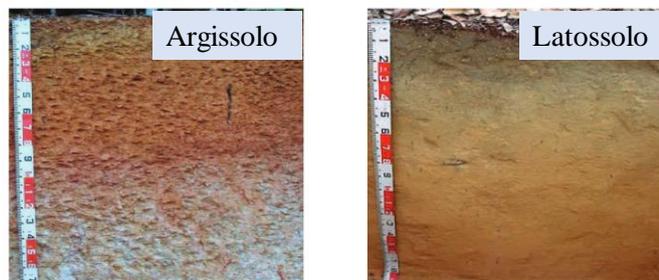
Estrategicamente é necessário o manejo adequado do fertilizante fosfatado, modo de aplicação, sistema de preparo do solo e das espécies de plantas para recuperá-lo depois do uso (SOUSA; LOBATO, 2003). Silva et al. (2008) observaram que o crescimento de mudas de sumaúma depende fundamentalmente da fertilização fosfatada. O mesmo efeito foi observado por Santos et al. (2008), que, em estudo sobre a produção de mudas de mogno com doses crescentes de fósforo em Latossolo, observaram que as doses crescentes promovem aumento no crescimento das mudas. Araújo et al. (2018), por sua vez, observaram que o crescimento de mudas de açazeiro em Argissolo é significativo com aplicação de doses crescentes de fertilizante fosfatado. Em outro estudo com Argissolo, desenvolvido por Lima; Franco; Schumacher (2008), é possível observar aumento na taxa de crescimento de plantas jovens de palmitreiro-Juçara. Além do aumento da taxa de crescimento, Neves et al. (2004) relatam que fertilizantes fosfatados em Argissolo proporcionaram um aumento da altura máxima e diâmetro do caule de mudas de andiroba.

Dependendo do tipo de fertilizante fosfatado, o Argissolo apresenta um tipo de resposta à produtividade agrícola. Em estudo envolvendo Argissolo e fertilizantes fosfatados (superfosfato triplo - SPT e fosfato natural - FN), Oliveira et al. (2014) observaram que o SPT foi mais eficiente em elevar o teor de P disponível do solo quando comparado ao FN. Enquanto Costa et al. (2014) verificaram que a cana-soca respondeu satisfatoriamente à adubação fosfatada de cobertura em Argissolos menos intemperizados de textura média.

Como pode ser notado, a fertilização fosfatada é fator primordial para o aumento da produtividade agrícola. Neste trabalho serão apresentados resultados da fertilização fosfatada em Latossolo e Argissolo, dois solos típicos da região Amazônica. Cerca de 80% dos solos

dessa região são classificados como Latossolos e Argissolos. Esses solos são caracterizados como muito intemperizados, ácidos, distróficos e de baixa fertilidade natural (BRASIL, 1994). Particularmente, no estado do Amazonas, os Argissolos representam 45% e os Latossolos 26% do solo da região. Ambos são usados para cultivar culturas anuais, perenes e pastagens (MOREIRA et al., 2008).

Os Argissolos são solos não hidromórficos, com classe de textura predominante média/argilosa e argilosa/muito argilosa, distróficos (menos de 50% do complexo de troca de cátions são saturados por bases trocáveis) e álicos (mais de 50% do complexo de troca de cátions são saturados pelo íon alumínio). Supridas as exigências de corretivos e fertilizantes para os cultivos, esses solos são os que apresentam melhores condições ao uso agrícola intensivo para o estado do Amazonas (MAIA e MARMOS, 2010). Os Latossolos, por sua vez, são solos não hidromórficos, fortemente ácidos, muito intemperizados, de baixa fertilidade natural e possuem elevados teores de alumínio trocável, teor de argila de média a alta, bem drenados e caráter distrófico, e também apresentam melhores condições de uso agrícola no estado do Amazonas (PIGNATARO NETO, 2008; EMBRAPA, 1999). A Figura mostra dois perfis de um Argissolo e um Latossolo existentes no município de Rio Preto da Eva, AM.



**Figura 2:** Perfis típicos de Argissolo e Latossolo existentes em Rio Preto da Eva, AM.  
Fonte: Maia e Marmos (2010).

Esta dissertação foi dividida em dois capítulos: o Capítulo I apresenta um referencial teórico sobre a questão da disponibilização do fósforo nos solos brasileiros, com ênfase no Latossolo e Argissolo, a influência do uso de fertilizantes fosfatados e seu comportamento e, para finalizar o capítulo, apresenta a capacidade de adsorção do fósforo no solo e avalia as soluções extratoras utilizadas para determinação desse elemento. O Capítulo II apresenta o efeito do uso de fósforo nos solos da região, tendo como objetivo principal estudar a adsorção de fósforo no Latossolo e Argissolo após o uso do superfosfato triplo (SPT) e o fosfato natural de Arad e avaliar a disponibilidade dele por meio de quatro soluções extratoras (Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e Olsen).

## CAPÍTULO I – A QUESTÃO DO FÓSFORO NOS LATOSSOLOS E ARGISSOLOS DO BRASIL – REVISÃO

### 1. Introdução

Dentre os nutrientes, o fósforo é o elemento que mais limita o crescimento das plantas em solos tropicais. Ele é absorvido pelo sistema radicular para compor os ácidos nucleicos e fosfolipídios das biomembranas, além de ser armazenado em forma de energia nos componentes metabólicos das plantas (GATIBONI, 2003). O fósforo é o macronutriente menos exigido pelas culturas em termos de quantidade, mas é de grande uso na fertilização das culturas no Brasil (OLIVEIRA et al., 2009). Sua carência é observada principalmente nos Latossolos, solos que tem coloides capazes de ligar e fixar as formas de fósforo disponíveis. A alta capacidade de fixação e baixa disponibilidade de fósforo nos solos exigem alta porcentagem de nutrientes fosfatados fornecidos na adubação. A princípio, altas doses de adubos fosfatados garantem quantidades razoáveis de fósforo disponível para serem absorvidos pelas plantas (NOVAIS et al., 2007).

O comportamento dos fertilizantes fosfatados é influenciado diretamente pelas propriedades físicas e químicas, como acidez do solo (NOVAIS e SMYTH, 1999). Por exemplo, em um estudo realizado por Lima; Franco; Schumacher (2008), sobre a adubação fosfatada em Argissolo Vermelho Distrófico Arênico (profundidade de 0 cm–20 cm), cujos valores de pH estão entre 3,8 e 4,8, após a adição de doses crescentes de fósforo (90; 180; 270; 360; 450; 540; e 630 mg dm<sup>-3</sup>), observou-se maior crescimento, aumento da biomassa aérea e total das plantas de palmitero em dosagem de 540 mg dm<sup>-3</sup> de fósforo.

Deve-se mencionar que a adubação fosfatada tem como um fator limitante a redução de sua eficiência com o tempo de cultivo. Esse fenômeno foi constatado pelos trabalhos de Rosa et al. (2018), ao avaliarem o comportamento de um Argissolo Vermelho Distrófico da região da Campanha Gaúcha, RS, em várias profundidades (10 cm a 40 cm). Esses autores observaram que, após 12 meses de aplicação de adubação fosfatada, ocorreu diminuição dos níveis de fósforo à medida que aumentava a profundidade. Por causa dessa característica, muitas vezes, são necessárias adições crescentes de fósforo durante o cultivo. Esse procedimento foi adotado por Araújo et al. (2018) quando começaram um cultivo de mudas de açaí com 2,69 mg dm<sup>-3</sup> de fósforo e observaram aumento significativo do crescimento à medida que a dose de adubo fosfatado aumentava até 600 mg dm<sup>-3</sup>.

Entretanto, qual a dose mínima a ser adicionada para melhorar os fatores de crescimento das plantas? Segundo Alvarez et al. (2000), o valor de fósforo disponível não deve

ser inferior a  $3,50 \text{ mg dm}^{-3}$ , correspondendo a uma disponibilidade de cerca de 13% (KHALEDIAN et al., 2018; TIECHER et al., 2018). Como prática recomenda-se uma adubação fosfatada, necessária para aumentar e manter a produtividade agrícola brasileira (FRAZÃO et al., 2019; FISCHER et al., 2018).

Os efeitos da fertilização são muito variados nos solos, sendo, portanto, necessária a realização de estudos comparando os vários fertilizantes. Oliveira et al. (2014) observaram um aumento de até 18 vezes no teor de fósforo disponível no Argissolo Vermelho quando aplicado o superfosfato triplo e aumento de 4,3 vezes quando aplicado o fosfato natural, em relação ao solo que não recebeu os fertilizantes. Rosa et al. (2018) observaram que níveis de fósforo sofrem redução quando esse elemento é utilizado em espécies florestais jovens, por exemplo, espécie de eucalipto, que exploram camadas mais superficiais, requerendo mais fósforo ao longo do tempo. Silva et al. (2018), utilizando o superfosfato triplo no Latossolo Vermelho, observaram um pequeno percentual de 7,54% com a dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  e de 13,18% com a dose de  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  de fósforo no solo. Merlin et al. (2013) também verificaram pequeno aumento do teor de fósforo quando utilizados o superfosfato triplo e o fosfato natural em uma profundidade de até 10 cm. Silva, Silva e Pereira (2011) verificaram que os teores de fósforo disponíveis no solo aumentaram linearmente com o aumento das doses de fósforo aplicado.

Santos et al. (2008) desenvolveram estudos em Latossolo Amarelo nas profundidades de 0 cm–20 cm, de textura muito argilosa, na Universidade Federal do Amazonas, com doses crescentes de adubação fosfatada utilizando superfosfato simples para produção de mudas de mogno e observaram que a adubação proporcionou aumento no crescimento das mudas em todas as características (altura das plantas, diâmetro do caule, matéria seca das raízes e parte aérea), com crescimento máximo alcançado na aplicação da dose máxima de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  (equivalente a 100 ppm) de fósforo.

Silva et al. (2008) conduziram um experimento em viveiro florestal em Manaus utilizando um Latossolo Amarelo Álico muito argiloso, com valor de fósforo disponível inicial de  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ , para produção de mudas de sumaúma com adição de dose de  $500 \text{ kg ha}^{-1}$  de superfosfato triplo e correção do solo com calcário e observaram uma resposta positiva em relação à adsorção de fósforo, isso ocorre em razão de maior hidrólise dos fosfatos de ferro e de alumínio, pois os torna mais solúveis devido ao aumento do pH.

Antônio et al. (2010) estudaram a eficiência de quatro fontes de fósforo na presença e ausência de calagem em Latossolo Amarelo Distrófico com textura argilosa na profundidade de 20 cm – 40 cm coletado na Universidade Federal do Amazonas, cujo valor de fósforo

disponível inicial foi de 2 mg kg<sup>-1</sup>. Após a adição dos fertilizantes fosfatados, os autores observaram que o fosfato natural reativo de Arad apresentou a maior eficiência na adsorção de nutrientes quanto ao crescimento da muda de mogno, sugerindo que a fonte de fósforo com menor solubilidade em água é mais eficiente em solos altamente intemperizados e com altos teores de argila, onde o comportamento das fontes de fósforo foi pouco influenciado pelo pH do solo.

Durante o estudo para avaliar a formação de mudas de araçá-boi sob o efeito da calagem e adubação fosfatada, Macedo e Teixeira (2012) observaram que as doses de calcário influenciaram significativamente em altura, diâmetro, matéria seca da parte aérea e das raízes, enquanto que as doses de fósforo, por meio do superfosfato triplo, influenciaram apenas no crescimento do diâmetro e na matéria seca da parte aérea em amostras de Latossolo Amarelo Distrófico muito argiloso coletado no Campo Experimental da Embrapa Amazônia Ocidental na profundidade de 0 cm–20 cm, com valor de fósforo disponível inicial de 2,0 mg dm<sup>-3</sup>.

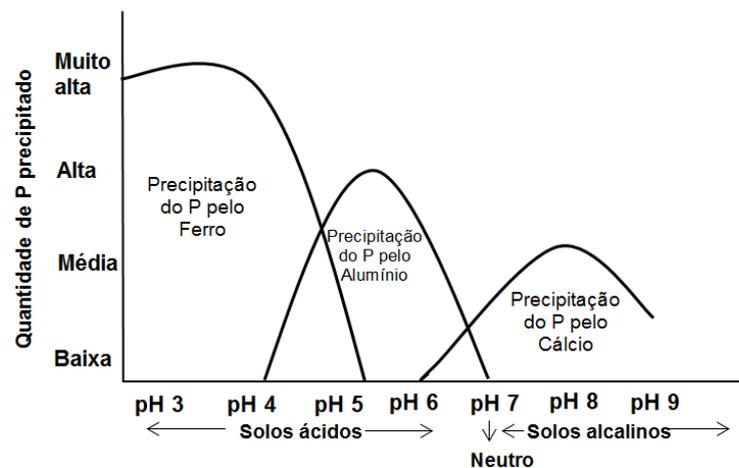
## **2. Disponibilidade de fósforo no solo**

O fósforo é encontrado em solos nas formas inorgânica (P<sub>i</sub>) e orgânica (P<sub>o</sub>). De acordo com o grau de estabilidade e/ou solubilidade, essas formas apresentam diferentes disponibilidades na solução do solo. Na solução do solo, o P<sub>i</sub> pode formar compostos inorgânicos insolúveis e/ou serem adsorvidos principalmente por óxidos de ferro e alumínio, minerais secundários encontrados comumente na fração argila. Deve ser mencionado que a sorção de fósforo no solo está diretamente correlacionada à fração argila (OLIVEIRA et al., 2014).

A capacidade de adsorção/dessorção de fósforo no solo está correlacionada substancialmente à quantidade e cristalinidade dos óxidos de ferro, particularmente hematita, goethita e maghemita, além de oxi-idroxi de alumínio (FINK et al., 2016). De modo geral, em solos com alto teor de alumínio e óxido de ferro, como os Latossolos e Argissolos da Amazônia, o fósforo é retido por diversos processos, entre eles a adsorção entre a parte ativa da superfície do solo e sua solução. Em solos ricos em carbonatos têm-se reações de precipitação e vários minerais Ca-fosfato, tornando o fósforo indisponível para plantas. P<sub>o</sub>, por sua vez, é formado por macromoléculas de carbono, como proteínas, ácidos húmicos, fúlvicos etc., cuja decomposição libera e forma sítios adsorventes de fósforo. Em sistemas naturais ou em solos com pouca ou nenhuma adição de fósforo, a disponibilidade desse elemento está diretamente relacionada às formas orgânicas (COSTA et al., 2016).

Em suma, conhecer a disponibilidade do fósforo natural e adicionado ao solo é essencial para a obtenção de um cultivo altamente eficiente, economicamente viável e sustentável nos solos tropicais brasileiros (TIECHER et al., 2018). Macedo; Teixeira (2012) verificaram que o aumento do pH em solos ácidos eleva a disponibilidade de fósforo, uma vez que as cargas negativas da superfície dos coloides do solo acarretam maior repulsão (menor adsorção) entre o fosfato e a superfície adsorvente, reduzindo assim a capacidade máxima de adsorção do fósforo.

Esse processo ocorre devido à precipitação que acontece quando o produto de solubilidade do fosfato ultrapassa as combinações dos cátions metálicos, cuja reação é lenta e na qual os ânions fosfato reagem com os cátions dissolvidos gerando compostos insolúveis na forma de hidróxido de fosfato precipitado, cuja reação depende do pH, pois em meio ácido a precipitação do fosfato ocorre com os compostos de alumínio e ferro e em meio alcalino, com os compostos de cálcio, conforme Figura 3 (QUISPE, 2004; SOUZA et al., 1991).

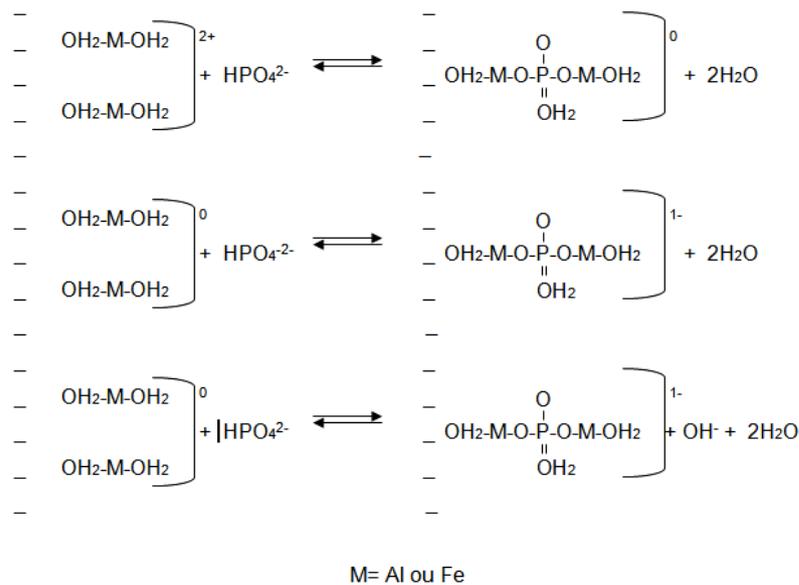


**Figura 3:** Precipitação do fósforo de acordo com pH do solo.

Fonte: Adaptado de Lopes (1989).

A reação de adsorção envolvendo o fósforo ocorre em concentrações de fosfato muito baixas na solução do solo, composto por uma fase rápida e outra lenta, ou seja, na superfície dos coloides presente no mineral do solo, por ligações eletrostáticas ou covalentes dos ânions fosfato com esses coloides, formando compostos insolúveis que resultam na indisponibilidade do fosfato para as plantas (NOVAIS e SMYTH, 1999). A interação dos grupos funcionais dos coloides com o ânion fosfato resulta em um complexo que pode acontecer de duas formas: adsorção não específica (complexo de esfera externa) e adsorção específica (complexo de esfera interna) (SPOSITO, 1989; SPARKS, 1995).

Novais e Smyth (1999) explicam que o fósforo é adsorvido na fase sólida por meio da adsorção específica, cujas forças presentes são superiores, dificultando a dessorção do ânion fosfato e tornando a adsorção específica praticamente irreversível. Os complexos da esfera interna são formados por meio de ligações covalentes das formas iônicas do fosfato, das quais são removidos os grupamentos OH<sup>-</sup> da superfície do coloide e formando ligações de coordenação simples com o Fe e/ou Al presente nas superfícies dos óxidos de Fe ou Al, conforme descreve a Figura 4 (ATKINSON, et al., 1974; HINGSTON, 1972).



**Figura 4:** Mecanismo de adsorção de fosfato.

Fonte: Adaptado de Cornforth (2015).

### 3. Estratégias para determinar a disponibilidade de fósforo no solo

Silva e Rajj (1999) observaram que a análise do solo é o principal veículo de transferência de informações geradas pela pesquisa sobre adubação de culturas aos produtores, nas quais ocorrem recomendações de quantidades de adubo adequadas para aplicação, como a qualidade da diagnose do grau de deficiência de determinado elemento no solo. Sabe-se que, no caso do fósforo, a situação é bastante complexa pelo fato de existir grande variedade de métodos de extração do elemento, gerando uma falta de concordância sobre qual método é mais recomendado. Contudo, pesquisas mostraram que o teor de fósforo em solos não é um bom indicador da disponibilidade do elemento para as plantas e partiram em busca de extratores que melhor simulassem a ação das raízes das plantas.

Então, Novais e Smith (1999) concluíram que embora os teores totais de fósforo no solo sejam altos em relação à necessidade das plantas, apenas uma pequena fração deste tem baixa energia de ligação que possibilita sua dessorção e disponibilidade às plantas, pois essa fração que está ligada aos coloides com baixa energia é conhecida como fator quantidade (Q) e está em equilíbrio com o fósforo na solução do solo, fator intensidade (I), de onde as plantas o absorvem, sendo a taxa de reposição do I pelo Q conhecida como fator capacidade (C) ou poder tampão.

O fósforo disponível no solo para a planta é avaliado com uso de soluções extratoras com características e princípios de extração diversos (acidez, diluição, tamponamento, presença de compostos complexantes). Portanto, cada metodologia extrai diferentes quantidades de fósforo de acordo com o extrator utilizado, pois os métodos não precisam extrair todo o fator Q do solo, desde que seja mantida a proporcionalidade da fração extraída em diferentes tipos de solo e estoques de fósforo (NOVAIS e SMITH, 1999).

O fósforo disponível pode ser determinado por diferentes processos cujo princípio é a utilização de soluções extratoras ácidas, alcalinas, sais, quelantes ou misturas desses e a resina de troca aniônica, de preparação rápida, de baixo custo e bem correlacionados com fósforo absorvido pelas plantas (FIXEN e GROVE, 1990; SILVA; RAIJ, 1999; HOSSEINPUR; GHANEE, 2006). Esses métodos têm o propósito de estimar a quantidade de fósforo presente na solução, como precipitado e/ou adsorvido com fraca energia de interação aos coloides do solo (RAIJ, 1991). O estudo de diferentes extratores químicos e sua ação na disponibilidade de fósforo no solo é essencial para entender o comportamento desse elemento no ambiente, principalmente as formas que são absorvidas pelas plantas.

A disponibilidade de fósforo nos solos brasileiros é comumente avaliada com a solução extratora Mehlich-1 (TEIXEIRA et al., 2017), embora existam outras soluções extratoras como Bray-1 (B), Mehlich-3 (M3), Olsen, entre outras.

Tradicionalmente, os primeiros extratores de fósforo são soluções diluídas de ácidos fortes como HCl, HNO<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, em baixas concentrações. O HCl e HNO<sub>3</sub> causam leve efeito restritivo, pertinente aos ânions nitratos e cloretos por serem menos eficientes no processo de redissolução de fósforo em solução a fase sólida.

O método M1, metodologia da Carolina do Norte, é empregado para extrair uma fração solúvel, em meio ácido fraco, do fósforo presente no solo, na qual a solução extratora é preparada pela mistura de ácidos H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,0125 mol L<sup>-1</sup>) e HCl (0,05 mol L<sup>-1</sup>), usado para extrair P, K, Na, Zn, Cu, Fe, Mn, entre outros (MEHLICH, 1953).

No caso do fósforo, a utilização do M1 serve para solubilizar os compostos de fósforo presentes no solo reduzindo o valor de pH para uma faixa entre 1,0 e 3,0. Sabe-se que o íon cloreto é o responsável por limitar a redissolução do fósforo extraído às superfícies de cargas positivas dos minerais de argila (SILVA e RAIJ, 1999). Todavia, a sua baixa capacidade de extração de fósforo em solos argilosos e a ação dissolutiva do ácido sobre formas de fósforo de baixa solubilidade superestimam os teores de fósforo disponíveis. Na literatura existe uma variedade muito grande de resultados que comprovam essa afirmação. Por exemplo, Souza et al. (2011) observaram maior teor de fósforo disponível extraído pelo extrator M1 contido em Latossolo quando aplicado fosfato natural reativo. Em solos florestais classificados como Latossolo e Argissolo, Lima et al. (2018) verificaram que teores de fósforo disponíveis, utilizando o M1 como extrator nas camadas dos solos, não ultrapassaram o valor de  $3,50 \text{ mg dm}^{-3}$ , considerados valores baixos.

Embora seja a metodologia mais utilizada, a literatura indica que o extrator M1 não é muito prescrito na extração de fósforo, principalmente em solos com altos teores de Ca. A causa para esse fato é que P ligado ao Ca é mais solubilizado pelos extratos do M1 do que os P ligados ao Al e Fe (BARBOSA FILHO et al., 1987). Portanto, isso pode superestimar os valores de fósforo extraídos por extratores ácidos.

Por causa da baixa especificidade, vários autores recomendam o uso de outras soluções extratoras. Brasil e Muraoka (1997), com o objetivo de avaliarem a disponibilidade de fósforo em amostras de solos representativos da Amazônia, em Latossolo e Argissolo submetidos a várias fontes de fósforo, como superfosfato triplo e fosfato natural, em culturas de caupi e arroz, observaram que o extrator M1 extraiu grandes quantidades de fósforo nos tratamentos com fosfato natural, mas o extrator M3 demonstrou melhor correlação com o caupi e o arroz.

Em vista disso, um novo método foi desenvolvido, o M3, que é composto por  $\text{CH}_3\text{COOH}$   $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ ;  $\text{NH}_4\text{NO}_3$   $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ ;  $\text{NH}_4\text{F}$   $0,015 \text{ mol L}^{-1}$ ;  $\text{HNO}_3$   $0,013 \text{ mol L}^{-1}$  e EDTA  $0,001 \text{ mol L}^{-1}$  (MEHLICH, 1984). Nessa versão, ocorre a adição de EDTA para imobilizar micronutrientes por complexação.

Rogeri et al. (2017) observaram níveis mais elevados de fósforo, em torno de 20%, quando utilizaram o extrator M3 em relação ao M1 em Latossolo e Argissolo submetidos a diferentes doses de fósforo. Também verificaram que, para solos com maior teor de Argila ( $600 \text{ g kg}^{-1}$ ), o M3 extrai 20% menos fósforo do que M1, mas em solos com teor de argila maior que  $200 \text{ g kg}^{-1}$  Mehlich-1 mostrou-se mais eficaz, mesmo a maioria da literatura relatando que M3 extrai mais fósforo do que M1.

No entanto, alguns estudos verificaram uma superestimação entre os métodos. Oliveira et al. (2015) observaram, em um Cambissolo com teor de argila de  $250 \text{ g kg}^{-1}$ , submetido a duas fontes de fósforo (superfosfato triplo e fosfato natural de Arad), que o extrator M1 extraiu mais fósforo em relação ao extrator M3 quando aplicado o fosfato natural de Arad, e não houve diferença significativa utilizando o superfosfato triplo.

Bray e Kurtz (1945) estudaram o método conhecido como B para a determinação de fósforo em solos, constituído por  $\text{HCl } 0,025 \text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{NH}_4\text{F } 0,03 \text{ mol L}^{-1}$ . Nesse extrator, o íon fluoreto forma um complexo forte com íon alumínio, com isso libera o fósforo ligado ao metal. Também ocorre a precipitação do fluoreto de cálcio formado pela liberação do mesmo presente no solo como  $\text{P}_{\text{Ca}}$  e liberando o fósforo (KAMPRATH; WATSON, 1980).

O método desenvolvido por Olsen et al. (1954) trabalha com um valor de pH básico, aproximadamente 8,5, cujo princípio é a liberação do P ligado ao Al e Fe pelo aumento do valor de pH. Mas essa determinação é indicada para fósforo presente em solos calcáreos, em que o íon carbonato substitui o fósforo adsorvido no solo e diminui a atividade do íon cálcio na solução do solo pela precipitação.

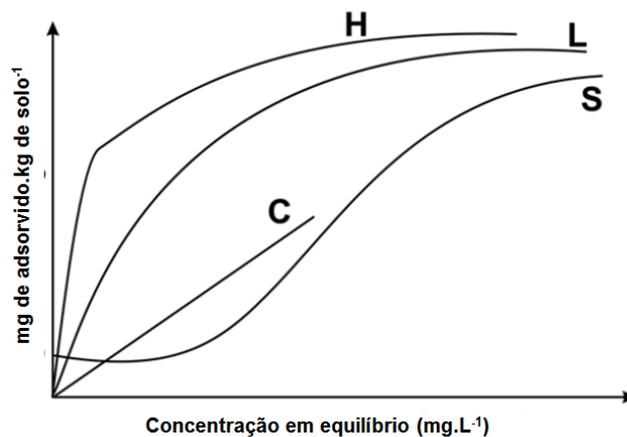
Com isso, estudo de Souza et al. (2011) demonstrou maiores teores de fósforo disponíveis quando utilizado o extrator M1 em Latossolo com aplicação de fosfato natural reativo, enquanto para fosfato natural de baixa reatividade os valores não diferiram. Corrêa et al. (2008) observaram que são igualmente eficientes na disponibilidade de fósforo em Latossolo e Argissolo adubados com superfosfato triplo, utilizando quatro extratores (M1, M3, OL e B). Portanto, verifica-se que existem poucos estudos com solos da região Amazônica com relação a diferentes tipos de extratores para avaliar o teor de fósforo com os fertilizantes mais empregados na agricultura, por essa razão é necessário estudar seu comportamento nos solos mais predominantes no Amazonas.

Alvarez et al. (2000) estudaram que o P-remanescente é a concentração de fósforo na solução de equilíbrio com agitação até 24 horas do solo com a solução extratora de  $\text{CaCl}_2 \text{ } 0,001 \text{ mol L}^{-1}$  a uma concentração conhecida de  $60 \text{ mg L}^{-1}$  P. Sabe-se que os valores obtidos apresentam estreita correlação com a capacidade tampão (CT) e com a capacidade máxima de adsorção de fosfatos (CMAP). Portanto, a interpretação das análises de solos e recomendações de adubação é estimada pela capacidade tampão pelo P-remanescente.

O estudo da quantificação da fixação de fosfato do solo é feito por adsorção mediante isotermas de adsorção entre o fósforo da solução e o fósforo na fase sólida, cujo objetivo é descrever matematicamente a quantidade de fósforo adsorvida em uma fase sólida em relação à concentração de fósforo em uma solução de equilíbrio.

Abboud et al. (2018) utilizaram a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) do solo estimado pela isoterma de adsorção de Langmuir para determinar o grau de saturação do fósforo (DPS). As isotermas de adsorção de fósforo também refletem as propriedades físico-químicas dos solos por meio de seus parâmetros (CMAP e energia de ligação), que são fundamentais na determinação do potencial de mobilidade de fósforo do solo. Sabe-se que a adsorção de fósforo nos solos é fortemente afetada pela textura, por isso os solos arenosos apresentam menor CMAP quando comparados aos solos argilosos (OLIVEIRA et al., 2014; VALLADARES; PEREIRA, 2003).

Giles et al. (1960) dividiram o sistema de classificação de isotermas para adsorção das soluções em quatro categorias, conforme Figura 5.



**Figura 5:** Modelos clássicos de isotermas de adsorção.

Fonte: GILES et al. (1960).

A isoterma Tipo H é caracterizada pela alta afinidade do adsorvente com o soluto; já o Tipo C demonstra que o soluto é adsorvido mais rápido que o solvente; e no Tipo S verifica-se que uma afinidade relativa entre o adsorvente e o soluto em baixas concentrações é menor que a afinidade entre adsorvente e solvente; enquanto o Tipo L indica alta afinidade relativa do adsorvente pelo soluto em baixas concentrações e a diminuição da superfície livre do adsorvente, e, observa-se que é a curva que melhor representa as características de adsorção dos materiais geológicos em condições naturais (SPARKS, 2001; GILES et al., 1960).

Sabe-se que a adsorção de fósforo pode ser adquirida pela CMAP e a constante relacionada à energia de ligação do elemento no solo e pela construção de isotermas de adsorção de fósforo e a aplicação dos resultados em equações semelhantes à desenvolvida por Langmuir (Sparks,1995) demonstrada a seguir:

$$P_{\text{SORVIDO}} = (a * b * P_{\text{SOLUÇÃO}}) / (1 + a * P_{\text{SOLUÇÃO}})$$

Em que:

$P_{\text{SORVIDO}}$  = quantidade de fósforo sorvido, em mg kg<sup>-1</sup>;

$P_{\text{SOLUÇÃO}}$  = quantidade de fósforo na solução do solo, em mg L<sup>-1</sup>;

$a$  = constante relacionada a energia de adsorção de P pelo solo;

$b$  = capacidade máxima de adsorção de P, em mg kg<sup>-1</sup>.

Harter e Baker (1977) verificaram em seus estudos que a isoterma de Langmuir é eficiente para compreender o fenômeno de adsorção do solo, particularmente em estudo comparativo de vários solos correlacionando a capacidade máxima de adsorção de fósforo com as características químicas, físicas e mineralógicas.

Sousa et al. (2004) observaram que, em solos de várzea com diferentes origens e graus de intemperismo para cultivo de arroz, no Rio Grande do Sul, o uso da isoterma de Langmuir foi fundamental para entender o comportamento da adsorção de fósforo e o fornecimento desse elemento para a cultura do arroz, pois solos mais intemperizados poderão apresentar um caráter de drenagem do fósforo adicionado como fertilizante, enquanto solos menos intemperizados, como os solos aluviais, provavelmente serão fonte de fósforo por apresentarem características (reservas) favoráveis à planta, mesmo que insatisfatórias para altas produtividades.

Em suma, conhecer a dinâmica do fósforo natural e adicionado ao solo é essencial para a obtenção de um cultivo altamente eficiente, economicamente viável e sustentável nos solos tropicais brasileiros (TIECHER et al., 2018).

## CAPÍTULO II – EFEITO DO USO DE FÓSFORO EM LATOSSOLO E ARGISSOLO DA REGIÃO DE MANAUS

### 1. Introdução

Os solos da região Amazônica são ácidos e com baixa disponibilidade de nutrientes, principalmente o fósforo. Além disso, existe uma busca crescente para melhorar as práticas e tecnologias sustentáveis no uso econômico e ambientalmente sustentável do fósforo, principalmente na agricultura, que é responsável pelo uso de 95% desse elemento. Daí a necessidade do estudo visando buscar um uso eficiente dos fertilizantes fosfatados (fonte e dose).

A eficiência pode ser definida como o acréscimo da quantidade de biomassa ou produto de interesse econômico (grãos, frutas, etc.) gerada por unidade de fósforo absorvido (BALIGAR et al., 2001; VENEKLAAS et al., 2012). Segundo Chien et al. (2011), os fertilizantes fosfatados aplicados no solo tem seu aproveitamento baixo pelas plantas, em torno de 10%–20%. Nota-se que a ideia é buscar altas produções em um solo com baixa aplicação de fertilizantes fosfatados (NOVAIS e SMITH, 1999).

Segundo Reddy et al. (2005), a reação de adsorção ocorre espontaneamente no solo logo após a adição de P, cujo processo é reversível e leva algum tempo para atingir o equilíbrio, o que é importante para manter a reposição do P no solo. No caso do Latossolo, que é muito intemperizado, ocorre a adsorção de mais de 2 mg g<sup>-1</sup> de P, o que corresponde, na camada de 0 cm–20 cm, a 4.000 Kg ha<sup>-1</sup> de P ou 9.200 Kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (FARIAS et al., 2009; ROLIM NETO et al., 2004). Por isso, em apenas um mês de contato do fósforo com o solo, acredita-se que metade desse valor poderá estar na forma de P não lábil (NOVAIS e SMYTH, 1999).

A reposição no solo acontece pelos fatores quantidade (Q) e intensidade (I), sendo a intensidade do movimento do P sorvido ao solo (Q) para o P em solução (I) determinada pelo fator capacidade de P (FCP), que é definido pelo equilíbrio ou ligação entre a variação de quantidade e intensidade (Q/I). O FCP correlaciona a capacidade de cada solo repor o P<sub>solução</sub> e, de maneira geral, é maior nos solos com maior CMAP (GUILHERME et al., 2000; BROGGI et al., 2011).

Os maiores valores de CMAP relacionam-se aos maiores valores de FCP, sendo influenciados pela Eficiência Agronômica (EA), a qual pode interferir na velocidade com que o P é liberado do solo para a solução, uma vez que se relaciona à força com que a sorção ocorre (PINTO, 2012). O procedimento para avaliar a CMAP utiliza soluções com concentrações

crescentes de P que permitem quantificar o teor desse nutriente no sobrenadante, após determinado período de agitação, possibilitando o ajuste dos dados à isoterma de Langmuir (OLSEN; WATANABE, 1957).

Diversas características do solo podem determinar o processo de adsorção de fósforo, dentre os principais destacam-se o tipo e teor de argila, de coloides amorfos e de matéria orgânica (NOVAIS; SMYTH, 1999). Pesquisas têm relacionado a capacidade de adsorção de P dos solos ao teor de argila e superfície específica, demonstrando que para solos com mesma mineralogia o mais afetado pelo fenômeno de sorção de P será o solo com maior teor de argila (BAHIA FILHO et al., 1983). Em relação à influência da mineralogia, Motta et al. (2002) concluíram que a adsorção e as formas de P ligadas mais fortemente a Al e Fe aumentaram conforme o caráter oxídico dos solos.

As soluções extratoras são utilizadas para determinar a quantidade de fósforo presente no solo e com isso, reduzir o uso de fertilizantes fosfatados. O Mehlich-1 (M1) é o extrator mais citado na literatura (MEHLICH, 1953), não sendo recomendado para ser usado em solos com altos teores de cálcio (LARSEN, 1967; OLSEN e KHASAWNEH, 1980). O Mehlich-3 (M3) é um extrator multielementar, que utiliza o EDTA para imobilizar os micronutrientes por complexação (MEHLICH, 1984). Por sua vez, o método de Bray-1 (B), proposto por Bray e Kurtz (1945), também é utilizado para extrair o fósforo do solo. Os íons fluoretos formam um complexo forte com íons alumínio, liberando, assim, o fósforo ligado a íons metálicos. O fósforo presente no solo na forma de fósforo ligado ao cálcio também é extraído, com a precipitação de fluoreto de cálcio (KAMPRATH e WATSON, 1980). Já o método desenvolvido por Olsen et al. (1954) é baseado em um valor de pH básico (~8,5). O princípio desse método é a liberação de fósforo ligado ao alumínio e cálcio e fósforo orgânico pela elevação do valor de pH. Esse método é indicado para determinação de fósforo em solos calcários. Neste caso, o íon carbonato atua substituindo o fósforo adsorvido no solo, além de reduzir a atividade do íon cálcio da solução do solo.

Portanto, pretende-se estudar o efeito do uso de superfosfato triplo e fosfato natural de Arad em Argissolo e Latossolo do estado Amazonas a fim de estabelecer sua disponibilidade para as plantas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Estudar a eficiência das soluções extratoras de fósforo em Argissolo e Latossolo fertilizados com superfosfato triplo (SPT) e Arad.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Comparar os solos Latossolo e Argissolo em relação à adsorção das formas de fósforo nas profundidades de 0 cm–20 e 20 cm–40 cm;
- Avaliar o comportamento de adsorção do fósforo aplicado via fertilizante Arad e SPT nos dois solos;
- Avaliar a eficiência das quatro soluções extratoras Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-1 e Olsen.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Local de instalação do experimento**

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Análises de Solo e Planta (LASP), na Sede da Embrapa Amazônia Ocidental, localizada na Rodovia AM-010, Km 30, município de Manaus, AM, nas coordenadas 02° 53' 25" de latitude sul e a 59° 58' 06" de longitude a oeste de Greenwich e altitude de 100 m. O clima da região, segundo a classificação internacional de Köppen, é do tipo Af (VIANELLO e ALVES, 2002) com temperatura média anual em torno de 25,5 °C, umidade relativa média de 80% e precipitação média anual de aproximadamente 3.218,1mm, conforme dados do Laboratório de Agroclimatologia da Embrapa Amazônia Ocidental (2018).

#### **3.2 Coleta e preparo das amostras**

Para a realização do experimento foram utilizadas duas classes de solo predominantes na Amazônia: Latossolo (La) e Argissolo (Ar). As amostras de solos foram coletadas nas profundidades de 0 cm a 20 cm e de 20 cm a 40 cm entre os meses de setembro e novembro de 2018, segundo procedimentos recomendados pela Embrapa (1999). A coleta foi feita em zigue-zague, com a retirada de 15 amostras simples nas profundidades para formar uma amostra composta de cada profundidade, no total de 50 kg cada, com auxílio de uma pá. O Latossolo foi coletado na Trilha Ecológica da Embrapa Amazônia Ocidental, localizada no Km 29 da Rodovia AM-010, no município de Manaus, AM, nas coordenadas 03° 08' 48" de latitude sul e a 60° 11' 06" de longitude a oeste de Greenwich e altitude de 100 m com área total de 1,5 km de floresta nativa. O Argissolo foi coletado em área de capoeira do Campo Experimental do Caldeirão, localizado no Km 13 da Rodovia AM-240, no município de Iranduba, AM, nas coordenadas 03° 15' 13" de latitude sul e a 60° 13' 36" de longitude a oeste e altitude de 51 m com área de 2,0 km de capoeira.

As amostras de cada ponto de coleta foram homogeneizadas, secas em secador solar por aproximadamente cinco dias, destorroadas manualmente com auxílio de um rolo de madeira e separadas granulometricamente usando peneiras de 2,0 mm de malha (TFSA). As frações maiores que 2,0 mm foram desprezadas, e as menores, utilizadas para as análises de caracterização física, química e experimentos de extração.

### 3.3 Análises física e química das amostras

Análises químicas e granulométricas foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo e Planta da Embrapa Amazônia Ocidental segundo recomendação de Teixeira et al., (2017). Foram realizadas as seguintes determinações:

1. pH em H<sub>2</sub>O, KCl (1 mol L<sup>-1</sup>) e CaCl<sub>2</sub> (0,01 mol L<sup>-1</sup>) – Método potenciométrico: medida de atividade de hidrogênio (H<sup>+</sup>) com eletrodo combinado de vidro e referência, na suspensão do solo: solução de 1: 2,5.
2. Matéria Orgânica pelo método Walkley- Black: o carbono da matéria orgânica da amostra é oxidado a CO<sub>2</sub> e o cromo (Cr) da solução extratora é reduzido da valência (Cr<sup>6+</sup>) à valência (Cr<sup>3+</sup>).
3. Acidez potencial (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>): obtida pela solução tamponada de acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> em pH 7,0;
4. Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>: extração dos teores disponível nas amostras do solo pela solução de KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e determinados por espectrometria de absorção atômica;
5. Al<sup>3+</sup>: a extração realizada com solução KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> (sal neutro) e quantificado pelo emprego da solução de NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>;
6. P - Método Mehlich-1: a extração realizada pela solução extratora Mehlich-1 (duplo ácido, constituída por HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup>) e determinado por espectrometria UV pelo complexo fosfomolibdico produzido pela redução do molibdato com ácido ascórbico;
7. K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> e Zn<sup>2+</sup> trocável foram extraídos pelo Mehlich-1 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup> + HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup>), sendo que a leitura das quantidades de K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> foram feitas no fotômetro de chama, enquanto que o Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> e Zn<sup>2+</sup> por espectrometria de absorção atômica de chama

Os resultados das análises anteriores foram utilizados para calcular os seguintes índices: soma de bases (S) = Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> + Na<sup>+</sup>; capacidade de troca catiônica (T) = S + Al<sup>3+</sup> + H; saturação por bases (V %) = 100 S/T; saturação por alumínio (m %) = 100 Al<sup>3+</sup>/S + Al<sup>3+</sup>, conforme Embrapa (1997).

Na caracterização física das amostras de solo para a classificação textural foi utilizado o método da pipeta, separando as frações argila, silte, areia grossa, areia fina e areia total, conforme recomendação EMBRAPA (1999).

### 3.4 Difração de raios X (DRX)

As amostras de TFSA e nas frações argilas foram reduzidas a frações < 0,053 mm sendo, então, submetidas à difração de raios X. Essa análise foi realizada no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN) do Instituto Federal do Amazonas – Campus Manaus Distrito Industrial (IFAM-CMDI), no DRX, modelo BRUKER D2 Phaser diffractometer (Bruker AXS, Karlsruhe, Germany), equipado com fenda de 0,6 mm, faca de 3 mm, tubo de radiação de Cu ( $k\alpha = 0,15406$  nm, 30 kV, 10 mA), passo de 0,02, com intensidades registradas por 1 s em cada passo.

### 3.5 Determinação de fósforo remanescente ( $P_{rem}$ )

Na análise do fósforo remanescente ( $P_{rem}$ ), a metodologia utilizada foi descrita por Alvarez V. et al. (2000). Para isso, 5 g de TFSA foram adicionados em 50 mL de solução extratora preparada com  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol  $\text{L}^{-1}$  e 60 mg  $\text{L}^{-1}$  de P. A mistura contendo amostras de solo, em triplicata, e solução extratora foi agitada por 5 minutos em mesa agitadora e colocada em repouso por 16 horas.

A solução de trabalho foi obtida pela mistura de 50 mL da solução ácida de molibdato (constituída da mistura 1,0 g de subcarbonato de bismuto, 139,0 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 20 g de molibdato de amônio para 1,0 L de  $\text{H}_2\text{O}$ ) e 0,4 g de ácido ascórbico para um balão de 250 mL e ajustado o volume com água destilada, sendo preparado horas antes da determinação de fósforo.

A determinação do fósforo no sobrenadante foi realizada pela adição de 0,2 mL do sobrenadante, 4,8 mL de solução de  $\text{CaCl}_2$  0,010 mol  $\text{L}^{-1}$ , 5,0 mL da solução de trabalho. A curva de calibração foi feita com as soluções padrões nas concentrações 0,0 mg  $\text{L}^{-1}$ ; 0,2 mg  $\text{L}^{-1}$ ; 0,4 mg  $\text{L}^{-1}$ ; 0,6 mg  $\text{L}^{-1}$ ; 0,8 mg  $\text{L}^{-1}$  e 1,0 mg  $\text{L}^{-1}$  de fósforo na forma de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . As mesmas proporções usadas para determinação das amostras de fósforo foram mantidas no preparo dos padrões. As leituras das amostras foram feitas em espectrofotômetro (modelo Genesys 1 OS UV-Vis - Thermo Scientific), no comprimento de onda de 725 nm (TEIXEIRA et al., 2017).

### 3.6 Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP)

A capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) foi calculada com base no teor de  $P_{rem}$  (ALVAREZ V. et al., 2000). Para isso, mantendo a concentração de P em 2,5 mg  $\text{L}^{-1}$ , variando o peso em 2,5; 5,0; 7,5, e 10,0 g de TFSA e variando o volume 25 mL, 50 mL, 75 mL

e 100 mL de solução contendo  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  com dose  $2,5 \text{ mg L}^{-1}$  de P. Após 24 horas de agitação, o fósforo na solução de equilíbrio (C) será quantificado por colorimetria (TEIXEIRA et al., 2017).

A isoterma de adsorção foi ajustada de acordo com as concentrações de P adsorvido em função das concentrações de P em equilíbrio na solução.

### **3.7 Determinação da disponibilidade de fósforo usando os extratores Mehlich 1, Mehlich 3, Bray 1 e Olsen**

O experimento foi realizado em dois solos (Latosolo e Argissolo), duas profundidades (0 cm–20 cm e 20 cm–40 cm), duas fontes de fósforo (Arad e superfosfato triplo – SPT) e com cinco doses de fósforo com três repetições. O ensaio de avaliação dos fertilizantes fosfatados compreendeu os tratamentos com testemunha, caracterizada pela ausência dos fertilizantes Arad e SPT. Nos fertilizantes fosfatados, o fósforo foi aplicado na dose de 30, 150, 300, 600 e  $1200 \text{ mg kg}^{-1}$ , utilizando-se 500 g de amostra de cada solo por profundidade e acondicionados em sacos plásticos e mantidos a 70% de umidade conforme capacidade de campo.

Os teores de fósforo foram determinados após a extração com as soluções extratoras (M1, M3, B e OL) nas amostras de TFSA sem e com adição de fertilizantes nos períodos de 1°, 3°, 10°, 15° e 30° dia.

Mehlich-1: adicionaram-se 5,0 g de solo em erlernmeyer de 125 mL juntamente com 50,0 mL do extrator. Em seguida foram agitados em uma mesa horizontal circular por um período de 5 min e 16 horas de decantação para separar o sobrenadante (MEHLICH, 1953);

Mehlich–3: adicionaram-se 5,0 g de solo em erlernmeyer de 125 mL juntamente com 50,0 mL do extrator. Em seguida foram agitados em uma mesa horizontal circular por um período de 5 min e 16 horas de decantação para separar o sobrenadante (MEHLICH, 1984);

Bray-1: adicionaram-se 5,0 g de solo em erlnmeyer de 125 mL juntamente com 35,0 mL do extrator. Em seguida foram agitados em uma mesa horizontal circular por um período de 5 min e 16 horas de decantação para separar o sobrenadante (BRAY e KURTZ, 1945);

Olsen: adicionaram-se 2,50 g de solo em erlnmeyer de 50 mL juntamente com 50,0 mL do extrator. Em seguida foram agitados em uma mesa horizontal circular por um período de 30 min e 16 horas de decantação para separar o sobrenadante (OLSEN et al, 1954).

Nos extratos obtidos por M1, M3, B e OL, o fósforo foi determinado segundo Embrapa (1997). Após a separação do sobrenadante, alíquotas dos extratos foram retiradas e misturadas com a solução de trabalho (solução estoque + ácido ascórbico) preparada na hora da análise a

partir da solução estoque (ácido sulfúrico + molibdato de amônio + subcarbamato de bismuto) para formação de um complexo fosfomolibdico de cor azul.

Após a mistura de reagentes e extrato foi feita a curva de calibração com as soluções padrões nas concentrações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mg L<sup>-1</sup> de fósforo na forma de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. As mesmas proporções usadas para determinação das amostras de fósforo foram mantidas no preparo dos padrões. As leituras das amostras foram feitas em espectrofotômetro (Shimadzu, modelo UV-1650PC) no comprimento de onda de 660 (EMBRAPA, 1997). Todas as determinações foram realizadas em triplicata para avaliações estatísticas dos métodos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização mineralógica, química e classificação textural

A Tabela 1 mostra os resultados das análises químicas dos solos retirados nas camadas 0 cm–20 cm e 20 cm–40 cm, em que observa uma acidez ativa muito elevada (pH em água < 4,65). Nessa condição de pH, há o aumento das concentrações de íons que são tóxicos às plantas, como, por exemplo, Al<sup>3+</sup>, além de prejudicar a absorção de macronutrientes essenciais (SOUZA et al., 2007). A acidez trocável moderada (Al<sup>3+</sup> 0,63 - 1,67 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e saturação por alumínio muito alta (m% > 50% para o Latossolo e variando de 43% a 73% para o Argissolo). A baixa fertilidade natural dos Latossolos e Argissolos deve-se à formação de solos mais ácidos, com baixa saturação por bases (V%) e alta saturação por alumínio (m%), cujos processos promovem a remoção de cátions básicos do complexo de troca e substituição deles por elementos de natureza ácida, como o hidrogênio e o alumínio, confirmando assim o caráter distrófico desses solos (CRAVO, 2012).

Vale ressaltar que a maioria dos solos brasileiros, em especial da região Amazônia, apresenta valores de pH entre 3,0 e 6,0. Os solos tropicais são caracterizados pelo alto grau de intemperismo, pela remoção de bases por lixiviação e pela presença de oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, que têm a propriedade de reter diversos tipos de ânion, em especial os íons fosfatos (BEDIN et al., 2003).

A acidez potencial (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>), que representa o poder tampão do solo, variou de acordo com a profundidade entre 5,43–6,07 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> (0 cm – 20 cm), enquadrando-se como uma acidez potencial alta, e 3,70–3,99 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> (20 cm–40 cm), numa faixa de acidez potencial média. De modo geral, todos os solos apresentaram baixa capacidade de troca catiônica (< 27 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), caracterizando-se como argilas de atividade baixa (EMBRAPA, 2006).

Os resultados da análise granulométrica para classificação textural mostram que o Latossolo, de acordo com EMBRAPA (2006), tem classificação muito argilosa, enquanto o Argissolo, muito arenosa (Tabela 2). Observa-se que a porcentagem de argila nas duas profundidades para o Latossolo não variou significativamente (0 cm–20 cm: 65%–70%; e 20 cm–40 cm: 65,75%), como também para a areia grossa (11,28% e 8,78%); areia fina (3,72% e 3,36%) e areia total (15,00% e 12,14%) e silte (19,3% e 22,11%). Portanto são argilosos e, conseqüentemente, aumentam a adsorção de fósforo, pois estudos realizados por Souza et al. (2007) com solos de mineralogia similar mostram que a fixação de fósforo aumenta com o acréscimo de argila. Vale ressaltar também que solos com maiores teores de argila e com baixo pH tendem a reter mais fósforo que os demais.

**Tabela 1:** Resultado da análise química do solo a 0 cm–20 cm e 20 cm–40 cm de profundidade.

Unidade	Variáveis	Latossolo		Argissolo	
		0-20	20-40	0-20	20-40
pH	H <sub>2</sub> O	4,08	4,29	4,65	4,65
	KCl	3,76	3,95	3,92	4,01
	CaCl <sub>2</sub>	3,69	3,93	3,91	4,03
g kg <sup>-1</sup>	C	25,20	12,47	14,16	9,36
	M.O	43,34	21,45	24,36	16,09
cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Ca	0,04	0,05	0,59	0,20
	Mg	0,04	0,04	0,20	0,08
	Al	1,67	0,97	0,63	0,82
	H+Al	6,07	3,70	5,43	3,99
	SB	0,13	0,12	0,83	0,30
	T	1,80	1,09	1,46	1,12
	T	6,20	3,81	6,26	4,29
%	V	2,05	3,08	13,23	6,98
	M	92,9	89,2	43,20	73,20
mg dm <sup>-3</sup>	Cu	0,19	0,13	0,08	0,06
	Fe	152,00	139,00	160,00	168,00
	Mn	1,45	1,06	0,96	0,60
	Zn	0,37	0,29	0,32	0,16
	K	15,00	9,00	13,00	6,00
	Na	2,00	1,00	1,00	1,00

P: Mehlich-1; Al<sup>+3</sup>: Acidez trocável; H+Al: Acidez potencial; T: capacidade de troca cátion total; V: Saturação por bases; m: Saturação por alumínio; e M.O. matéria orgânica

Observa-se, na Tabela 2, que o Argissolo apresenta baixa porcentagem de teores de argila (0 cm–20 cm: 35,15% e 20 cm–40 cm: 40,95%) e silte (8,49% e 11,56%), mais valores altos para teores de areia grossa (35,70% e 28,53%); areia fina (20,66% e 18,96%) e areia total (56,36% e 47,50%), demonstrando sua textura mais arenosa, portanto, como são partículas menores que a argila, o processo de disponibilização de fósforo é maior. O fósforo se liga à

superfície dos minerais de argila e aos óxidos de ferro e alumínio por forças eletrostáticas ou ligação covalente (LAIR et al., 2009).

Dependendo da constituição mineralógica dos solos e do estado cristalográfico dos minerais, pode haver adsorção de até 85% do ânion fosfato aplicado nos solos, mas nos solos predominantes na região central da Amazônia, que apresentam escassez de fósforo no material de origem e a reatividade desse elemento com a mineralogia, 90% dos solos são considerados deficientes em fósforo (GÉRARD, 2016).

**Tabela 2:** Resultado de análise de granulometria (g kg<sup>-1</sup>).

Solo	Profundidade (cm)	Areia			Silte	Argila
		Grossa	Fina	Total		
Latossolo	0-20	112,8	37,2	150,0	193,0	657,0
	20-40	87,8	33,6	121,4	221,1	657,5
Argissolo	0-20	357,0	206,6	563,6	84,9	351,5
	20-40	285,3	189,6	475,0	115,6	409,5

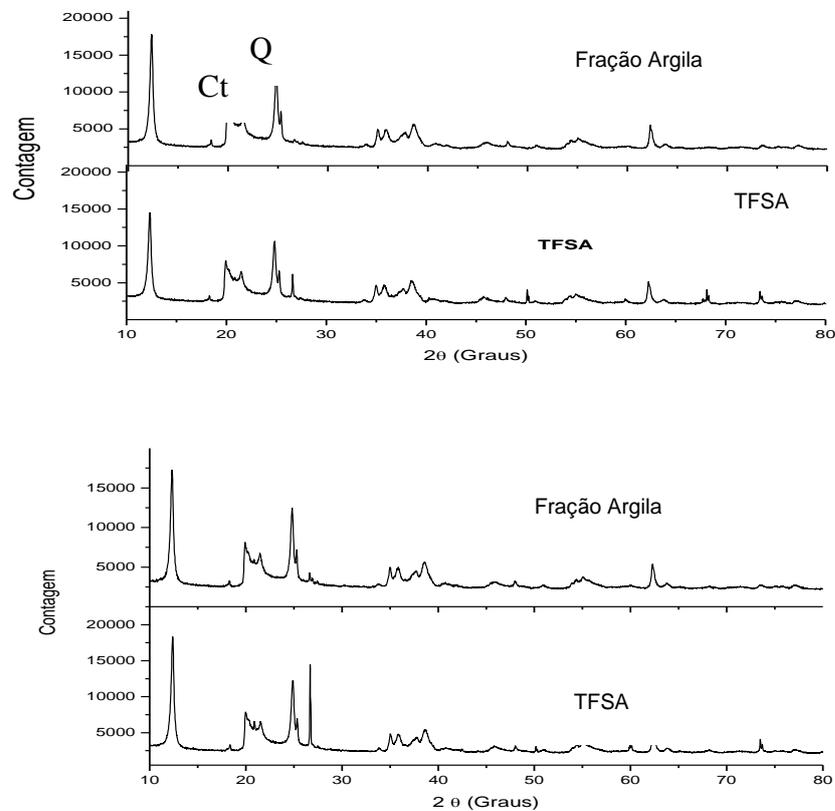
Moreira et al. (2006) relataram que as características do solo diretamente correlacionadas com a adsorção de fósforo são: o teor de matéria orgânica e a capacidade de troca catiônica. A adsorção de fósforo na fração areia pode ser atribuída à matéria orgânica ou a resíduos de óxidos de ferro livres. A relação da disponibilidade de fósforo é feita com base na classe textural do solo. Dessa forma, solos de textura média, argilosa ou muito argilosa e com menos de 5,5 mg dm<sup>-3</sup> de fósforo são considerados com baixa fertilidade. Observam-se baixos valores de fósforo disponível (M1) para ambos os solos estudados, corroborando com a literatura que mostra baixa concentração de fósforo em solos ácidos e altamente intemperizados.

Citado anteriormente, o fósforo disponível não pode ser inferior a 3,50 mg dm<sup>-3</sup> para o melhor crescimento das plantas, portanto a interpretação das análises de solos para realizar a adubação adequada é estimada pela capacidade tampão do fósforo remanescente (P<sub>rem</sub>), no qual apresenta o potencial de retenção de fosfato no solo e está estreitamente relacionado com a textura do solo (ALVAREZ et al., 2000), cujos valores variaram de 16,73 a 20,35 mg L<sup>-1</sup> para as profundidades de 0 cm–20 cm e 15,62 a 17,38 para as profundidades de 20 cm–40 cm, conforme Tabela 3. Com base nos valores do fósforo remanescente (10 a 20 mg dm<sup>3</sup>), os solos apresentam potencial médio de adsorção de fósforo (ALVAREZ et al., 2000; WADT e SILVA, 2011).

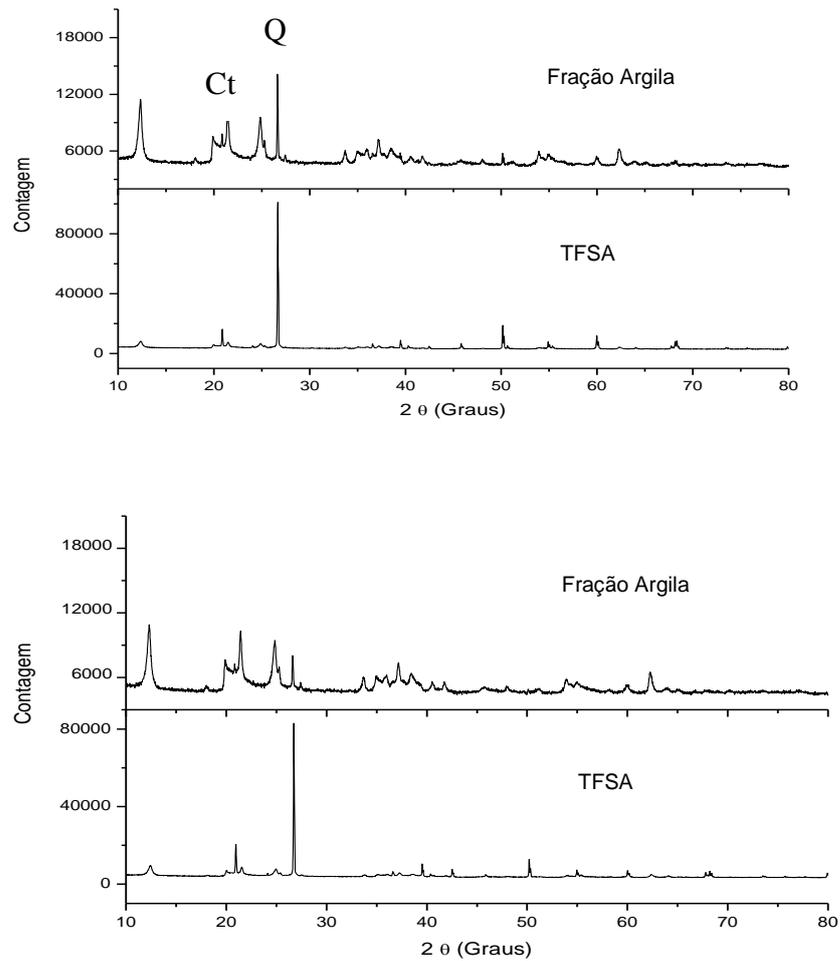
**Tabela 3:** Resultado de análise de fósforo remanescente.

Solo	Profundidade (cm)	Fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )	
		Remanescente	Disponível
Latossolo	0-20	16,73	1,00
	20-40	17,38	1,00
Argissolo	0-20	20,35	2,00
	20-40	15,62	1,00

Nas Figuras 6 e 7, a DRX da TFSA e fração argila mostram a predominância das fases mineralógicas caulinita (Ct) e quartzo (Q). Particularmente no caso da caulinita, as suas reflexões caracterizam um argilomineral com baixa cristalinidade e pobremente ordenada. Infelizmente, na fração argila não foram detectados oxi-hidróxidos de ferro e alumínio. Essa afirmação tem como fundamento o baixo poder de troca aniônica e catiônica da caulinita, única fase mineralógica com capacidade de sorção/dessorção de fósforo nos solos estudados (SILVA; SANTANA, 2013; SOUZA; SANTANA, 2014). Segundo Silva, Lages e Santana (2017), a caulinita amazônica apresenta baixa substituição isomórfica de adsorção, gerando baixa quantidade de fósforo.



**Figura 6:** Difratoograma de raios X das amostras de Latossolo a 0 cm–20 cm e 20 cm – 40 cm. Caulinita (Ct) e quartzo (Q)



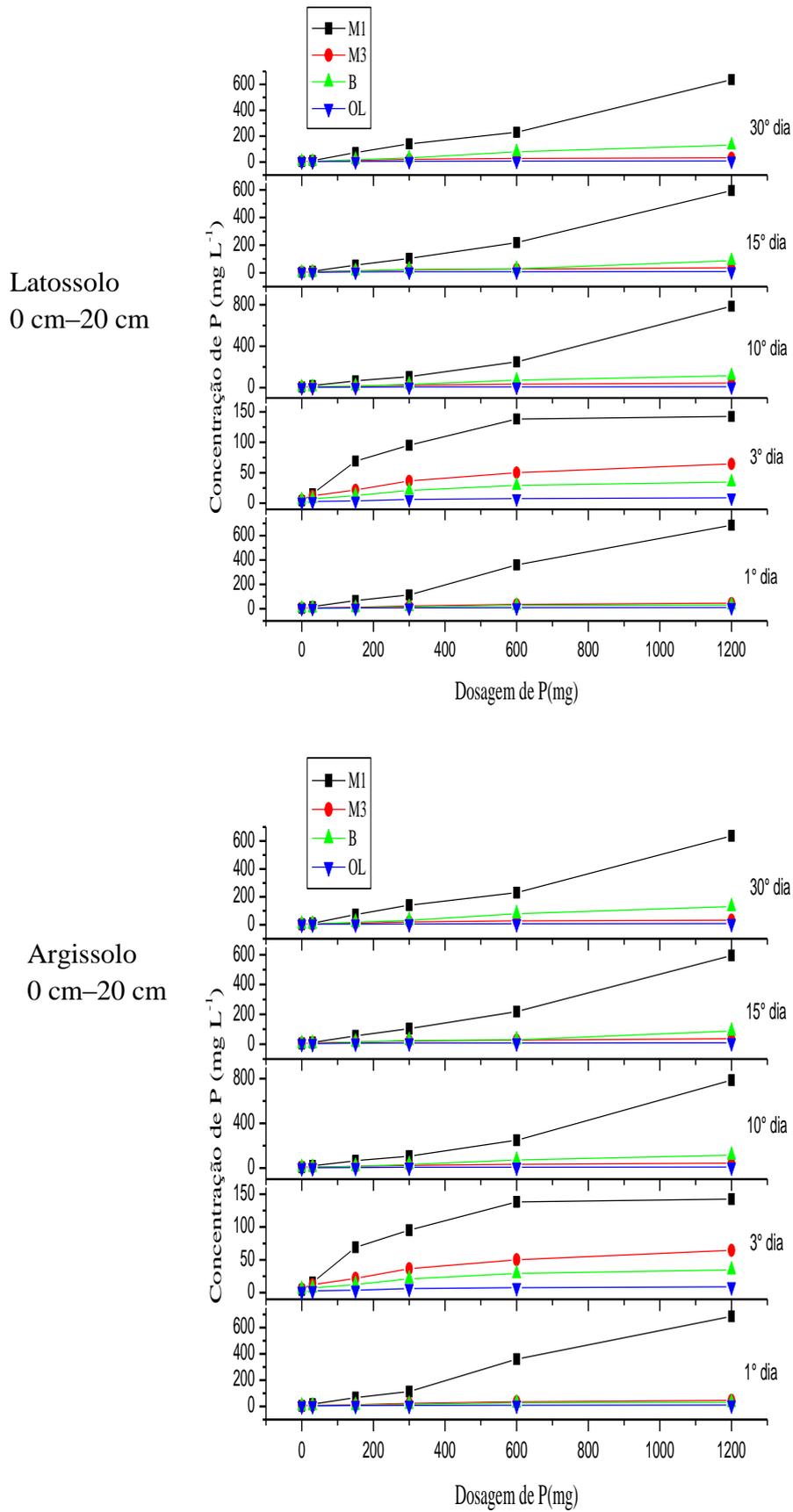
**Figura 7.** Difratoograma de raios X das amostras de Argissolo a 0 cm–20 cm e 20 cm–40 cm. Caulinita (Ct) e quartzo (Q).

#### 4.2 Estudo da disponibilidade de fósforo com os extratores

Em todos os experimentos pode ser observado que o M1 foi a solução extratora que mais extrai P nos solos estudados (Figura 8). Para o fertilizante Arad nota-se aumento de P concomitante entre sua aplicação e disponibilidade nos dois solos estudados (Tabela 4).

**Tabela 4.** Faixa de extração de P em relação ao M1 - Fertilizante Arad (0 cm–20 cm).

Solo	Solução	Faixa
Latossolo	M3	3,4 – 6,4
	B	2,7 – 10,2
	OL	14,0 – 25,3
Argissolo	M3	6,43 – 11,65
	B	4,55 – 13,72
	OL	28,85 – 38,70



**Figura 8.** Latossolo e Argissolo (0 cm–20 cm): adsorção de P *versus* fertilizante Arad.

Observa-se para a solução de M1 no terceiro dia, nos dois solos, que estes apresentam isoterma tipo H, indicando alta afinidade do solo com o fertilizante, e para os outros dias, a isoterma é do tipo C, no qual o P adicionado é adsorvido pelo solo, ou seja, uma forma crescente, pois todo o P adicionado é consumido em escala crescente. Enquanto para as soluções extratoras M3, B e OL, as curvas das isotermas são do tipo C, contudo a liberação do P é pequena devido às ligações covalentes reduzindo a quantidade solúvel de fósforo, com isso, afetam a eficiência e o uso do fertilizante fosfatado utilizado (Figura 8).

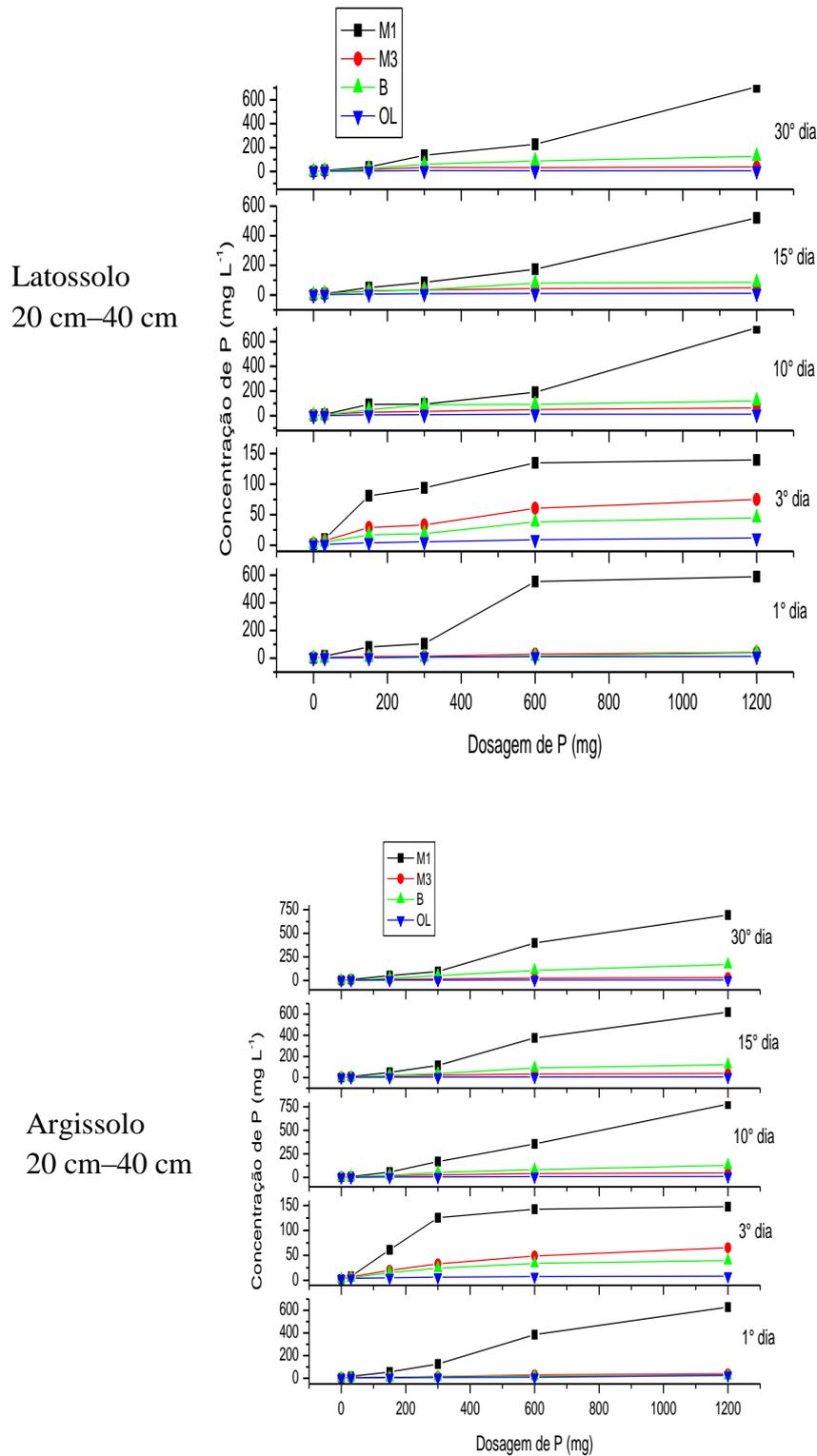
Na Tabela 5, demonstra-se a faixa de extração de P em que a solução M1 consegue extrair mais P quando comparada as outras soluções extratoras.

**Tabela 5:** Faixa de extração de P em relação ao M1 - Fertilizante Arad (20 cm–40 cm).

Solo	Solução	Faixa
Latossolo	M3	7,20 – 13,20
	B	3,80 – 19,10
	OL	30,90 – 48,70
Argissolo	M3	6,90 – 13,74
	B	3,43 – 19,76
	OL	24,21 – 55,34

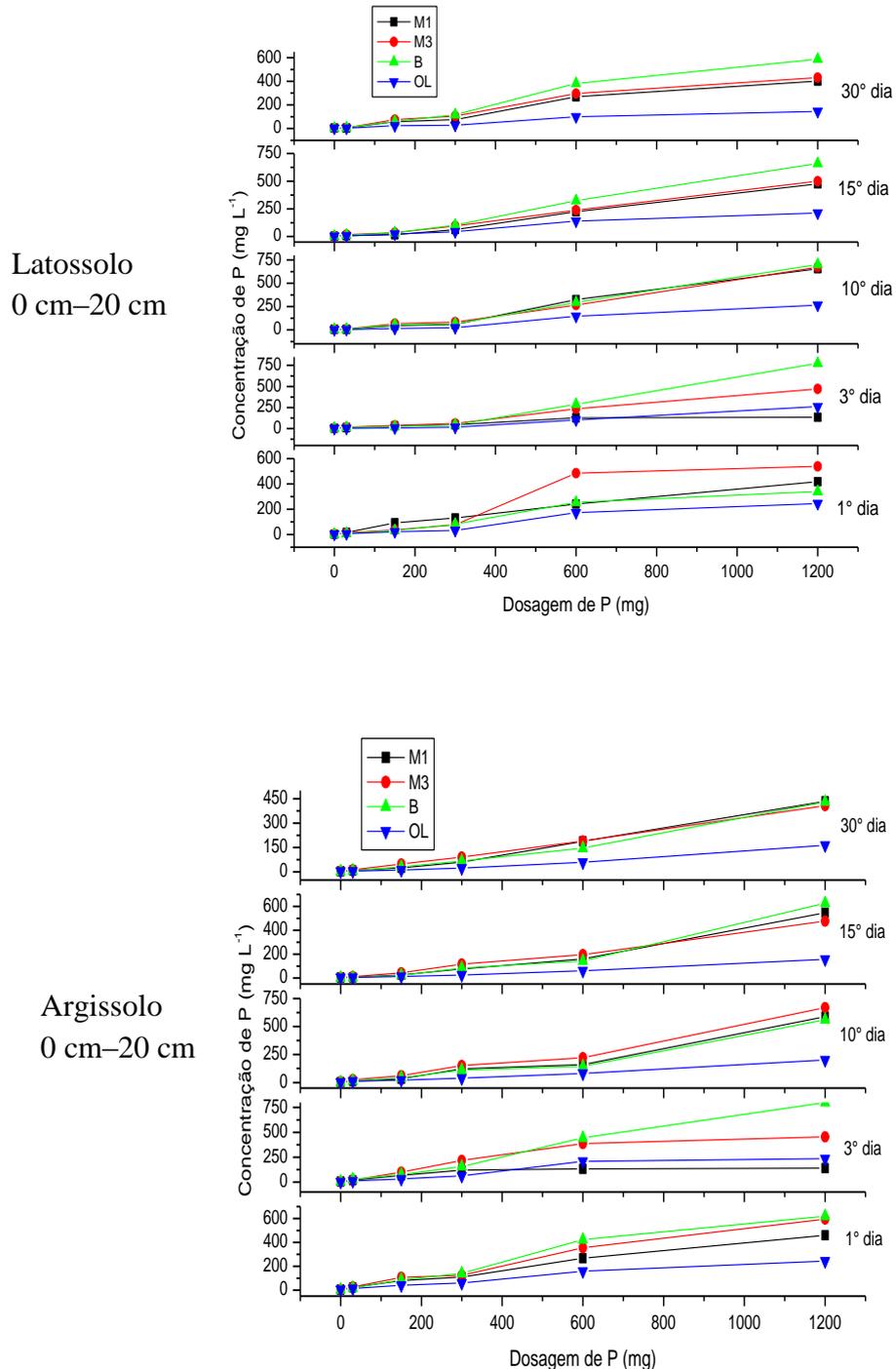
Na Figura 9, o Latossolo apresenta isoterma tipo L para o primeiro dia, indicando alta afinidade do P com o solo a baixa concentração e estabilizando na concentração de 600 mg de P, permanecendo constante até 1.200 mg para a solução M1; enquanto para as soluções de M3, B e OL, o P adicionado se manteve constante e pouco absorvido pelo solo. No terceiro dia, observa-se uma isoterma do tipo H bem acentuada para M1 e discreta para as outras soluções. No 10º, 15º e 30º dia, para o M1, isoterma tipo C e as outras soluções apresentam comportamento semelhante com baixa disponibilidade de P (20 cm–40 cm).

Para o Argissolo, observa-se para o 1º, 10º, 15º e 30º dia uma isoterma tipo C, com disponibilização crescente de P para a solução M1; enquanto para o 3º dia, a isoterma do tipo L, com aumento da disponibilização de P nas concentrações mais baixas, e observa-se que, em 600 mg de P, a disponibilização é similar durante os dias de tratamento e estabilizando a 1.200 mg de P, podendo observar que a melhor concentração de P ocorre em 600 mg. Enquanto para as soluções extrações M3, B e OL, isoterma tipo C e baixa disponibilização de P.



**Figura 9.** Latossolo e Argissolo (0 cm–20 cm): adsorção de P versus fertilizante Arad.

Nos experimentos com os dois solos estudados na profundidade de 0 cm–20 cm utilizando o fertilizante superfosfato triplo (SPT), identifica-se que as soluções extratoras M1, M3 e B extraíram quantidades de P semelhantes entre si. O OL apresentou valores mais baixos em relação ao M1, que extrai 1,87 a 3,00 mais P para o Latossolo e 1,71 a 3,55 para o Argissolo (Figura 10).



**Figura 10.** Latossolo e Argissolo (20 cm–40 cm): adsorção de P *versus* fertilizante SPT.

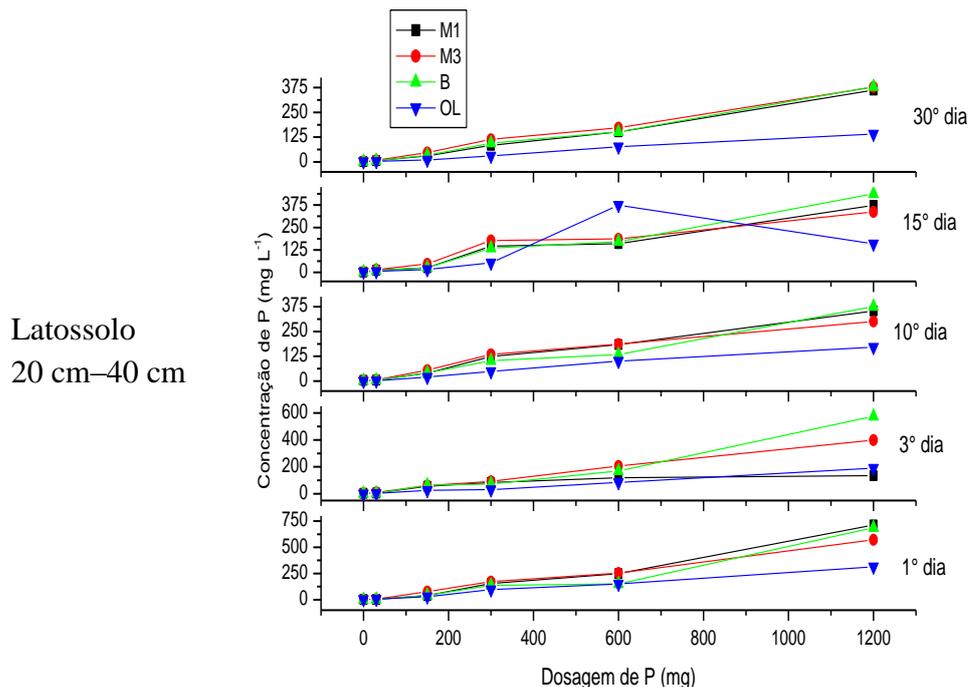
Na Figura 10, verifica-se para o Latossolo uma isoterma tipo S para M3 no 1º dia de tratamento, demonstrando afinidade relativa entre o P adicionado e o solo, com disponibilidade de P crescente e isoterma tipo C para todas as soluções extratoras. Para o Argissolo, observa-se isoterma tipo S para o 1º, 10º, 15º e 30º para as soluções extratoras M1, M3, B e OL, enquanto para o 3º dia, a isoterma tipo C.

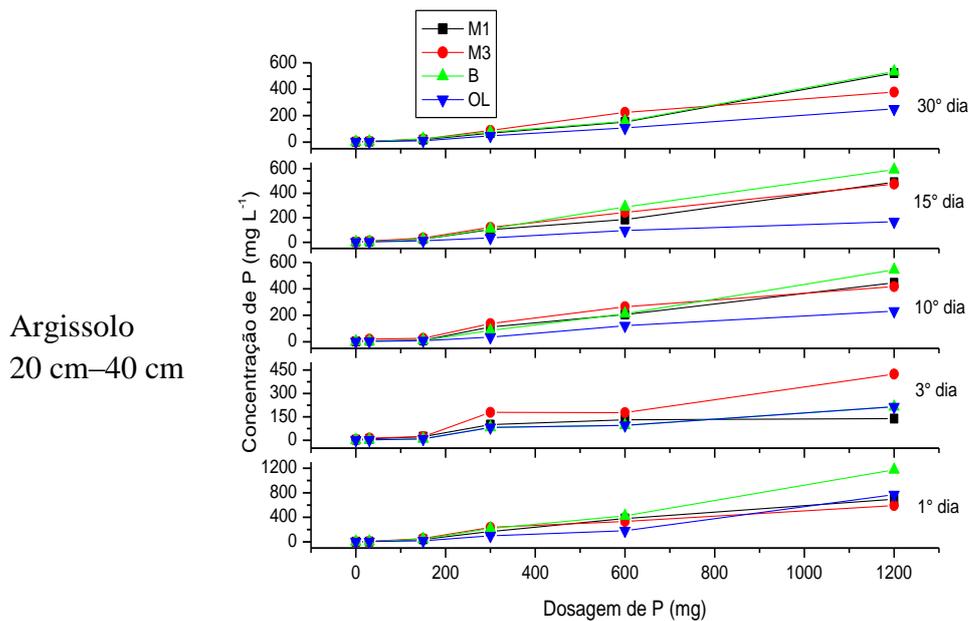
Na Tabela 6, observa-se que a faixa de extração das soluções é próxima para os dois solos estudados nas profundidades de 20 cm–40 cm quando aplicado o SPT, sendo M1 a solução extratora que mais extrai P.

**Tabela 6:** Faixa de extração de P em relação ao M1 - Fertilizante SPT (20 cm–40 cm).

Solo	Solução	Faixa
Latossolo	M3	1,07 – 1,69
	B	1,30 – 1,76
	OL	1,94 – 4,41
Argissolo	M3	1,05 – 1,57
	B	0,69 – 3,18
	OL	1,20 – 4,04

De acordo com a Figura 11, verifica-se uma isoterma tipo S na solução extratora OL no 15º dia e uma tipo C para as outras soluções extratoras no Latossolo, e tipo C para o 1º, 3º, 10º e 30º dia para todas as soluções extratoras. Para o Argissolo, apresenta isoterma tipo C para todo o experimento.





**Figura 11.** Latossolo e Argissolo (20 cm–40 cm): adsorção de P *versus* fertilizante SPT.

Os resultados das extrações de P nos dois solos podem ser, a princípio, atribuídos à quantidade de cálcio presente na composição química do fertilizante Arad, que, ao ser aplicado nos dois solos, pode ter aumentado a disponibilidade desse elemento. Existem diversos trabalhos reportados na literatura mostrando que altas concentrações de cálcio são uma das limitações para a utilização do M1 como solução extratora de P ((SOUZA, 2009; SILVA, 2008; RAIJ, 1991; NOVAIS et al., 2007; BARBOSA FILHO et al., 1987). A explicação dessa afirmação é que o M1 solubiliza preferencialmente as formas de P ligadas a alumínio e ferro, superestimando as quantidades de P extraídas nos solos ricos em cálcio (OLSEN e KHASAWNEH, 1980; BAHIA FILHO et al., 1983; RAIJ, 1991; NOVAIS e SMITH, 1999; ROCHA et al., 2005).

No entanto, deve ser considerada a solubilidade dos fertilizantes utilizados e a CMAP de P. Na Tabela 7, além das altas quantidade de cálcio, nota-se que a solubilidade dos dois fertilizantes em água é bastante diferente. Sendo que o Arad é composto por uma mistura de fluoroapatita e hidroxiapatita com valores das constantes de solubilidade bastante baixos em relação ao superfosfato triplo. Aliada a essa condição de solubilidade, tem-se que M1 é uma solução extratora com valores de pH relativamente muito baixos. Neste trabalho, o valor de pH foi de 1,5 para o M1, suficientemente baixo para solubilizar os fosfatos, principalmente o superfosfato triplo. Os valores de pH a uma condição física e química que afeta diretamente a

capacidade de extração das soluções utilizadas neste estudo. Assim, a capacidade de extração em função do valor de pH obedece à seguinte ordem M1 (pH 1,5) > M3 (pH 2,5) ≈ B (pH 2,6) > OL (8,5) (MOREIRA, 2007 e 2009). Mesmo presentes o ácido cítrico e citrato de amônio com a função para aumentar a solubilidade do fosfato, observa-se que a solubilidade do fosfato no superfosfato triplo ainda permaneceu maior que o do fosfato do fertilizante Arad.

**Tabela 7:** Características dos fertilizantes fosfatados.

Fertilizante	Fórmula Química	$K_{ps}$	Teor (%)		Aditivo
			$P_2O_5$	CaO	
Arad (Parcialmente solúvel em água)	$Ca_5(PO_4)_3F$ (Fluorapatita)	$5,1 \times 10^{-61}$	30	16	Ácido cítrico 19%
	$Ca_5(PO_4)_3OH$ (Apatita)	$6,8 \times 10^{-37}$			
Superfosfato triplo (SPT) (Solúvel em água)	$Ca(H_2PO_4)_2$	$1,0 \times 10^{-3}$	46	10	Citrato neutro de amônio (CNA) 10%

Os valores relativamente baixos para Latossolo e Argissolo de CMAP indicam que esses dois solos possuem baixa capacidade de adsorção de P (Tabela 8). Por essa razão, as soluções extratoras praticamente não encontram resistência para solubilizar o P dos dois fertilizantes. Os valores de  $FCP_{max}$  mostram que não há diferença entre profundidades e tipos de solo.

**Tabela 8.** Parâmetros para equação de Langmuir em relação à adsorção de P.

Solo	Prof. (cm)	Equação de Langmuir	Energia de adsorção (L $mg^{-1}$ )	CMAP (mg $g^{-1}$ )	$R^2$	$FCP_{max}$
Latossolo	0-20	$y = 36,3656 + 2,6947x$	0,0741	0,3711	0,9949	27,50
	20-40	$Y = 38,5824 + 1,6938x$	0,0439	0,5904	0,9979	25,92
Argissolo	0-20	$Y = 39,5199 + 0,8181x$	0,0207	1,2224	0,9998	25,30
	20-40	$Y = 39,6698 + 0,7815x$	0,0197	1,2796	0,9999	25,21

Energia de adsorção = a; CMAP (capacidade máxima de absorção do fósforo) = b;  $FCP_{max}$  = Fator de capacidade de P máximo

Observa-se que os solos estudados apresentam  $FCP_{max}$  muito baixo, indicando que possuem baixa adsorção de P. Já estudos desenvolvidos por Chaves et al. (2007) mostram que o Latossolo apresentou maior valor de energia de ligação e o Argissolo, maiores valores de CMAP e  $FCF_{máx}$ , conforme Tabela 9 a seguir.

**Tabela 9.** Equações da isoterma de Langmuir, capacidade máxima de adsorção de P, energia de adsorção e fator de capacidade de P máximo para Argissolo e Latossolo.

Solo	Equação de Langmuir	R <sup>2</sup>	CMAP	Energia de Ligação	FCF <sub>max</sub>
			mg g <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	g mL <sup>-1</sup>
Argissolo	$y = 1,4402 + 1,1088x$	0,98	0,9019	0,7698	694,3
Latossolo	$y = 1,6087 + 1,4397x$	0,99	0,6946	0,8946	621,6

Fonte: Chaves et al. (2007).

Em outro estudo desenvolvido por Moreira et al. (2006), estudando a CMAP dos solos Argissolo e Latossolo na fração areia e na areia lavada, observou-se que o Latossolo adsorveu mais teores de P em relação ao Argissolo. Esse fato é possivelmente atribuído ao Latossolo por apresentar maiores teores de óxido de ferro livre, e o Argissolo menores teores de óxido de ferro livre, menores teores de argila, caulinita, matéria orgânica e maior teor de P disponível pode-se justificar o menor poder de adsorção dos solos, conforme os valores na Tabela 10, abaixo.

**Tabela 10.** Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) do solo, da fração areia e da fração areia lavada em amostras (0 cm–20 cm) de solos do Ceará.

Solo	CMAP		
	Solo	Areia	Areia lavada
		mg kg <sup>-1</sup>	
Argissolo	109,89	76,92	15,50
Latossolo	200,00	74,07	16,67

Fonte: Moreira et al. (2006).

Moura et al. (2015) observaram, em estudos com Latossolo nas profundidades de 0 cm–20 cm e 20 cm–40 cm, que esse solo possui alta capacidade de fixação de fósforo, portanto há uma alta necessidade de aplicação de fertilizantes fosfatados (Tabela 11). Segundo Pinto (2012), a capacidade de os solos adsorverem fosfato permite que estes apresentem uma reserva desse mineral que pode atuar como estoques para uma produção sustentável, se revertido o mecanismo de fixação. No entanto, solos com menor capacidade de adsorção de fósforo solúvel podem apresentar problemas com perdas desse mineral devido aos maiores teores de fosfato solúvel, permitindo a movimentação dele na solução do solo, quando comparado aos solos com maiores capacidades de sorção de P.

**Tabela 11.** Equação de Langmuir,  $R^2$  e capacidade máxima de adsorção de P em Latossolo (0 cm–20 cm e 20 cm–40 cm).

Solo	Profundidade (cm)	Equação de Langmuir	$R^2$	CMAP $\mu\text{g g}^{-1}$
Latossolo	0-20	$Y = 0,002614 + 0,000277x$	0,97	3.610,11
	20-40	$Y = 0,00339 + 0,00018x$	0,84	5.555,56

Fonte: Pinto, 2012.

Falcão e Silva (2004) observaram, em seus estudos com oito solos do Amazonas, que as isotermas de adsorção de fósforo demonstraram que as quantidades de fosfato adsorvidas pelos solos aumentaram com a concentração da solução de equilíbrio. As formas das isotermas são características da adsorção química de uma monocamada aniônica, pela fase sólida adsorvente do solo (BARROW, 1961). Na fase inicial de rápida adsorção de P no solo, há uma atração eletrostática inicial (BARROW, 1985), seguida pela adsorção por oxihidróxidos, por meio de troca de ligantes (PARFITT, 1978; BARROW, 1985; SANYAL & DE DATTA, 1991). Segundo Novais e Smyth (1999), nessa reação, denominada quimiossorção, há troca de ligantes, como  $\text{OH}^-$  e  $\text{OH}^{2+}$ , da superfície dos óxidos, por fosfato da solução. Também verificaram que ocorreu ampla variação dos valores de CMAP, energia de adsorção e  $\text{FCP}_{\text{máx}}$ , em função do solo estudado (Tabela 12). Constatou-se que o Plintossolo Argilúvico alumínico apresentou o maior valor de CMAP. Com valores intermediários de CMAP encontraram-se os Latossolos Amarelos, enquanto o valor mais baixo foi observado para o Argissolo Amarelo distrófico. Essa variação pode estar diretamente ligada à composição do solo e indiretamente à influência de alguns dos componentes na retenção do fósforo.

O valor da CMAP tem sido utilizado no processo de recomendação de adubação fosfatada (WOODRUFF & KAMPRATH, 1965). Para solos do cerrado, a produção máxima tem sido obtida quando a quantidade de P aplicado varia entre 0,4 e 1,3 vez o valor da CMAP do solo (BRAGA & DEFELIPO, 1972; Bahia Filho et al., 1983; VASCONCELOS et al., 1975). No entanto, segundo Novais & Kamprath (1979), o uso apenas da CMAP para prever o requerimento de P dos solos para o crescimento de plantas não parece ser adequado, uma vez que ambos os fatores, intensidade e capacidade, pelo menos, são requeridos nos processos de predição das respostas das plantas à adubação fosfatada. De acordo com Novais & Smyth (1999), a utilização de apenas o valor da CMAP, com sucesso, em solos de cerrado parece estar relacionada aos valores iniciais semelhantes de intensidade (muito baixos, praticamente zero  $\mu\text{g g}^{-1}$  de P na solução do solo). Neste caso, a adubação fosfatada requerida torna-se função de apenas a CMAP como medida do fator capacidade (Tabela 12).

**Tabela 12:** Equações de Langmuir, capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), energia de adsorção e fator capacidade de fósforo máximo (FCP<sub>máx</sub>) para os solos estudados.

Solos	Local	Equação de Langmuir	R <sup>2</sup>	CMAP mg g <sup>-1</sup>	Energia de Adsorção L mg <sup>-1</sup>	FCP <sub>máx</sub> mL g <sup>-1</sup>
Plintossolo	Manacapuru	$y = 7,2696 + 3,3605x$	0,997	0,2975	0,4623	137
		$y = 1,7639 + 1,2879x$	0,988	0,7764	0,7301	567
Latossolo	Manacapuru	$y = 3,4396 + 1,4125x$	0,993	0,7079	0,4106	291
		$y = 2,1561 + 1,5008x$	0,994	0,6663	0,6961	464
	Borba	$y = 5,8860 + 1,9726x$	0,995	0,5069	0,3351	170
		$y = 9,0521 + 2,0848x$	0,991	0,4797	0,2303	111
		$y = 3,1424 + 1,3740x$	0,988	0,7278	0,4373	318
		$y = 1,6871 + 1,1261x$	0,989	0,8880	0,6675	593
Argissolo	Humaitá					

Fonte: Falcão e Silva (2004).

Em termos de reprodutibilidade, os coeficientes de variação calculados usando a concentração de P mostram que M1 e M3 foram as soluções extratoras com menores dispersões entre os resultados obtidos quando aplicado o SPT no Latossolo na profundidade de 0 cm–20 cm, como também observa-se a mesma dispersão utilizando o SPT no Argissolo nas duas profundidades; enquanto, ao utilizar o Arad, verifica-se que o M3 apresenta menor dispersão também nas duas profundidades (Tabela 13).

**Tabela 13:** Coeficiente de variação das soluções extratoras.

Solo	Fertilizante	Profundidade (cm)	Solução Extratora	CV (%)	
				Menor	Maior
Latossolo	Arad	00-20	M1	11	63
			M3	65	89
			B	40	68
			OL	52	110
		20-40	M1	19	51
			M3	53	80
			B	27	61
			OL	62	114
	SPT	00-20	M1	23	50
			M3	30	51
			B	27	56
			OL	21	58
		20-40	M1	17	55
			M3	10	36
			B	18	59
			OL	22	87
Argissolo	Arad	00-20	M1	16	49
			M3	73	90
			B	16	87
			OL	112	134
	20-40	M1	21	43	
		M3	50	68	

		B	13	56
		OL	65	123
	00-20	M1	31	55
		M3	12	35
		B	16	56
		OL	32	51
SPT	20-40	M1	32	51
		M3	20	45
		B	46	60
		OL	24	68

Oliveira et al. (2015) estudaram que a ineficiência do método M1 em estimar a disponibilidade de P em solos que receberam fosfatos naturais já era bem conhecida, tanto que, no manual de adubação e de calagem para os solos do Sul do Brasil (CQFS-RS/SC, 2004), se recomenda a substituição da análise de P por M1 pela resina nos solos que foram adubados com fosfatos de baixa solubilidade e nos seus tratamentos adubados com superfosfato triplo, o método M1 extraiu mais P que os demais. Quando comparados os teores extraídos por método nos diferentes tratamentos de adubação fosfatada, para os métodos M3 e resina, os maiores teores são encontrados no tratamento SFT, seguido dos tratamentos Arad e testemunha, que não diferem entre si. Por outro lado, para o método M1, os teores no tratamento com fosfato natural são maiores que para o SFT, e este, maior que o da testemunha. Pelos teores de P extraídos pelos métodos avaliados pode ser observado que os métodos extraíram quantidades semelhantes de P no solo sem a aplicação do nutriente.

Para Schlindwein; Bortolon; Gianello (2011); Schlindwein et al., (2013), os métodos de M1, M3 e resina sem aplicação de P apresentaram comportamento semelhante na extração de P. Nos tratamentos que receberam fosfato natural de Arad, o método Mehlich-1 extraiu mais P que os outros (M3 e resina), os quais não diferiram entre si. A quantidade de P extraído por Mehlich-1 foi da ordem de 36 a 38 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto para os outros métodos, os valores situaram-se entre 5 e 14 mg kg<sup>-1</sup>. Santos & Kliemann (2005), trabalhando com solos com variação nos conteúdos de argila (120 g kg<sup>-1</sup> a 580 g kg<sup>-1</sup>), verificaram que M1 extraiu quantidades bem superiores de P que os extratores M3 e resina. Essa maior extração deve-se ao caráter ácido do extrator (SANTOS e KLIEMANN, 2005), cujos ácidos fortes provocam sua dissolução da apatita que compõe a rocha fosfática (NOVAIS e1 SMYTH, 1999; (SCHLINDDWEIN; BORTOLON; GIANELLO, 2011; SCHLINDWEIN et al., 2013; SOUZA, 2013).

## 5 CONCLUSÕES

Os solos estudados apresentaram acidez ativa muito elevada. Sabe-se que a baixa fertilidade dos Latossolos e Argissolos vem dessa característica, com baixa saturação por bases e alta saturação por alumínio, que provocam a retirada de cátions básicos substituídos por elementos de natureza ácida, como o hidrogênio e o alumínio, tornando-os solos de caráter distrófico. Já os resultados da análise granulométrica mostraram que o Latossolo tem classificação muito argilosa, enquanto o Argissolo, muito arenosa. A argila tem a característica de reter o P, devido ao devido caráter catiônico, causando aumento na adsorção das espécies de fósforo (aniônicas) por meio de interação entre cargas através da reação dos minerais de argila, em especial, óxidos de ferro e alumínio, gerando uma alta capacidade de adsorção e a baixa disponibilidade do elemento.

O fósforo disponível apresentou valores baixos para ambos os solos estudados, e o fósforo remanescente apresentou potencial de retenção de fosfato de 16,73 (LA) e 20,35 (AR) mg L<sup>-1</sup> para as profundidades de 0 cm–20 cm, e a quantidade liberada de fósforo foi de 15,62 (LA) e 17,38 (AR) mg L<sup>-1</sup> entre as profundidades de 20 cm–40 cm. O resultado da difração de raios X da TFSA e fração argila mostrou a predominância da caulinita e quartzo. Ambos possuem baixa capacidade de sorção/dessorção de fósforo nos solos estudados.

Os resultados mostram que os dois solos possuem baixa capacidade de adsorção, com isso as soluções extratoras não encontram resistência em solubilizar o fósforo. O Mehlich-1 é o extrator que mais extraiu fósforo nos solos, preferencialmente aquelas formas ligadas a alumínio e ferro que encontram-se numa faixa de pH entre 1,0 e 3,0. De modo geral, a capacidade de extração de fósforo obedece à seguinte ordem M1 (pH 1,5) > M3 (pH 2,5) ≈ B (pH 2,6) > OL (8,5).

Portanto, o SPT foi mais eficiente na disponibilização de P para os solos estudados pois sua solubilidade do fosfato monocálcio (solúvel em água) é maior em relação ao Arad.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOUD, F. Y. et al. Phosphorus mobility and degree of saturation in oxisol under no-tillage after long-term dairy liquid manure application. **Soil and Tillage Research**, v. 177, n. November 2017, p. 45–53, 2018.

ALVAREZ, V. H. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 1, 2000.

ANTÔNIO, T. et al. CALAGEM E ADUBAÇÃO FOSFATADA PARA A PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Swietenia macrophylla*. **Floresta**, v. 41, n. 3, p. 459–470, 2010.

ARAÚJO, C. S. DE et al. Crescimento de Mudanças de Açaizeiro submetidas a diferentes doses de fósforo. **South American**, v. 5, n. 1, p. 1–4, 2018.

BAHIA FILHO, A .F. C.; BRAGA, J. M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A. C. *Relação entre Adsorção de Fósforo e Componentes Mineralógicos da Fração Argila de Latossolos do Planalto Central*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 221-226, 1983.

BARBOSA FILHO, M. P.; KINJO, T. e MURAOKA, T. Relações entre fósforo “extraível”, frações inorgânicas de fósforo e crescimento do arroz em função de fontes de fósforo, calagem e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 147- 155, 1987.

BEDIN, I. et al. Fertilizantes fosfatados e produção da soja em solos com diferentes capacidades tampão de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27. P. 639-646, 2003.

BORTOLON, L. et al. Degree of phosphorus saturation threshold for minimizing P losses by runoff in cropland soils of Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1088–1098, 2016.

BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. Relações entre formas de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado: I. Trabalhos de laboratório. **Revista. Ceres**, 19:124-136, 1972.

BRAGA, J.M; DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, 21, 73-85, 1974.

BARROW, G.M. *Physical chemistry*. **McGraw-Hill** , New York. 694p, 1961.

BARROW, N.J. Reaction of Anions and Cations with Variable-Charge Soils. **Adv. Agron., San Diego**, 38(1):183-230, 1985.

BRASIL, E.C. Disponibilidade de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. 1994. 160p. Teses (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

BRAY, R. H.; KURTZ, L. T. Determination of total, organic, and available for of phosphorus in soil. **Soil Science**, v. 59, p. 39-45, 1945.

BROGGI, F. et al. Fator capacidade de fósforo em solos de Pernambuco mineralogicamente diferentes e influência do pH na capacidade máxima de adsorção. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 1, p. 77-83, 2011. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-70542011000100009](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542011000100009)>. Acesso em: 30 Out 2019.

CHAVES, L.H.G, CHAVES, I.B, MENDES, J.S . Adsorção de Fósforo em Materiais de Latossolo e Argissolo. **Revista Caatinga**, 20(3), 2007..

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFSRS/SC. Manual de recomendação de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10 ed. Porto Alegre: SBCS/NRS; 2004.

CORRÊA, R. M. et al. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas 1. **Revista Brasileira de Ciência Agrárias**, v. 3, n. 3, p. 218–224, 2008.

COSTA, D. B. et al. ADUBAÇÃO FOSFATADA EM CANA PLANTA E SOCA EM ARGISSOLOS DO NORDESTE DE DIFERENTES TEXTURAS. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 4, p. 47–56, 2014.

COSTA, M. G. et al. Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus. **Forests**, v. 7, p. 1–15, 2016.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 337, 2017.

FALCÃO, N. P. S.; SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central . **Acta Ama**, v. 34, n. 3, p. 337–342, 2004.

FARIAS, D. R.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, D., ARRUDA, J. A.; HOFFMANN, R. B.; NOVAIS, R. F. Fósforo em solos representativos do estado da paraíba. I - Isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 3, p. 623-632, 2009.

FINK, J. R. et al. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 62–68, 2016.

FISCHER, P. et al. Phosphorus saturation and superficial fertilizer application as key parameters to assess the risk of diffuse phosphorus losses from agricultural soils in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 630, p. 1515–1527, 2018.

FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing Soils for Phosphorus. In: WESTERMAN, T. L., ed. Soil testing and plants analysis. 3° Ed. Madison, **Soil Science Society of America**, p.141-180, 1990.

FONTES, M.P.F.; WEED, S.B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 72, p. 37-51, 1996.

FRAZÃO, J. J. et al. Agronomic effectiveness of a granular poultry litter-derived organomineral phosphate fertilizer in tropical soils: Soil phosphorus fractionation and plant responses. **Geoderma**, v. 337, n. August 2018, p. 582–593, 2019.

GÉRARD, F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils- A myth revisited. **Geoderma**, v. 262, p. 213-226, jan. 2016.

GUILHERME, L. R. G. et al. Adsorção de fósforo em solos de várzea do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 27- 34, 2000.

HARTER, R. D., and D. E. BAKER. 1977. Applications and Misapplications of the Langmuir Equation to Soil Adsorption Phenomena1. **Soil Sci. Soc. Am**, 1977.

HOSSEINPUR, A. R.; GHANEE, A. H. Communications in Soil Science and Plant Analysis Comparison of Iron Oxide – Impregnated Paper Strips with Other Extractants in Determining Available Soil Phosphorus Comparison of Iron Oxide – Impregnated. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 3624, n. 37, p. 889–897, 2006.

KAMPRATH, E. J.; WATSON, M. . Conventional Soil and Tissue Tests for Assessing the Phosphorus Status of Soils. **Departamento de Agricultura**, v. 16, p. 53711, 1980.

KHALEDIAN, Y. et al. Developing global pedotransfer functions to estimate available soil phosphorus. **Science of the Total Environment**, v. 644, p. 1110–1116, 2018.

LANA, R. M. Q. et al. Produção da alface em função do uso de diferentes fontes de fósforo em solo de Cerrado. **Horticultura Brasileira**, v. 22, n. 2004, p. 525–528, 2004.

LAIR, G. J. et al. Phosphorus sorption desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River. **Geoderma**, v. 149, p. 39-44, 2009.

LIMA, L. S. H.; FRANCO, E. T. H.; SCHUMACHER, M. V. Crescimento de mudas de Euterpe Edulis Martius em resposta a diferentes doses de fósforo. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 4, p. 2008, 2008.

LIMA, M. S. et al. Solos florestais em fragmento de floresta urbana na mata de dois irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. **Ciencia Florestal**, v. 28, n. 2, p. 542–553, 2018.

MACEDO, S. T.; TEIXEIRA, P. . Calagem e adubação fosfatada para formação de mudas de araçá-boi. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 3, p. 405–412, 2012.

MAIA, M.A.M.; Marmos, J.L. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. Programa Geologia do Brasil - Levantamento da Geodiversidade. Manaus, Brasil 2010.

MEHLICH, A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na, NH<sub>4</sub>. **Departamento de Agricultura**, n. 1, p. 1–53, 1953.

MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: A modification of Mehlich-2 extractant. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, v. 15, p. 1409-1416, 1984.

MOREIRA, J. A. A. et al. Atributos químicos e físicos de um Latossolo vermelho distrófico sob pastagens recuperada e degradada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiás, v. 35, n. 3, p. 155-161, 2006.

MOREIRA, A. *Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia Ocidental*. In: **BRAGANTIA**, p. 307-315, 2007.

MOREIRA, M.S.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros**. Lavras: Ed. UFLA, 2008.

MOREIRA, A. et al. Extratores e disponibilidade de micronutrientes em solos antrópicos da Amazônia. **Ciencia del Suelo** [S.I.], Argentina, v. 37, n. 1, p. 127-134, 2009a.

MOURA, J. B. . et al. Adsorção de Fósforo em Latossolo Vermelho Distrófico sob Vegetação de Cerrado em Rio Verde-Go. **Fronteiras Journal of Social, Technologicval and Environmental Science**, v. 4, n. 3, p. 199–208, 2015.

NEVES, O. S. C. et al. Crescimento, produção de matéria seca e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S na parte aérea de mudas de andiroba ( *Carapa guianensis* Aubl) cultivadas em solo de várzea. **Revista Árvore**, v. 28, n. 3, p. 343–349, 2004.

NOVAIS, R.F.; KAMPRATH, E.J. Parâmetros das isotermas de adsorção de fósforo como critério de recomendação de adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 3(1):37-41, 1979.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. **Fósforo**. In: Curso de fertilidade e manejo de solo. BRASÍLIA: ABEAS, p. 133, 1994.

NOVAIS, R.F, MELLO, J.W.V. Relação solo-planta. In: Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL, editores. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciências do Solo**, p. 134-204, 2007.

OLIVEIRA, F. A. . et al. Crescimento do milho adubado co nitrogênio e fósforo em um Latoss Amarelo Growth of corn fertilized with nitrogen phosphorus in a Yellow Latosol. **Revista Brasileira de Ciência Agrárias**, v. 4, n. 3, p. 238–244, 2009.

OLIVEIRA, C. M. B. DE et al. Capacidade de predição da disponibilidade de fósforo em solo com aplicação de fosfato solúvel e natural. **Científica**, v. 43, n. 4, p. 413, 2015.

OLIVEIRA, L. B. DE et al. Formas de fósforo no solo sob pastagens naturais submetidas à adição de fosfatos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 867–878, 2014.

OLSEN, S. R.; COLE, C. V.; WATENABE, F. S.; DEAN, L. A. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Washington: **USDA**. p. 22, 1954.

OLSEN, S. R.; WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. **Proceedings of the American Society of Agronomy**, Washington, USA, v. 21, n. 2, p. 144-149, 1957.

PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Adv. Agron.**, 30:1-50, 1978.

PINTO, F.A. *Sorção e Dessorção de Fósforo em Solos do Cerrado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Jataí, 36 pp, 2012.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; ROQUE, C. G. RESPOSTA DA CULTURA DO MILHO A MODOS DE APLICAÇÃO E DOSES DE FÓSFORO ., **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 83–90, 2001.

RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e adubação. São Paulo: **Agronômica Ceres**, p. 343, 1991.

REDDY, K. R.; WETZEL, R. G.; KADLEC, R. H. Biogeochemistry of phosphorus in wetlands. In: SIMS, J. T. et al. Phosphorus: agriculture and the environment. Madison: **American Society of Agronomy**, p. 263-316, 2005.

ROBERTS, T. L.; JOHNSTON, A. E. Phosphorus use efficiency and management in agriculture. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, n. February, p. 275–281, 2015.

ROCHA, A. T. DA; DUDA, G. P.; NASCIMENTO, C. W. A.; RIBEIRO, M. R. Fracionamento do fósforo e avaliação de extratores do P-disponível em solos da Ilha de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.2, p.178-184, 2005

ROGERI, D. A. et al. Remaining phosphorus content to determine phosphorus availability of the soils in Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 12, p. 1203–1214, 2017.

ROLIM NETO, F. C. et al. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 953-964, Nov./ Dez. 2004.

ROSA, S. F. DA et al. Propriedades físicas e químicas de um argissolo sob cultivo de *Eucalyptus dunnii* Maiden no Pampa Gaúcho. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 580–590, 2018.

SALDANHA, E. C. M. et al. Adubação fosfatada na cultura do milho no nordeste paraense. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 4, p. 441–448, 2017.

SANTINATO, F. et al. DOSES OF PHOSPHORUS ASSOCIATED WITH NITROGEN ON DEVELOPMENT OF COFFEE SEEDLINGS Felipe Santinato 1 , Gustavo Caione 2 , Tiago

Oliveira Tavares 3 , Renato de Mello Prado 4. **Coffee Science**, v. 9, n. 3, p. 419–426, 2014.

SANTOS, E.A, KLIEMANN, H.J. Disponibilidade de fósforo de fosfatos naturais em solos de Cerrado e sua avaliação por extratores químicos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. p. 139-46, 2005.

SANTOS, R. A. et al. Adubação fosfatada para a produção de mudas de mogno ( *Swietenia macrophylla* King ). v. 38, n. 3, p. 453–458, 2008.

SANYAL, S.K.; DE DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Adv. Soil Sci.**, 16:1-120, 1991.

SCHLINDDWEIN, J. A. .; BORTOLON, L. .; GIANELLO, C. Soil Phosphorus Available for Crops and Grasses Extracted with Three Soil-Test Methods in Southern Brazilian Soils Amended with Phosphate Rock. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, p. 283–292, 2011.

SCHLINDWEIN, J. A. BORTOLON, L., FIORELI-PEREIRA, E.C., OLIVEIRA, BORTOLON, E.S., GIANELLO, C. Phosphorus and potassium fertilization in no till southern Brazilian soils. **Agricultural Sciences**, v. 4, n. 12, p. 39–49, 2013.

SILVA, F. C. .; RAIJ, B. V. DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS AVALIADA POR DIFERENTES EXTRATORES. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 267–288, 1999a.

SILVA, F. C.; RAIJ, B. V. DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS AVALIADA POR DIFERENTES EXTRATORES. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 267–288, 1999b.

SILVA, A. R. M. . et al. EFEITOS DE DOSES CRESCENTES DE CALCÁRIO NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE SUMAÚMA ( *Ceiba pentandra* L . Gaertn ). **Floresta**, v. 38, n. 2, p. 295–302, 2008.

SILVA, M. S.; SANTANA, G. P. Caulinita: Estrutura cristalina, técnicas físicas e estudo de adsorção. **Scientia Amazonia**, v. 2, n. 3, p. 54–70, 2013.

SILVA, M. S.; LAGES, A. S.; SANTANA, G. P. Physical and chemical study of lattice kaolinites and their interaction with orthophosphate. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, v. 89, n. 3, p. 1391–1401, 2017.

SILVA, J. V. DE S. et al. Adubação fosfatada no feijoeiro cultivado sob palhada de *Brachiaria*. **Revista Ceres**, v. 65, n. 2, p. 181–188, 2018.

SILVA, J. T. A. DA; SILVA, I. P.; PEREIRA, R. D. Adubação fosfatada em mudas de bananeira “ Prata anã ”( AAB ), cultivadas em dois Latossolos. **Revista Ceres**, v. 58, n. 1, p. 238–242, 2011.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do cerrado. **Potafos**, v. 102, n. 1, 2003.

SOUSA, R.O.; GOMES, A.S.; VAHL, L.C. Toxidez por ferro em arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr, A. M. (Ed) Arroz irrigado no sul do Brasil, 1º ed. Brasília, DF, EMBRAPA Informação Tecnológica, p. 305-337, 2004.

SOUZA, K. W. et al. *Phosphorous forms in cultivated Indian Black Earth (anthrosols) of varying texture in the Brazilian Amazon*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, p.1347-1355, 2009.

SOUZA, C. H. E. DE et al. Extratores para fósforo disponível em Latossolo e eficiência de fontes fosfatadas para milho cultivado em vaso. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 10, n. 1, p. 38–46, 2011.

SOUZA, R.M. Eficiência agronômica de fosfatos de rocha, via adubação corretiva, em um cambissolo cultivado com milho no Estado de Sergipe. **Universidade Federal de Sergipe** (Dissertação de Mestrado em Agroecossistemas), 2013.

SOUZA, W. B. DE; SANTANA, G. P. Mineralogy, zinc kinetic adsorption and sequential extraction of contaminated soil in Manaus, Amazon. **Ciência Rural**, v. 44, n. 5, p. 788–793, 2014.

SPARS, D. L.: *Environmental Soil Chemistry*, Academic Press, 2º Edição. Inc., California, U.S.A, p. 151- 159, 2003.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de Solo**. [s.l: s.n.].

TIECHER, T. et al. Assessing linkage between soil phosphorus forms in contrasting tillage systems by path analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 175, n. March 2017, p. 276–280, 2018.

VALLADARES, G. S. .; PEREIRA, M. G. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa (1). **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 111–118, 2003.

VASCONCELOS, C.A.; BRAGA, J.M.; NOVAIS, R.F.; PINTO, O.C.B. Fósforo em dois Latossolos do Estado de Mato Grosso: III. Relações entre planta, solo e fósforo. **Revista Ceres**, 22:22-49, 1975.

WITHERS, P. J. A. et al. Transições para o manejo sustentável do fósforo na agricultura brasileira. **Scientific Reports**, n. January, p. 1–13, 2018.

ZHU, J.; LI, M.; WHELAN, M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. **Science of the Total Environment**, v. 612, p. 522–537, 2018.

WADT, P. G. S. e SILVA, L. M. Determinação do fósforo remanescente para a avaliação da disponibilidade de fósforo em solos do Estado do Acre. Rio Branco: **Embrapa Acre**, 2011.

WOODRUFF, J.R.; KAMPRATT, E.J. Phosphorus adsorption as maximum measured by the langmuir isotherm and its relation hip to phosphorus availability, **Soil. Sci. Soc. Am. Proc.**, 29:148-150, 1965.