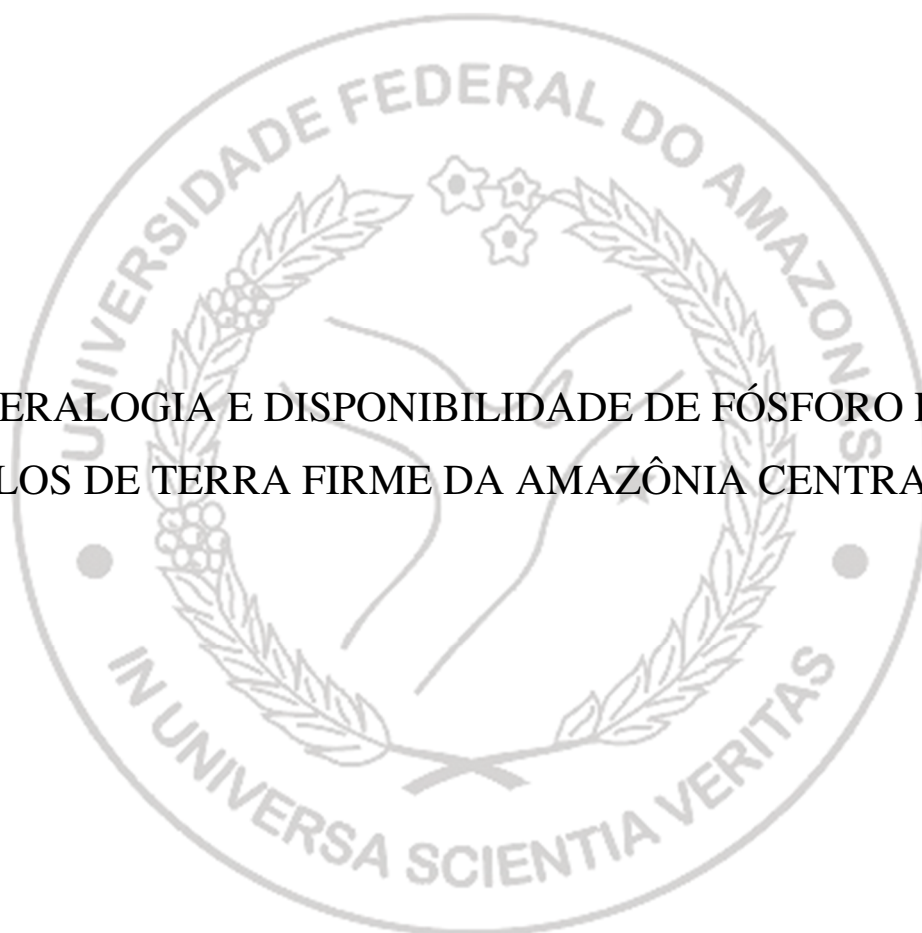


UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
TROPICAL

MINERALOGIA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM
SOLOS DE TERRA FIRME DA AMAZÔNIA CENTRAL



TAINAH MANUELA BENLOLO BARBOSA

MANAUS

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
TROPICAL

TAINAH MANUELA BENLOLO BARBOSA

MINERALOGIA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM
SOLOS DE TERRA FIRME DA AMAZÔNIA CENTRAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical da Faculdade de Ciências Agrárias - UFAM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Agronomia Tropical, área de concentração Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. José Zilton Lopes Santos

MANAUS

2017

Ficha Catalográfica

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

B238m Barbosa, Tainah Manuela Benlolo
Mineralogia e disponibilidade de fósforo em solos de terra firme
da Amazônia Central / Tainah Manuela Benlolo Barbosa. 2017
84 f.: il.; 31 cm.

Orientador: José Zilton Lopes Santos
Tese (Doutorado em Agronomia Tropical) - Universidade Federal
do Amazonas.

1. minerais silicatados. 2. óxidos. 3. tempo de incubação. 4.
trópico úmido. I. Santos, José Zilton Lopes II. Universidade Federal
do Amazonas III. Título

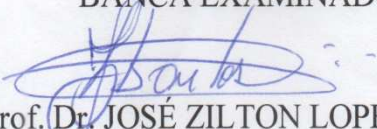
TAINAH MANUELA BENLOLO BARBOSA

MINERALOGIA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS DE
TERRA FIRME DA AMAZÔNIA CENTRAL

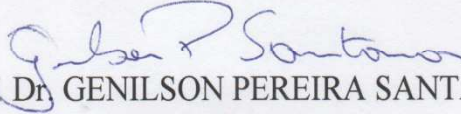
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical da Faculdade de Ciências Agrárias - UFAM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Agronomia Tropical, área de concentração Produção Vegetal.

Aprovada em 10 de julho de 2017

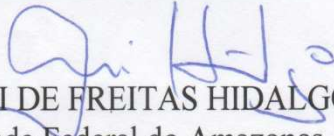
BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. JOSÉ ZILTON LOPES SANTOS
Universidade Federal do Amazonas


Prof. Dr. FRANCISCO CÉLIO-MAIA CHAVES
Embrapa Amazônia Ocidental


Prof. Dr. GENILSON PEREIRA SANTANA
Universidade Federal do Amazonas


Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FRANCO TUCCI
Universidade Federal do Amazonas


Prof. Dr. ARLDE FREITAS HIDALGO
Universidade Federal do Amazonas

OFEREÇO

A Deus, porque é dele a vitória alcançada em minha vida, e à minha mãe do céu, Nossa Senhora.

À minha amada irmã Ada Kalene Benlolo Barbosa, com todo meu carinho e saudade.

DEDICATÓRIA

Aos meus amados pais, Marcos Barbosa e Neuza Benlolo, pelos cuidados e amor ofertados, por serem os meus maiores incentivadores na luta por um futuro digno e pelos esforços para a formação de filhas fortes, honestas e independentes.

Às minhas queridas irmãs e amigas, Ada, Tássia e Naima, pelo carinho, ajuda, união e por compartilharem comigo todos os momentos de minha vida.

Às minhas queridas sobrinhas, pelos momentos de muito carinho e descontração.

E nós rogamos ao Pai...

“E gratos somos por nos enviar o seu Espírito Santo consolador, para que fique conosco para sempre” (João 14:16).

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Amazonas, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola e Solos, pela oportunidade e apoio concedidos para realização do doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão de bolsa de estudo.

Ao professor Dr. José Zilton Lopes Santos, meu orientador, mais que agradecimento, devo-lhe imensa consideração pela orientação e pelo préstimo empenhado para a concretização deste trabalho. Bem como, pela amizade e por ser um grande motivador para minha qualificação.

Aos professores Drs. Afrânio Ferreira Neves Junior, Ari de Freitas Hidalgo, Fábio Jabobs Dias, Genilson Pereira Santana e José Ferreira da Silva, por disponibilizarem laboratórios e equipamentos para realização das análises.

Ao professor Dr. Carlos Alberto Franco Tucci, por ser um dos principais responsáveis por aguçar os meus anseios em almejar desenvoltura técnica.

Aos amigos Silvio, Daiana, Jaisson e Jolemia, pelo privilégio da amizade, companheirismo e pela ajuda em todas as etapas deste doutorado.

A todos os colegas e amigos da Pós-Graduação que de alguma forma me ajudaram e pela satisfação do convívio no dia a dia.

À equipe de Nutrição Mineral de Plantas, pela amizade e grande ajuda na condução do experimento e nas análises laboratoriais.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO GERAL	10
2. OBJETIVOS	14
3. ESQUEMA GERAL DA TESE	15
4. REFERÊNCIAS	16
CAPÍTULO 1: MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA DE DIFERENTES SOLOS DA AMAZÔNIA CENTRAL	19
RESUMO	19
ABSTRACT	20
1. INTRODUÇÃO	21
2. MATERIAL E MÉTODOS	25
2.1. Descrição da área de estudo	25
2.2. Procedimentos específicos	26
2.3. Análise dos dados	28
3. RESULTADOS	29
3.1. Atributos químicos e granulométricos dos solos	29
2. Mineralogia da fração argila	31
4. DISCUSSÃO	36
4.1. Atributos químicos e granulométricos dos solos	36
4.2. Mineralogia da fração argila	38
5. CONCLUSÕES	46
6. REFERÊNCIAS	47
CAPÍTULO 2: INTERAÇÃO ENTRE TEMPO DE CONTATO FÓSFORO-SOLO E TIPO DE SOLO: DISPONIBILIDADE DE P E CRESCIMENTO DO SORGO	55
RESUMO	55
ABSTRACT	56
1. INTRODUÇÃO	57
2. MATERIAL E MÉTODOS	59
2.1. Solos e condições de crescimento das plantas	59
2.2. Delineamento experimental e tratamentos	59
2.3. Procedimentos específicos	60

2.4. Avaliação do experimento	62
2.5. Análise dos dados	63
3. RESULTADOS	63
3.1. Disponibilidade de fósforo no solo.....	63
3.2. Teor foliar de fósforo nas plantas de sorgo	65
3.3. Crescimento das plantas	67
4. DISCUSSÃO	70
4.1. Disponibilidade de fósforo no solo.....	70
4.2. Teor foliar de fósforo nas plantas de sorgo	73
4.3. Crescimento das plantas	76
5. CONCLUSÕES	79
6. REFERÊNCIAS	80
CONCLUSÕES GERAIS	84

RESUMO GERAL

A interação do elemento fósforo (P) com solo é um dos temas mais estudados na ciência do solo. Isto se deve à sua dinâmica complexa, especialmente em solos do trópico úmido, com alto grau de desenvolvimento e atributos que acarretam na baixa eficiência da fertilização fosfatada. Todavia, essas características podem variar de acordo com as peculiaridades de cada região, e, conseqüentemente, podem exigir um manejo da adubação diferenciado. Objetivo 1: Caracterizar a mineralogia da fração argila da camada arável de solos de terra firme da Amazônia Central, procurando estabelecer suas relações com a dinâmica de P nesses solos. Objetivo 2: Avaliar o efeito da interação do tempo de contato de uma fonte de fósforo solúvel com 10 solos de terra firme da Amazônia Central, sobre a disponibilidade de P. Os minerais predominantes nos solos estudados são caulinita, goethita e hematita, porém os teores de minerais, cristalografia, área de superfície específica, grau de substituição isomórfica e teores de ferro pedogenético foram bastante distintos entre os solos. Sugerindo que estes respondam de maneira diferenciada a adubação fosfatada. A disponibilidade de P é maior nos menores tempos de contato fosfato-solo, enquanto que a absorção de P e a produção de matéria seca das plantas de sorgo foram mais elevadas nos maiores tempos de contato fosfato-solo.

Palavras chave: minerais silicatados, óxidos, tempo de incubação, trópico úmido.

ABSTRACT

The interaction of the element phosphorus (P) with soil is one of the most studied subjects in soil science. This is due to its complex dynamics, especially in moist tropic soils with a high degree of development that lead to the low efficiency of phosphate fertilization. However, these characteristics can vary according to the peculiarities of each region, and, consequently, may require a management differentiated of P fertilization. Objective 1: To characterize the mineralogy of clay fraction of the arable layer of dryland of Central Amazonia, trying to establish its relations with the dynamics of P in these soils. Objective 2: To evaluate the effect of the interaction between the contact time of a source of soluble phosphorus with 10 dry land soils of central Amazonia on the availability of phosphorus. The predominant minerals in the studied soils are kaolinite, goethite and hematite, but the mineral content, crystallography, specific surface area, degree of isomorphic substitution, and levels of pedogenetic iron were quite different among soils. It is suggested that they respond differently to phosphate fertilization. P availability was higher at lower contact times of soil with phosphate, while P uptake and dry matter yield of sorghum plants were higher at the contact times.

Index terms: silicate minerals, oxides, incubation time, humid tropics.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Estado do Amazonas é composto por diferentes classes de solos, sendo aquelas com maior predominância os Argissolos (45%) e Latossolos (26%), seguidos por Gleissolos Háplicos e Neossolos Flúvicos (9%), Espodossolos (7%), Plintossolos (3,5%) e outras classes com menor predominância, como os Cambissolos (MAIA e MARMO, 2010). Em relação ao ambiente de terra firme, os Latossolos e Argissolos são os mais explorados com fins agrícolas na região. Esses solos são altamente intemperizados e sua fração argila é dominada por minerais silicatados 1:1 (caulinita), óxidos, hidróxidos e oxidróxidos de ferro (Fe), alumínio (Al) e manganês (Mn) (CAMPOS et al. 2016).

Devido a essa mineralogia, esses solos apresentam cargas dependentes do pH, baixa capacidade de retenção e baixa reserva de nutrientes, alto ponto de carga zero (PCZ), alta adsorção de fósforo (P) e elevada acidez (VAN RANST, 1995). Em relação ao P este se liga à superfície dos minerais de argila e aos óxidos de Fe e Al, essa ligação pode ocorrer fracamente, por forças eletrostáticas ou fortemente por ligação tipo covalente (LAIR et al., 2009). Pode ocorrer, também, reações de precipitação, que constitui-se na reação do íon fosfato com o Al ou o Fe, em solução, levando à formação de uma nova fase ou composto de baixa solubilidade no solo (NOVAIS et al., 2007).

Dependendo da constituição mineralógica dos solos e do estado cristalográfico dos minerais, pode haver uma adsorção de até 85% do fosfato aplicado nos solos (GÉRARD, 2016). No caso específico dos solos predominantes na região central da Amazônia, devido à escassez do P no material de origem e a reatividade deste elemento com a mineralogia, 90% dos solos são considerados deficientes em P (SÁNCHEZ e SALINAS, 1981; SÁNCHEZ, 1989).

A alta reatividade do P com solos tropicais altamente intemperizados associadas ao fato do P ser o nutriente com o maior impacto econômico sobre a produção agrícola,

traz como consequência a baixa produção de matéria seca por kg de nutriente aplicado (BROGGI et al., 2009). Isto contribui para maciça adubação fosfatada desde a década de 40, visando garantir a alta produção das culturas. Em função disso, tem surgido preocupações com a gestão do P nos solos, pois alguns aspectos devem ser levados em consideração: mesmo em regiões tropicais os solos apresentam potenciais diferenciados para reter o P; as fontes são finitas e altas doses podem ocasionar desequilíbrios ambientes como a eutrofização (CORDELL et al., 2009).

O grau da interação entre fosfato e minerais dos solos pode ser medido através da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) (OLSEN e WATANABE, 1957) ou fósforo remanescente (P-rem) (ALVAREZ e FONSECA, 1990), ambos fornecem informações sobre o requerimento de fertilizantes fosfatados. Em estudo realizado por Souza Júnior et al. (2007) em solos do Estado de Minas Gerais, houve maior adsorção de P naqueles solos que apresentaram o maior teor de óxidos Fe e Al.

Em um trabalho realizado por Tucci (1991), em diferentes classes de solos do Estado do Amazonas, mostrou a presença de minerais como a caulinita e goethita na fração argila desses solos, sendo a CMAP dos solos considerada baixa ($<1000 \text{ mg dm}^{-3}$) de acordo com Curi et al. (1988). Resultados semelhantes foram observados por Falcão e Silva (2004) que encontraram valores de CMAP variando entre 297 a 888 mg dm^{-3} de argila, e segundo estes autores, podem indicar a influência do teor de argila e dos componentes mineralógicos atuando no processo de adsorção de P. Por outro lado, valores de CMAP variando de 210 a 2170 mg dm^{-3} foi observado por Lima (2001) em solos da região, em estudo de adsorção de P em diferentes ordens de solos do estado do Amazonas.

De modo geral, os resultados encontrados até o momento mostram uma certa divergência sobre a capacidade real desses solos em reter o P, portanto, indicam a necessidade de novos estudos mais detalhados com os atributos do solo que mais

influenciam a adsorção de P. Entre eles destacam-se o grau de cristalinidade dos minerais, área de superfície específica e grau de substituição isomórfica sofrido pelos minerais de argila. Segundo Schwertmann e Herbillon (1992) os cristais de caulinita de solos tropicais podem ser muito pequenos comparados a caulinita clássica e consequentemente, contribuem para a elevação da área de superfície específica, com valores que podem variar de 100 a 250 m² g⁻¹.

Como a área de superfície específica está relacionada com a espessura do cristal do mineral, consequentemente isto afeta a adsorção de P nesses minerais (VAN RANST, 1995). Este autor enfatiza que caulinitas formadas em ambientes ricos em ferro, típico do trópico úmido, incorporarão algum teor de Fe na sua estrutura, o que vai influenciar na sua cristalografia, consequentemente mantendo-a mais ativa. De acordo com Fox e Sedarle (1978), a ordem preferencial de adsorção de P em função da composição e mineralogia do solos tropicais é quartzo < alumínio na matéria orgânica < argilas 2:1 < argilas 1:1 < óxidos cristalinos de Fe e Al < óxidos amorfos de Fe e Al.

Por outro lado, é importante que se avalie o tempo em que o P proveniente de uma fonte solúvel aplicada ao solo fica disponível para as plantas (GONÇALVES et al., 1989). Tal conhecimento pode auxiliar a escolha de um cronograma mais racional de adubação fosfatada. Pois, tanto a adsorção inicial quanto as transformações subsequentes determinam o tamanho e a disponibilidade do compartimento de P-lábil no solo (TIESSEN et al., 1984).

Apesar de existirem estudos que abordam o comportamento do P no solo tanto em regiões subtropicais e tropicais (BAHIA FILHO et al., 1982; GONÇALVES et al., 1989; VALLADARES et al., 2003), os mesmos foram desenvolvidos onde o tipo de solo e o clima são muito diferentes da região central da Amazônia. E, muito ainda necessita ser compreendido quanto as formas inorgânicas que contribuem para a disponibilização de P para as plantas, os processos que ocorrem no solo após a aplicação de fertilizantes

fosfatados e o tempo que esse nutriente reage no solo que o torna indisponível para as plantas, bem como os fatores que regem o retorno deste nutriente à solução.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Caracterizar a mineralogia da fração argila e verificar a influência desta sobre o potencial de adsorção de fósforo. Avaliar a disponibilidade de P em função do tempo de contato fosfato-solo em diferentes solos de terra firme da Amazônia central.

2.2. Específicos

- a) Caracterizar qualitativamente e quantitativamente a mineralogia de diferentes solos de terra firme da Amazônia Central.
- b) Caracterizar os solos quanto ao potencial de adsorção de fósforo através da cristalografia obtida por difratometria de raios X.
- c) Avaliar o efeito da interação entre solo e tempo de contato fosfato-solo na disponibilidade de P no solo, no estado nutricional e produção de matéria seca de plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* L.).

3. ESQUEMA GERAL DA TESE

3.1. CAPÍTULO 1: Mineralogia da fração argila de diferentes solos da Amazônia Central

Caracterização química, granulométrica e mineralógica de dez Latossolos característicos da terra firme da Amazônia Central. Investigar a relação entre a mineralogia da fração argila e o potencial de adsorção de P, por esses solos.

3.2. CAPÍTULO 2: Influência do tempo de contato do fósforo com o solo sobre sua disponibilidade e crescimento do sorgo

Avaliou-se a interação de uma fonte de fósforo solúvel com diferentes tempos de contato (0, 15, 30, 60 e 120 dias) com dez Latossolos característicos de terra firme da Amazônia Central. O comportamento do P no solo foi avaliado com base no extrator resina, na absorção e produção de matéria seca de plantas de sorgo, cultivadas por 50 dias em casa de vegetação.

4. REFERÊNCIAS

ALVAREZ, V. V. H. e FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios de casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 48-55, 1990.

BAHIA FILHO, A. F. C.; VASCONCELLOS, C. A.; SANTOS, H. L.; MENDES, J. F.; PITTA, G. V. E.; OLIVEIRA, A. C. Formas de fósforo inorgânico e fósforo disponível em um Latossolo Vermelho-Escuro, fertilizado com diferentes fosfatos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, n. 1, p. 99-104, 1982.

BROGGI, F.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A. Adsorption and chemical extraction of phosphorus as a function of soil incubation time. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 32–38, jan. 2010.

CAMPOS, M.; ANTONANGELO, J. A.; ALLEONI, L. R. F. Phosphorus sorption index in humid tropical soils. **Soil & Tillage Research**, v. 156, p. 110–118, mar. 2016.

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

CURI, N.; CAMARGO, A. O.; GUEDES, G. A. A.; SILVEIRA, J. V. Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil Sudeste e Sul. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., 1988. Anais... Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, p. 267-282, 1988.

FALCÃO, N. P. S. e SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 34, n. 3, p. 337-342, jul/set. 2004.

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

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.

GONÇALVES, J. L. M.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; RIBEIRO, A. C. Cinética de transformação de fósforo-lábil em não-lábil, em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v. 3, p. 13-24, 1989.

LAIR, G. J.; ZEHETNER, F.; KHAN, Z. H.; GERZABEK, M. H. Phosphorus sorption desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River. **Geoderma**, v. 149, p. 39-44, 2009.

LIMA, H. N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001. 176 f.

MAIA, M. A. M. e MARMO, J. L. **Geodiversidade do estado do Amazonas**. CPRM, Manaus, 2010, 275p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. eds. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, pp. 471-450, 2007.

OLSEN, E. R. e WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. **Soil Science Society of America Journal**, v. 21, n. 2, p. 144-149, jun. 1956.

SANCHEZ, P. A. **Soils**. In Tropical Rain Forest Ecosystems: Biogeographical and Ecological Studies. Eds. LIETH, H. e WERGER, M. J. A., Elsevier, Amsterdam. pp. 73-88. 1989.

SANCHEZ, P. A. e SALINAS, J. G. Low input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, v. 34, p. 280-406, 1981.

SCHWERTMANN, U. e HERBILLON, A. J. Some aspects of fertility associated with the mineralogy of highly weathered tropical soils. In: LAL, R.; SANCHEZ, P. Myths and science of soils of the tropics. Madison, **Soil Science Society America**, 1992. p.47-59. (Special Publ. n.29).

SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; SAMBATTI, J. A.; PETERNELE, W. S.; TORMENA, C. A.; MONTES, C. R.; CLEMENTE, C. A. Contribuição dos constituintes da fração argila de solos subtropicais à área superficial específica e à capacidade de troca catiônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p.1355-1365, nov/dez. 2007.

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

TUCCI, C. A. F. **Disponibilidade de fósforo em solos da Amazônia**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1991. 142 f.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. *Bragantia*, v. 62, n. 1, p. 111-118, 2003.

VAN RANST, E. Rational soil management in the humid tropics. **Bull. Séanc. Acad. r. Sci. Outre-Mer Meded. Zitt. K. Acad, overzeese Wet**, v. 40, p. 209-233, 1995.

CAPÍTULO 1: MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA DE DIFERENTES SOLOS DA AMAZÔNIA CENTRAL

RESUMO

A mineralogia é um fator chave que controla as propriedades físico-químicas do solo, afetando adsorção de P e, conseqüentemente, apresenta grande relevância para o manejo da adubação fosfatada. Objetivou-se com o presente estudo avaliar as diferenças de comportamento da adsorção de P, em 10 Latossolos Amarelos da Amazônia central, coletados sob mata nativa. Verificamos que os minerais predominantes são caulinita, goethita e hematita. Os teores de minerais, cristalografia, área de superfície específica, grau de substituição isomórfica e teores de ferro pedogenético foram distintos entre os solos. O que sugere que os solos se comportem de maneira diferenciada a adubação fosfatada.

Palavras chave: goethita, hematita, caulinita, fósforo, trópico úmido.

ABSTRACT

The mineralogy is a key factor that controls the physical-chemical properties of the soil, affecting P adsorption and consequently presents great relevance for the management of phosphate fertilization. The present study aimed to evaluate the behavioral differences of P adsorption in 10 Yellow Latosols of the central Amazon, collected under native forest. We found that the predominant minerals are kaolinite, goethite and hematite. The mineral content, crystallography, specific surface area, degree of isomorphic substitution and levels of pedogenic iron were different among soils. This suggests that these soils behave differently to phosphate fertilization.

Index terms: goethite, hematite, kaolinite, phosphorus, humid tropic.

1. INTRODUÇÃO

Os solos são produtos de intemperismo físico e químico das rochas e suas propriedades dependem de fatores ambientais como clima, material de origem, topografia, drenagem e idade. O solo é um corpo complexo composto principalmente por material mineral, água, ar ou gases e matéria orgânica (SIVAPULLAIAH, 2015).

Os solos constituem o “principal” recurso na produção de alimentos, fibras e combustíveis, além de desempenhar papel central na determinação da qualidade do ambiente (PALM et al., 2007). No entanto, os solos diferem em suas propriedades, o que pode afetar a sua vocação de uso, serviços ecossistêmicos fornecidos, bem como a sua vulnerabilidade e resiliência à degradação (PALM et al., 2007; PAL et al., 2014). Do ponto de vista da produção de alimentos o solo é considerado um fator intrínseco na variação do rendimento das culturas, devido às suas propriedades (PAL et al., 2012).

Um fator intrínseco do solo, responsável pela variação do seu rendimento, especialmente nas atividades agrícolas, está relacionado com a sua composição, com destaque para a sua mineralogia. Neste sentido os constituintes do solo podem ser divididos quanto ao tamanho e atividade química da areia, silte e argila. A areia e silte são considerados fragmentos de rochas e são quimicamente inertes (SIVAPULLAIAH, 2015). Por outro lado, as argilas constituem a fração mais fina e expressa forças físico-químicas (SIVAPULLAIAH, 2015). A argila é um dos principais constituintes que controla as propriedades do solo, e é constituída por partículas com diâmetro inferior a 2μ (DIXON, 1991).

Segundo Pal et al. (2012) apesar da ampla evidência de que a quantidade de argila em um solo tem uma importante relação com a sua gênese, características e propriedades físicas e químicas, é de extrema importância compreender o tipo de mineral e suas propriedades nos solos. Uma importante parte da atividade agrícola no ambiente de terra firme na região central

da Amazônia, ocorre principalmente sobre Latossolos e Argissolos, dada a sua predominância nessa região (MAIA e MARMO, 2010).

Esses solos são caracterizados como altamente intemperizados e apresentam argila de atividade baixa ($< 27\text{cmol}_c\text{ kg}^{-1}$), onde predominam minerais silicatados do tipo 1:1 e oxihidróxidos de Fe e Al, sendo que a proporção desses minerais podem variar, dependendo do material de origem e intensidade de intemperismo (SCHAEFFER et al., 2008).

A mineralogia de um solo é fator chave que controla propriedades importantes para o manejo do solo. Palm (2007) destaca que a mineralogia da fração argila desses solos desempenham importantes benefícios, pois as cargas na superfície dos minerais ao adsorver tanto substâncias não tóxicas, e, principalmente aquelas tóxicas permitem que essas substâncias se tornem inertes.

Dessa forma o solo funciona como filtro, contribuindo para a melhoria da qualidade da água na superfície e principalmente na subsuperfície. A mineralogia da fração argila dos solos também desempenha importante efeito sobre a dispersão de argila, consequentemente na agregação do solo, afetando a sedimentação, formação de enxurradas e perdas superficiais do solo (SINGER, 1994; LADO e BEN-HUR, 2004).

Por outro lado, esses solos formados no trópico quente e úmido são considerados como limitantes ao crescimento e ao alcance de produtividades adequadas das plantas (ALEVA, 1994), devido à alta toxidade por Al (SEHGAL, 1998), sua mineralogia constituída principalmente por caulinita e oxihidróxidos de Fe e Al (SCHWERTMANN e HERBILLON, 1992). Essa mineralogia promove uma baixa capacidade de retenção de nutrientes, alto ponto de carga zero (PCZ), baixas reservas de nutrientes e alta adsorção de P (VAN RANST, 1995).

Esse processo tem como causa as características específicas do material de origem ou a forte sorção que ocorre entre o fosfato (PO_4^{3-}) e os óxi-hidroxidos de Fe (goethita e hematita) e óxidos de Al (gibbsita). O qual transforma uma grande parte do P total em formas não

disponíveis (SOLOMON et al., 2002), contribuindo para uma grande deficiência de P nesses solos. Segundo Gérard (2016), a adsorção de P sobre minerais de argila silicatadas pode ser próxima ou mesmo maior que a dos oxihidróxidos de Fe e Al, dependendo da área de superfície específica desses constituintes do solo.

Segundo Schwertmann e Herbillon (1992) os cristais de caulinita de solos tropicais geralmente se constituem por partículas menores e contribuem para a elevação da área de superfície específica que pode atingir 100 a 250 m² g⁻¹. Esses valores são muito maiores em comparação com a área superficial específica de 5 a 10 m² g⁻¹ que classicamente lhe são atribuídos (AZEVEDO e BONUMÁ, 2004).

Como a área de superfície específica está relacionado com a espessura do cristal do mineral (VAN RANST, 1995), consequentemente isto afetará a adsorção de P nesses minerais. Este mesmo autor enfatiza que caulinitas formadas em ambientes ricos em Fe, típico do trópico úmido, incorporará algum teor deste elemento na sua estrutura, o que vai influenciar na sua cristalografia e consequentemente mantendo-a mais ativa.

Dada essa reatividade do P com os constituintes dos solos (especialmente aqueles tropicais) e considerando que este elemento é um dos principais nutrientes para as plantas, os fertilizantes fosfatados constituem um componente fundamental usado na agricultura com o propósito de melhorar o rendimento das culturas. No entanto, a aplicação de altas doses destes fertilizantes, associado a ausência de conhecimento da reação do P com os constituintes mineralógicos dos solos podem trazer baixa eficiência econômica da adubação fosfatada, além de danos ambientais, uma vez que o fosfato é o principal responsável pela eutrofização.

Estudos realizados em solos de diferentes classes, provenientes da região central da Amazônia (TUCCI, 1991; LIMA, 2001; GARCIA et al., 2013; MOREIRA, 2016) demonstram a presença predominante de caulinita, comparativamente a outros minerais da fração argila. Apesar da imensa contribuição desses trabalhos para a região, os mesmos não

relacionaram as propriedades específicas dos minerais presentes com o potencial de adsorção de P e a importância relativa de cada constituinte que rege o comportamento do P no solo ainda é incerta.

Objetivou-se com este estudo caracterizar a mineralogia da fração argila da camada arável de solos de terra firme da Amazônia Central, procurando estabelecer suas relações com a dinâmica de P nesses solos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de estudo

As unidades geológicas das áreas de coleta são constituídas principalmente pela formação Alter do Chão, composta por sedimentos de natureza diversa, do período Cretáceo (RODRIGUES et al., 1996), sendo o sedimento argilo-arenoso do cretáceo superior (CORRÊA et al., 2008), cuja composição do material de origem não é conhecida (IRON, 1978). O relevo mais comum é o dissecado em tabuleiros, vindo a seguir as colinas que margeiam os lagos ou planícies com cotas variando de 50 a 200 m (RODRIGUES et al., 1996).

O clima predominante na região é tropical equatorial, grupo Af, com regime pluviométrico anual de aproximadamente 2.420 mm, sendo o mês mais seco (agosto) com precipitação média de 80 mm, conforme classificação climatológica de Köppen-Geiger (ALVARES et al., 2013). O regime térmico da região caracteriza-se por apresentar temperaturas médias de 26,7° C com variação sazonal de 25,9 a 27,7° C (ALVARES et al., 2013), com umidade relativa do ar normalmente superior a 64%, com média anual em torno de 80% (BASTOS, 1972).

A ordem de solo predominante, na região de coleta, é o Latossolo Amarelo seguido pela Argissolo Amarelo (BRASIL, 1976). Os constituintes desses solos estão expostos há mais ou menos 20 milhões de anos de intemperismo (IRON, 1978), fato que tem contribuído para que aproximadamente 85% desses solos sejam fortemente ácidos (BALIGAR et al., 2001), onde P em níveis de deficiência e Al em níveis tóxicos coexistem (CHEN et al., 2012), porém apresentam boas condições físicas, especialmente os Latossolos (MAIA e MARMO, 2010).

A vegetação natural é exuberante, composta por árvores robustas e de grande porte, caracterizada como floresta ombrófila densa e/ou aberta (Floresta Amazônica) (RODRIGUES et al., 1996).

2.2. Procedimentos específicos

2.2.1. Seleção dos locais de coleta e preparação das amostras

A seleção dos locais foi feita procurando abranger ampla faixa de solos que já vem sendo explorados com fins agrícolas na região e que entre 80 e 100% dos locais apresentem solos com P-Melich 1 inferior a 5 mg kg⁻¹ (LEHMANN et al., 2001).

Foram utilizadas amostras de dez Latossolos Amarelos distróficos, provenientes de matas de terra firme (PANDOLFO, 1978), localizadas na Amazônia central (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação dos solos em função da classe textural e localização de coleta.

Solo*	Município	Coordenadas geográficas
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1)	Iranduba	03° 12' 01" S e 60° 13' 01" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2)	Presidente Figueiredo	02° 39' 15" S e 60° 03' 19" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1)	Itacoatiara	02° 55' 51" S e 59° 09' 06" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2)	Manacapuru	03° 15' 17" S e 60° 39' 28" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3)	Iranduba	03° 12' 22" S e 60° 09' 47" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4)	Manaus	03° 06' 11" S e 59° 58' 32" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1)	Manacapuru	03° 06' 02" S e 59° 58' 28" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2)	Rio Preto da Eva	02° 42' 37" S e 59° 26' 17" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3)	Presidente Figueiredo	01° 25' 18" S e 60° 15' 20" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4)	Manaus	02° 39' 41,4" S e 60° 07' 57,5" W

*Brasil (1976)

A coleta foi efetuada na camada superficial 0-20 cm de profundidade, em único ponto, sob vegetação nativa (floresta ombrófila densa e/ou aberta), onde os solos estavam mais preservados e mantinham suas características físicas e químicas originais. Após a coleta, as amostras de solos foram destorroadas, homogeneizadas, secas à sombra e subamostras foram passadas em peneira de 2,0 mm de abertura para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

2.2.2. Caracterização química dos solos

Os solos foram caracterizados quimicamente conforme Embrapa (2009) e granulometricamente de acordo com Bouyoucos (1927) e modificado por Carvalho (1985). Utilizando o agitador de Wagner com agitação por 16 horas a 30 rpm, sendo a fração areia (2 - 0,053 mm) separada através de tamisação.

2.2.3. Análises mineralógicas

Os minerais da fração argila hematita (Hm), goethita (Gt), caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) foram caracterizados por difratometria de raio-X (DRX) pelo método do pó após a concentração dos óxidos de ferro fervendo a fração argila com NaOH (NORRISH e TAYLOR, 1961) e desferrificação da fração argila pelo método de Mehra e Jackson (1960). As amostras foram difratadas com velocidade de varredura de $1^\circ 2\theta \text{ min}^{-1}$ utilizando Mini-Flex Rigaku II (20mA, 30 kV), equipado com radiação Cu K α .

A razão Hm/(Gt+Hm) foi estimada comparando as áreas dos picos obtidos da Hm/(Gt+Hm) DRX com as proporções das relações obtidas a partir de misturas padrão Gt-Hm. As porcentagens de Hm e Gt foram calculadas alocando-se a diferença entre Fe ditionito (Fed) e Fe oxalato (Feo) a estes óxidos. A razão Ct/(Ct+Gb) foi calculada utilizando as áreas dos picos dos reflexos Gb (002) e Ct (001). O cálculo do teor de substituição isomórfica (SI) do Fe pelo Al na Gt foi obtido utilizando a equação $\text{molAl}\% = 1730 - 572.c$ (SCHULZE e SCHWERTMANN, 1984). Já para o cálculo do teor de SI do Fe pelo Al na Hm, foi utilizada a equação $\text{molAl}\% = 3098,8 - 615,12.a_0$ (SCHWERTMANN et al., 1979).

A área de superfície específica (ASE) da Gt foi estimada pela equação $\text{ASE(Gt)} = (1049/\text{DMC gt } 100) - 5 \text{ (m}^2 \text{ g}^{-1})$, segundo Schulze e Schwertmann (1984), $\text{DMC}_{100} = \text{DMC}_{(110)} \times 0,42 \text{ nm}$ (KÄMPF, 1981) enquanto a ASE da Hm foi obtida pela equação $\text{ASE(Hm)} = 2 \times (r+h) \times d \text{ (m}^2 \text{ g}^{-1})$ de acordo com (SCHWERTMANN e KÄMPF, 1985). O diâmetro

médio do cristal (DMC) da Hm e Gt foi calculado a partir da Largura à meia altura (LMA) e da posição dos reflexos dos minerais utilizando a equação de Scherrer (SCHULZE, 1984).

2.2.4. Determinação dos teores de ferro pedogenético

Os óxidos de Fe pedogênicos referentes à forma cristalina (Fed) foram extraídos com solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), conforme Mehra e Jackson (1960); os óxidos de Fe pedogênicos relativos às formas de baixa cristalinidade (Feo) foram extraídos com solução de oxalato de amônio a $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 3,0, no escuro (SCHWERTMANN, 1964). Os teores de óxidos de Fe solubilizados foram determinados por absorbância no espectrofotômetro (espectrofotômetro Micronal[®] modelo B-580) a 518 nm.

2.3. Análise dos dados

A interpretação dos dados foi feita com base na observação dos difratogramas e comparando com os valores absolutos de cada variável analisada (CORRÊA et al., 2008).

3. RESULTADOS

3.1. Atributos químicos e granulométricos dos solos

A interpretação dos resultados, quanto aos atributos químicos dos solos, foi realizada conforme a CFSEMG (1999). Os solos encontram-se na condição de acidez ativa muito elevada ($\text{pH H}_2\text{O} < 4,5$), acidez trocável elevada ($\text{Al}^{3+} > 1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e saturação por alumínio muito alta ($\text{m}\% > 50\%$) (Tabela 2).

Com relação a disponibilidade de P, sua interpretação é feita com base na classe textural do solo ou no P-rem (CFSEMG, 1999). Dessa forma, solos de textura média, argilosa ou muito argilosa e com menos de $5,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de P, como aqueles do presente estudo, são considerados com baixa fertilidade quanto a este elemento.

Tabela 2. Atributos químicos e granulométricos dos solos utilizados no estudo, 0-20 cm de profundidade.

Solo	pH (H_2O)	P mg dm^{-3}	Al^{+3} -- $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ --	H+Al	T	V	m	P-rem mg L^{-1}	M.O.S	Areia ----- dag kg^{-1} -----	Silte	Argila
LAdm1	4,1	2,30	1,40	10,99	11,22	2,01	85,89	22,22	2,48	77	1	22
LAdm2	4,4	1,42	0,80	4,40	4,26	5,18	78,43	18,88	1,18	69	9	22
LAda1	4,2	1,42	1,20	8,80	9,02	2,44	84,51	17,11	1,87	61	3	36
LAda2	4,4	3,21	1,40	9,83	10,17	3,35	80,46	12,53	2,61	61	3	36
LAda3	4,0	2,60	1,60	10,99	11,22	2,06	87,43	17,11	2,48	56	5	39
LAda4	3,9	2,91	1,40	9,83	10,17	3,30	80,46	15,49	1,87	37	8	55
LAdma1	4,7	5,81	1,80	12,28	13,33	7,89	63,16	5,47	3,28	32	6	62
LAdma2	4,1	2,60	1,20	8,80	9,13	3,57	78,43	17,71	1,64	22	11	67
LAdma3	4,1	2,00	1,20	8,80	9,03	2,50	83,92	5,79	2,11	5	21	74
LAdma4	4,4	1,71	1,10	5,05	5,50	8,21	70,97	17,71	1,64	15	3	82

LAdm: Latossolo Amarelo Distrófico textura média; LAda: Latossolo Amarelo Distrófico textura argilosa; LAdma: Latossolo Amarelo Distrófico textura muito argilosa; P: Mehlich-1; Al^{+3} : Acidez trocável; H+Al: Acidez potencial; T: capacidade de troca cátions total; V: Saturação por bases; m: Saturação por alumínio; P-rem: fósforo remanescente e M.O.S.: matéria orgânica do solo.

A acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) que está estreitamente relacionada com poder tampão do solo (KEENEY e COREY, 1963; RAIJ et al., 1984; AITKEN et al., 1990; HUSNI et al., 1995) variou entre 4,4 a $12,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. O solo LAdm2 apresentou acidez potencial média (2,51 a

5,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) enquanto os demais enquadram-se na faixa de acidez potencial alta (5,01 a 9,0 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) a muita alta ($> 9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), conforme CFSEMG (1999) (Tabela 2).

A capacidade de troca catiônica a pH 7,0 foi variável entre os solos, alcançando valores de 4,26 a 13,33 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Os solos LAdm2 e LAdma4 proporcionaram os menores valores 4,26 e 5,5 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente (Tabela 2). De modo geral, todos os solos apresentaram baixa CTC ($< 27 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), caracterizando-se como argilas de atividade baixa (EMBRAPA, 2006).

O valor de P remanescente (P-rem), que dá a indicação do potencial de retenção de fosfato no solo (VALLADARES et al., 2003) e está estreitamente relacionado com a textura do solo (SOUZA et al., 2006), variou de 5,47 a 22,22 mg L^{-1} , entre os solos. O solo LAdm1 apresentou o maior valor, 22,22 mg L^{-1} , enquanto que os menores valores foram observados nos solos LAdma1 e LAdma3 (5,47 e 5,79 mg L^{-1}), sendo estes últimos classificados como alto potencial de adsorção de P (WADT e SILVA, 2011). Interessante observar que apesar dos solos LAdma2 e LAdma4 estarem no grupo de solos com textura muito argilosa, os mesmos não estão entre aqueles com maior potencial de adsorção de P (P-rem variando de 0 - 10 mg L^{-1}).

Os teores de matéria orgânica do solo (M.O.S) variam de 1,18 a 3,28 dag kg^{-1} , sendo os solos LAdm2, LAda1, LAda4, LAdma2 e LAdma4 classificados na faixa de baixo (0,71-2,0 dag kg^{-1}) teor de M.O.S e enquanto os demais se enquadraram na faixa de teores médios (2-4 dag kg^{-1}) (Tabela 2).

Quanto à granulometria dos solos, verifica-se que os teores de argila variaram entre 22 a 82 % entre os solos. Os solos LAdm1 e 2 enquadram-se na classe textura média (15 a 36% de argila), os solos LAda1, 2, 3 e 4 apresentam textura argilosa (36 a 60% de argila) e LAdma1, 2, 3 e 4 textura muito argilosa ($> 60\%$ de argila) (Tabela 2), sendo a maioria dos solos agrupados na classe textura argilosa e muito argilosa (EMBRAPA, 2006).

3.2. Mineralogia da fração argila

Os minerais predominantes na fração argila dos solos foram a caulinita (Ct), goethita (Gt) e hematita (Hm) (Figuras 1 e 2). O caráter caulinitico foi predominante em todas as amostras analisadas, com picos intensos e característicos de caulinita (0,732 nm) (Figura 1). Quanto à gibbsita (Gb) não foram detectados picos desse mineral nas amostras analisadas. Como a análise de difratometria é apenas qualitativa, não foi possível avaliar os teores de Ct presentes em cada solo.

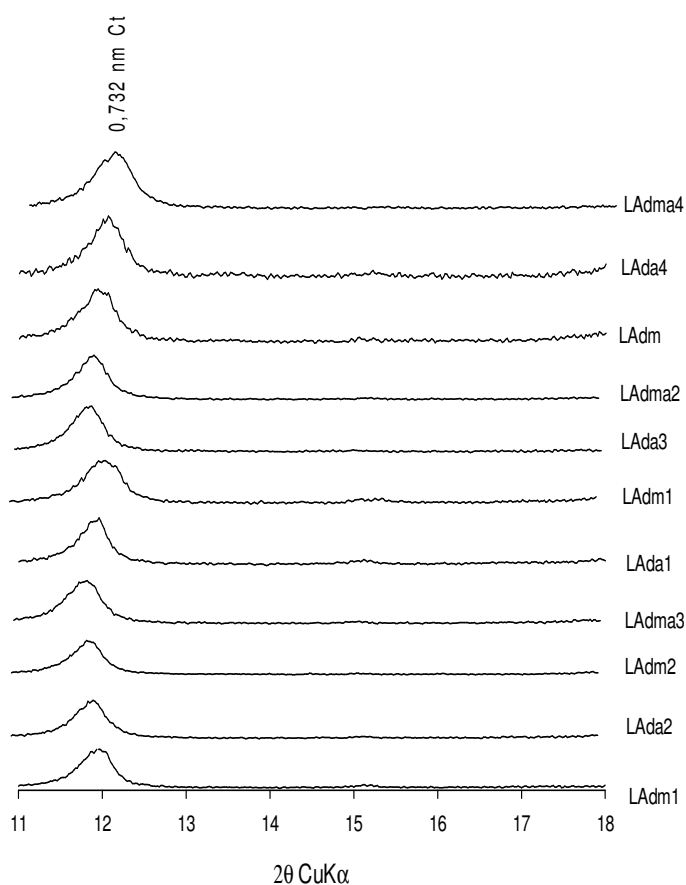


Figura 1. Difratogramas de raios-X padrões de pó de amostras sem ferro, mostrando a variação na posição de reflexões de caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) nos Latossolos Amarelos Distróficos textura média (LAdm1 e LAdm2); Latossolos Amarelos Distróficos textura argilosa (LAda1, LAda2, LAda3 e LAda4); Latossolos Amarelos Distróficos textura muito argilosa (LAdma1, LAdma2, LAdma3 e LAdma4); e LAdm (dados não apresentados).

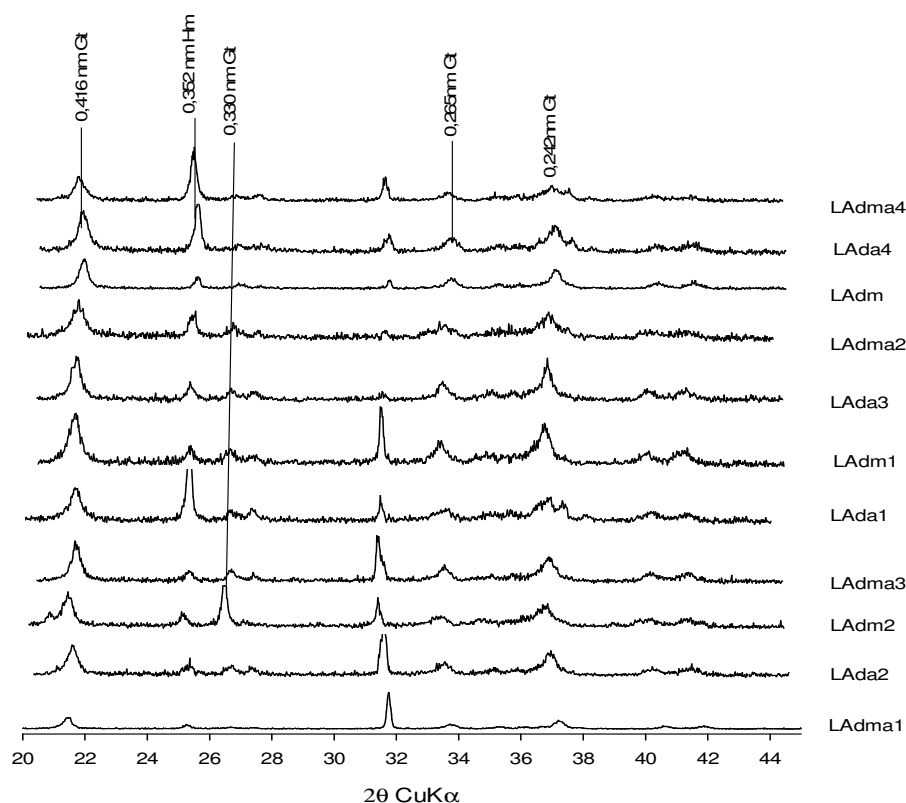


Figura 2. Difratoigramas de raios X de amostras de pó da concentração de óxido de ferro, mostrando a variação na posição das reflexões de Goethita (Gt) e Hematita (Hm) nos Latossolos Amarelos Distróficos textura média (LAdm1 e LAdm2); Latossolos Amarelos Distróficos textura argilosa (LAda1, LAda2, LAda3 e LAda4); Latossolos Amarelos Distróficos textura muito argilosa (LAdma1, LAdma2, LAdma3 e LAdma4); e LAdm (dados não apresentados).

A DRX da fração argila tratada com NaOH (5 mols. L⁻¹) para concentração de óxidos de Fe (COF) (Figura 2) indicou a presença de Gt, sendo evidenciada pelo pico 0,416 nm, para todos os solos, enquanto que a presença de Hm foi evidenciada pelo pico a 0,352 nm.

De modo geral, os maiores valores do mineral (Gt) foram encontrados nos solos LAdm1, LAda3, LAdma1 e LAdm2, em relação aos demais solos. E, estes solos também proporcionaram uma predominância do mineral Gt comparativamente a Hm (Tabela 3). Por outro lado, os menores valores de Gt foram verificados nos solos LAdm2, LAdma3 e LAdma4. Em relação a Hm, o maior valor foi encontrado no solo LAda2, enquanto os solos LAdm1 e LAdma2 proporcionaram os menores valores (Tabela 3). No caso dos solos LAdm2, LAda1, LAda2, LAdma3 e LAdma4 observou-se uma maior quantidade de Hm comparativamente a Gt (Tabela 3). Esse comportamento fica mais evidente quando se avalia a relação Hm (Hm+Gt), indicando que os solos LAdm1, LAdma1 e LAdma2 apresentaram a

menor quantidade de Hm, proporcionalmente a quantidade total dos óxidos de Fe, por outro lado, os solos LAdm2, LAda1, LAda2, LAdma3 e LAdma4 indicam uma maior presença do mineral Hm em comparação aos teores de óxidos totais nesses solos (Tabela 3).

Tabela 3. Teores de goethita (Gt), hematita (Hm) e relação entre Hm/(Hm + Gt), nos solos estudados.

Solo	Gt	Hm	Hm/(Hm + Gt)
	----- g kg ⁻¹ -----		
LAdm1	51,49	5,72	11
LAdm2	5,26	21,29	82
LAda1	16,22	24,64	63
LAda2	14,86	53,37	80
LAda3	49,54	18,55	29
LAda4	13,71	11,52	48
LAdma1	59,74	10,51	16
LAdma2	30,56	3,35	11
LAdma3	8,82	23,39	75
LAdma4	3,62	26,39	89

LAdm: Latossolo Amarelo Distrófico textura média; LAda: Latossolo Amarelo Distrófico textura argilosa; LAdma: Latossolo Amarelo Distrófico textura muito argilosa.

Quanto aos atributos cristalográficos, o diâmetro médio do cristal (DMC) de um mineral fornece informações sobre o hábito de crescimento dos cristais (NETTO, 1996). No presente estudo o DMC (110) da Gt nas amostras variaram de 21,8 a 54,9 nm, sugerindo que estão dentro da faixa do intervalo de frequência relacionado à Gt encontrada em solos tropicais (DICK, 1986; KÄMPF et al., 1988; KER, 1995), enquanto que o DMC (111) variou entre 10,8 e 39,3 nm (Tabela 4).

O DMC (110) da Hm mostrou a amplitude de 14,1 a 40,3 nm, por outro lado, devido a interferências das reflexões de planos, o DMC (111) só foi possível calcular para três solos, com uma amplitude variando de 19,6 a 35,3 nm (Tabela 4). De modo geral, os maiores valores de DMC foram observados no LAdma1, enquanto os menores valores foram observados no LAdma2, independentemente do mineral e do pico de observação (Tabela 4). No entanto, apesar do LAdma1 proporcionar maior valor de DMC tanto para Gt e Hm, independente do pico de observação, nos demais solos o comportamento é dependente do pico observado e também do mineral.

Em relação a área de superfície específica (ASE) da Gt nota-se uma estreita amplitude de variação (40 a 110 m² g⁻¹) (Tabela 4). De modo geral, os solos LAdma2, LAda1 e LAdm1 apresentaram os maiores valores ($\approx$ 98 m² g⁻¹) de ASE, por outro lado, o solo LAdma1 proporcionou o menor valor (40 m² g⁻¹) (Tabela 4). Quanto a Hm, só foi possível determinar a ASE nos solos LAdma2 (109 m² g⁻¹), LAda1 (90 m² g⁻¹) e LAda3 (61 m² g⁻¹) (Tabela 4).

Quanto a substituição isomórfica (SI) do Fe³⁺ por Al³⁺ estimada por DRX e extração química, nas amostras de Gt a SI variou de 23 a 38 mol%, sendo as maiores percentagens de SI observadas nos solos LAdma3 e LAdma4 enquanto os menores valores foram encontrados nos solos LAdm1 e LAdm2 (Tabela 4). Em relação ao mineral Hm, a SI teve uma amplitude de variação entre 17 e 54 mol%, maior de que aquela observada para a Gt, sendo os maiores valores de SI observados nos solos LAdm2 e LAdma4 enquanto os menores valores foram observados nos solos LAdma2 e LAdma3 (Tabela 4).

Interessante observar que nos solos LAdm1, LAdm2, LAda3, LAda4, LAdma4, a SI foi superior na Hm comparativamente aqueles observados na Gt. De modo geral, os resultados tanto de ASE quanto SI mostram uma heterogeneidade quanto as propriedades dos minerais de Fe, na fração argila dos diferentes solos.

Tabela 4. Diâmetro médio do cristal (DMC), área de superfície específica (ASE) e substituição isomórfica (SI) dos minerais goethita (Gt) e hematita (Hm) nos solos estudados.

Solo	DMC				ASE		SI	
	Gt110	Gt111	Hm110	Hm111	Gt	Hm	Gt	Hm
	----- nm -----				-- m ² g ⁻¹ --		-- mol% --	
LAdm1	26,4	29,5	18,2	nd	90	nd	23	41
LAdm2	31,6	14,9	15,2	nd	74	nd	25	53
LAda1	25,1	16,7	14,9	35,3	94	90	37	20
LAda2	27,5	22,3	23,1	nd	86	nd	33	20
LAda3	41,3	31,2	25,3	33,6	55	61	30	32
LAda4	37,1	10,8	20,3	nd	62	nd	33	38
LAdma1	54,9	39,3	40,3	nd	40	nd	27	24
LAdma2	21,8	12,5	14,1	19,6	110	109	26	17
LAdma3	42,6	18,5	20,4	nd	54	nd	38	17
LAdma4	28,4	10,9	26,9	nd	83	nd	38	54

LAdm: Latossolo Amarelo Distrófico textura média; LAda: Latossolo Amarelo Distrófico textura argilosa; LAdma: Latossolo Amarelo Distrófico textura muito argilosa.

De modo geral, a maior parte do Fe livre foi observada na forma cristalizada (Fed) independentemente do tipo de solo (Tabela 5).

Tabela 5. Teores de ferro extraído com ditionito (Fed), ferro extraído com oxalato (Feo) e relação ferro oxalato/ferro ditionito (Feo/Fed) nas amostras de solo estudadas.

Solo	Fed	Feo	Feo/Fed
	----- g kg ⁻¹ -----		
LAdm1	3,78	0,14	0,04
LAdm2	1,97	0,15	0,08
LAda1	2,85	0,11	0,04
LAda2	4,98	0,31	0,06
LAda3	4,66	0,24	0,05
LAda4	1,82	0,15	0,08
LAdma1	4,68	0,19	0,04
LAdma2	2,30	0,14	0,06
LAdma3	2,58	0,39	0,15
LAdma4	2,34	0,27	0,11

LAdm: Latossolo Amarelo Distrófico textura média; LAda: Latossolo Amarelo Distrófico textura argilosa; LAdma: Latossolo Amarelo Distrófico textura muito argilosa.

Os teores de Fe bem cristalizados (Fed) variaram entre os solos estudados, sendo as maiores concentrações (4,66 a 4,98 g kg⁻¹) observados nos solos LAda2, LAda3 e LAdma1. Enquanto os menores valores (1,82 e 1,97 g kg⁻¹) foram encontrados nos solos LAda4 e LAdm2, respectivamente (Tabela 5). Os teores de Fe mal cristalizados (Feo) variaram entre 0,11 a 0,39 g kg⁻¹, sendo os maiores valores apresentados pelos solos LAdma3, LAda2, LAdma4 e LAda3, por outro lado, os solos LAda1, LAdm1 e LAdma2 apresentaram os menores valores.

4. DISCUSSÃO

4.1. Atributos químicos e granulométricos dos solos

Os atributos químicos dos solos como, altas concentrações de H^+ , $H + Al$, Al^{3+} em%, encontram-se na faixa muito alta para a maioria dos solos (Tabela 2). Nessas condições, os valores de pH (<4,5) levam ao aumento das concentrações de íons que são tóxicos às plantas, como o Al^{3+} , Fe^{2+} e H^+ . Além disso, na faixa de pH encontrada nesse estudo (3,9 a 4,7), a absorção de macronutrientes essenciais é prejudicada (SOUZA et al., 2007).

Outro agravante é o fato do ânion $H_2PO_4^-$ formar ligação covalente com cátions Fe^{2+} e Al^{3+} ocasionando a baixa disponibilidade de P, como podemos verificar, em parte, pelos baixos teores de P (Mehlich 1) nos solos estudados (Tabela 2). Baixa fertilidade natural em Latossolos e Argissolos da formação Alter do Chão foram observados por Moreira (2016), provavelmente a composição química do material de origem juntamente com a atividade climática mais ativa na região contribui para a formação de solos mais ácidos, com baixa saturação por bases (V%) e alta saturação por alumínio (m%). Esses processos promovem a remoção de cátions básicos do complexo de troca e substituição dos mesmos por elementos de natureza ácida, como o hidrogênio (H) e o alumínio (Al) (CRAVO, 2012), confirmando o caráter distrófico desses solos.

Com base nos valores de P-rem, os solos LAdma1 e LAdma3 (P-rem - 0 a 10 mg L⁻¹) apresentam alto potencial de adsorção de P; os solos LAdm2, LAda1, LAda2, LAda3, LAda4, LAdma2 e LAdma4 (P-rem - 10 a 20 mg L⁻¹) apresentam potencial médio de adsorção de P e, o solo LAm1 (P-rem - 20 a 30 mg L⁻¹) apresenta baixo potencial de adsorção de P (ALVAREZ et al., 2000; WADT e SILVA, 2011). Provavelmente, essa amplitude dos valores de P-rem está relacionada com a variabilidade das características físico-químicas,

granulométricas e mineralógicas desses solos, indicando que o P-rem é mais dependente da composição de que o teor de argila.

Tucci (1991) estudando os teores de P-rem em solos da região central da Amazônia verificaram valores de 47,2; 34,2; 42,4 e 37,1 mg L⁻¹ em Latossolo Amarelo argiloso, Latossolo Amarelo textura média, Argissolo Vermelho-Amarelo argiloso e Argissolo Vermelho-Amarelo textura média, respectivamente. Por outro lado, Souza et al. (2006), avaliando Latossolos de textura média, argilosa e muito argilosa, do estado de Minas Gerais, observaram valores de P-rem de 24,4; 17,4; e 8,3 mg L⁻¹, respectivamente.

Em relação aos teores de P disponível (P-Melich-1) houve baixa amplitude (1,42 a 5,81 mg dm⁻³). Baixos valores (2,3 a 3,2 mg dm⁻³) de P disponível (extrator resina) foram observados por Tucci (1991). Resultados semelhantes foram observados por Falcão e Silva (2004) e Moreira e Fageria (2009). Portanto, os resultados do presente estudo corroboram com os dados de literatura, que mostram baixa concentração de P em solos ácidos e altamente intemperizados, como aqueles observados sob vegetação de cerrado (LOPES e COX, 1979).

Apesar dos solos do presente estudo estarem localizados na mesma região e consequentemente submetidos às mesmas condições de intemperismo, em um ambiente onde os agentes da meteorização atuam de forma intensa, os solos apresentaram classes texturais diferentes o que provavelmente levará a respostas ao manejo de formas diferentes. De modo geral, esse comportamento evidencia também o efeito da composição do material de origem do qual os solos foram formados (rochas sedimentares, argilitos e siltitos) na formação Alter do Chão (REIS e ALMEIDA, 2006).

No caso específico dos solos de textura média, esse comportamento pode indicar que são formados a partir de arenitos presentes na Formação Alter do Chão ou processos pedogenéticos, como transformação e/ou remoção de argila do perfil do solo (MOREIRA, 2016). Exceto os solos LAdm1 e 2, os demais indicam uma necessidade de maior dose de P,

pois, sendo eles mais argilosos e com maior teor de óxidos de ferro levaria a menor difusão e aumento da adsorção de P (VILLANI et al, 1993), pois entre solos de mineralogia similar a fixação de P aumenta com o acréscimo de argila (SOUZA et al., 2006).

Lopes e Cox (1979), estudando amostras da camada superficial de 44 solos sob vegetação de cerrado em Minas Gerais observaram que, do ponto de vista agrônômico a porcentagem de argila foi a variável mais recomendada para estimar a disponibilidade de P naqueles solos. Além disso, para um mesmo nível de P no solo, é provável que numa situação de deficiência de água no solo, o efeito seria menos drástico para os solos LAdm1 e 2.

Segundo Novais e Smyth (1999), solos que apresentam maiores teores de argila, minerais de argila mais oxídicos e com baixo pH tendem a reter mais P que os demais. Falcão e Silva (2004) estudando diferentes solos provenientes da região central da Amazônia verificaram um gradiente textural variando entre 13,4 e 52,2 dag kg⁻¹ de argila. Comparativamente, nos solos do presente estudo, foram verificados valores entre 19 e 82 dag kg⁻¹ (textura argilosa a muito argilosa).

Embora, neste estudo, os solos tenham sido obtidos na camada de 0 a 20 cm de profundidade. Os teores de M.O.S variaram de baixos a médios, podendo isto ser atribuído às elevadas temperaturas e umidade relativa do ar, típicas da região. Causando uma maior atividade de microrganismos do solo e rápida mineralização, o que restringe um acúmulo de M.O.S (DAVIDSON et al., 2000).

4.2. Mineralogia da fração argila

Apesar do presente estudo não mostrar a presença do mineral gibbsita (Gb), Corrêa et al. (2008) estudando o horizonte B de um Latossolo Amarelo Distrófico típico de Manaus, observaram teor de Gb em torno de 1,27 dag kg⁻¹ de argila. A ausência de Gb corrobora com

resultados de outros estudos como Tucci (1991) que estudando a camada superficial de classes de solos bem desenvolvidos da região central do Amazonas, também não encontrou Gb. Moreira (2016) estudando a mineralogia de solos do Estado do Amazonas (formação Alter do Chão) encontrou apenas traços do mineral Gb.

Segundo Gualberto et al. (1987), os Latossolos da Amazônia por serem originados de sedimentos mais jovens, comparados com aqueles do Planalto Central, tendem a ser menos gibbsíticos. Além disso, outra possibilidade para esse comportamento seria a atividade da matéria orgânica (LINARES e HUERTAS, 1971). A reciclagem da sílica pela vegetação florestal, favorece a estabilidade da caulinita, mesmo em ambiente altamente intemperizado, essa reciclagem do silício pelo ecossistema evitaria que este elemento seja lixiviado e com isso não cria condição para a formação de Gb (LUCAS et al., 1993).

Segundo Marques et al. (2004), a frequência de ocorrência de Gb é maior em solos bastante evoluídos e com baixo pH, com destaque para o bioma cerrado, no Brasil. Portanto, como esses solos do presente estudo apresentam baixa concentração de Gb, comparado com os teores encontrados nas chapadas dos cerrados, é provável que muitos dos pacotes tecnológicos calibrados para aquelas regiões não possam ser extrapolados para a região central da Amazônia. Uma vez que a predominância da Gb num determinado solo dá a ele comportamentos físicos e químicos específicos, como estruturação, adsorção de P, etc.

Em relação aos demais minerais da fração argila, o predomínio de Ct nos solos da região amazônica já foi evidenciado em outros trabalhos (MARQUESI et al., 2010; Garcia et al., 2013). O domínio deste mineral deve-se ao material de origem (granitos, gnaisses e sedimentos quaternários e terciários) associado aos acentuados processos de intemperismo químico que predominam nessa região, resultantes de precipitação anual normalmente elevada, em torno de 2.000 mm (MELO et al., 2006).

Segundo esses autores, a gênese da Ct está relacionada a três processos: (a) produto do intemperismo de minerais primários ou secundários, (b) neoformação e (c) herança do material de origem. A Ct, como produto de intemperismo de minerais primários ou secundários está relacionada principalmente com os solos formados sobre as rochas ígneas e metamórficas presentes nos Escudos das Guianas e Brasil Central.

Apesar de ser identificado o mineral Ct nos diferentes solos (Figura 1) não foi possível quantificar o seu teor, pois a difratometria de raio X é uma técnica apenas qualitativa. A presença de Ct na fração argila de solos da região central da Amazônia também foi observada em outros trabalhos (GUALBERTO et al., 1989; TUCCI, 1991; LIMA, 2001; MOREIRA, 2016).

Corrêa et al. (2008) estudando a argila de Latossolos Vermelhos e Amarelos do ambiente Tabuleiros costeiros, Amazônia e Recôncavo Baiano, verificaram que a Ct foi o mineral predominante (88 a 96%) no horizonte B desses solos, seguido pelo mineral Gt, independentemente da cor do solo. Nesse trabalho, os autores observaram 72,6 e 22,1 dag kg⁻¹ de Ct triclinica e Ct monoclinica, respectivamente. Além disso, foi verificado também que 68 e 24% da Ct apresentavam formas esférica e subesférica, respectivamente.

Em relação ao efeito da Ct nas propriedades dos solos, dados da literatura (GÉRARD, 2016), indicam que para um mesmo nível de pH a adsorção de P nesse mineral pode variar de 0,07 a 1,6 mg P g⁻¹. Segundo esse autor, os valores de adsorção de P na Ct em relação aos demais minerais de argila, especialmente Gt e Gb são contrastantes na literatura, provavelmente devido a fatores que envolvam a área de superfície específica e tamanho de cristais desses minerais.

Desta maneira, estudos devem ser feitos na tentativa de eliminar essas divergências. Segundo Schwertmann e Herbillon (1992) os cristais de Ct de solos tropicais podem ser muito pequenos comparados a Ct clássica e, contribuem para a elevação da área de superfície

específica (100 a 250 m² g⁻¹). Como a área de superfície específica está relacionada com a espessura do cristal do mineral, consequentemente isto afeta a adsorção de P nesses minerais (VAN RANST, 1995). Segundo esses autores Ct com cristais menores podem ter uma maior concentração de Fe estrutural comparado com as Ct clássicas.

Portanto, isto sugere que Ct formadas em ambientes ricos em Fe, típico do trópico úmido, incorporará algum teor de Fe na sua estrutura, o que vai influenciar na sua cristalografia, consequentemente mantendo-a mais ativa (VAN RANST, 1995). Em muitos casos a caulinita pode fixar P em um patamar de apenas 1,5 vezes o valor encontrado para a Gt (GÉRARD, 2016), comportamento negligenciado em muitos estudos. Segundo Olsen e Watanabe (1957) a área de superfície no mineral presente na argila de um solo pode ser mais importante que o tipo de mineral, no controle da sorção de P.

Em relação aos óxidos de ferro, os minerais Gt e Hm são aqueles predominantes em solos altamente intemperizados como os tropicais (VAN RANST, 1995), de modo geral, a Gt é um mineral mais estável, podendo ser formado a partir do Fe³⁺ presente no solo, sem passar por uma fase semi-cristalina enquanto a Hm menos estável, obrigatoriamente necessita passar por uma fase semi-cristalina (ferridrita). Nos locais onde predomina o mineral Gt, os solos são de coloração amarela (FONTES et al., 2001), comportamento bastante comum, inclusive naqueles solos predominantes na terra firme da região central da Amazônia. Nestes ambientes, a alta temperatura, alta umidade, alta M.O.S e baixa liberação de Fe leva a formação deste mineral.

Apesar das condições locais contribuírem para uma maior formação de Gt, nota-se no presente estudo que os solos LAdm2, LAda1, LAda2, LAdma3 e LAdma4 (Tabela 3) apresentaram maior teor de Hm comparado com a Gt. Como o material de origem desses solos é sedimentos de origem diversa (IRON, 1978), é provável que isso tenha afetado esse

comportamento. De modo geral os teores tanto de Gt quanto de Hm são considerados baixos, provavelmente em função do baixo teor de Fe no material de origem.

Esses resultados sugerem que apesar da região de estudo parecer ser homogênea quanto ao material de origem e clima, há ambientes que são mais adequados para formação de um mineral em detrimento de outro. A relação $Hm/(Hm+Gt)$ apresentou-se maior nos solos LAdma4, LAdm2 e LAda2 sugerindo que esses ambientes são mais propícios à formação da Hm quando comparado aos ambientes onde ocorrem os solos LAdm1, LAdma2 e LAdma1.

Com relação às propriedades do mineral Hm, Torrent et al. (1994), avaliando a sorção de fosfato em diferentes Hm naturais, verificaram que a adsorção de P atingiu valores de $2,6 \mu\text{mol P m}^{-2}$, porém com variabilidade alta. Mas em comparação com Gt, as Hm mostraram uma menor sorção e menor afinidade por fosfato, sendo que a capacidade de adsorção de fosfato foi influenciada pela morfologia dos domínios de dispersão: o menor domínio cristalográfico “c” relativo a direção “a”, menor a capacidade de sorção de P.

De modo geral, a Gt no pico 110 apresentou-se mais cristalizada comparada ao pico 111, dados os maiores valores de DMC observados no primeiro pico. No presente estudo, os valores indicam aparentemente uma homogeneidade do DMC, dada a amplitude dos valores. De modo geral, independente do pico, a Gt no solo LAdma1 apresenta-se mais cristalizada enquanto no solo LAdma2 encontra-se menos cristalizada (Tabela 5), consequentemente esta apresenta-se em um estado mais amorfo, o que potencializa este solo a uma maior adsorção de P.

Apesar disso, é importante inferir que como houve uma variação nos valores de DMC dos solos dentro de cada pico, o solo LAdma1 apresenta maior potencial de adsorver P enquanto os solos LAdma2 e LAda1 apresentam um menor potencial de adsorver P, sugerindo que as doses de fertilizantes fosfatados podem ser reduzidas nesses solos comparativamente ao solo LAdma1. O DMC dos óxidos de Fe pode ser afetado pelas condições do ambiente de

formação, quantidade formada e presença de inibidores, como a M.O.S (SCHWERTMANN e CARLSON, 1994).

De modo geral, os valores de DMC, independente do pico, ficaram dentro da faixa (15 a 50 nm) considerada adequada para Latossolos (INDA JUNIOR e KÄMPF, 2005). O fato do DMC 110 ser diferente do DMC 111 na Gt, pode ser um indicativo de que as Gt presentes nesses solos não são isodimensionais (SCHWERTMANN e KÄMPF, 1985). A ausência de DMC no pico 111 para a maioria dos solos, provavelmente é decorrente da interferência da reflexão de outros planos de outros minerais.

Segundo Ainsworth e Sumner (1985) e Gérard (2016) a capacidade tanto dos óxidos de Fe quanto dos óxidos de Al se ligarem a fosfatos é diretamente proporcional a área de superfície específica destes minerais. No entanto, dependendo do elemento adsorvente, os resultados na literatura são divergentes e estudos adicionais necessitam ser realizados para que haja uma melhor compreensão desses resultados e também do efeito do tamanho do cristal dos minerais Gt e Gb (GÉRARD, 2016), uma vez que este influencia a ASE.

Levando em consideração os diferentes valores observados no presente estudo, a expectativa é que a adsorção de P nos solos estudados sejam variáveis, sendo os solos LAdma2 e LAda1 com maior potencial para adsorver P e, por outro lado, o solo LAdma1 apresenta menor potencial para tal processo. Corrêa et al. (2008) verificaram ASE de aproximadamente $35 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ em argila de um horizonte de B de um Latossolo Amarelo distrófico típico no município de Manaus-AM.

A maior amplitude de SI observada para a Hm em detrimento da Gt pode ser um indicador de Hm de ambientes que favorecem uma alta atividade do silício e baixa do Al (KAMPF e CURI, 2000), fato que corrobora a com a hipótese da baixa formação da Gb nos ambientes de terra firme da Amazônia central. Segundo Van Ranst (1995), em solos altamente intemperizados a SI Fe por Al passa ser a regra ao invés da exceção.

A substituição isomórfica de Fe por Al normalmente resulta em menor grau de cristalinidade, menor tamanho de partícula e, conseqüentemente, em aumento da área de superfície específica dos minerais oxídicos (VAN RANST, 1995) o que pode contribuir para uma maior adsorção de fosfato. No presente estudo, os valores de SI podem ser considerados médios a altos tanto para a Gt quanto para Hm.

Segundo Fitzpatrick e Schwertmann (1982), fatores como a maturidade do solo, posição na paisagem e posição no perfil do solo influenciam na magnitude da SI. De modo geral, os valores de SI encontrados para a Gt ficaram próximos ao limite máximo estabelecido para Gt sintéticas (33 cmol mol^{-1}) (SCHULZE, 1984), Latossolos da região do Médio Amazonas (27 e 29 cmol mol^{-1}) (Lima, 2001) e Latossolos próximos da região de Manaus (33 cmol mol^{-1}) (FRITSCH et al., 2005). Como esses valores não foram muito elevados, é provável que os mesmos estejam relacionados com a M.O.S, que apresenta capacidade de complexação com o Al liberado durante o processo de intemperismo (MOREIRA, 2016).

A predominância das formas de Fe livres bem cristalizadas nesses solos sugerem que na região estudada não há ou são baixos os inibidores da cristalização do Fe. Tal premissa é validada pela baixa relação Feo/Fed ($< 0,2$) (Tabela 5), resultado condizente com a natureza dos Latossolos e Argissolos com baixos teores de M.O.S. Moreira (2016) observou valores médios (48 g kg^{-1}) dos teores de Fe de boa cristalinidade (Fed) na camada superficial de Latossolos e Argissolos da região Amazônica. A ação mais intensa dos agentes de intemperismo nesses solos de terra firme pode ter contribuído para tal comportamento.

Os valores encontrados neste trabalho refletem o ambiente no qual parte dos óxidos de Fe, Gt e Hm foram formados, evidenciando um ambiente com intensa lixiviação de bases, ácido, com uma atividade e disponibilidade de Al elevada, suficiente para promover o máximo de substituição isomórfica em Gt (FITZPATRICK e SCHWERTMANN, 1984; FONTES e WEED, 1991).

No entanto, é importante observar que dentro da forma de Fe bem cristalizada (Fed) os solos apresentam teores distintos que provavelmente os levará a comportamentos distintos. Diante disso, estudos que envolvam processos de adsorção de P ou a interação com outros elementos ou substâncias devem ser feitos localmente e avaliados por análises conjuntas, pois, qualquer extrapolação de dados poderá incorrer em erros.

Interessante observar que apesar do LAdma1 apresentar maior teor de matéria orgânica, comparado aos demais solos, os valores não foram suficientes para complexar Fe na superfície da ferridrita e, conseqüentemente, diminuir a cristalização, como pressupõe Schwertmann (1966).

A predominância de óxidos de boa cristalinidade ($Feo/Fed < 0,05$) nos solos de terra firme é um indicativo seguro acerca dos tipos de óxidos presentes nesses solos, nesse caso, Hm e/ou Gt, como demonstrado por Schwertmann e Kämpf (1983). A presença desses dois minerais em solos do estado do Amazonas também foi observada por Kitagawa e Moller (1979), Lima (2001) e Marquesi et al. (2010).

5. CONCLUSÕES

Os minerais predominantes nos solos de terra firme da Amazônia Central são caulinita, goethita e hematita.

Houve grande variação, entre os solos, nos teores de minerais, diâmetro médio dos cristais, área de superfície específica e substituição isomórfica, bem como os teores de ferro pedogenético.

O potencial de adsorção de fósforo mostrou ser dependente da quantidade de argila e do valor de fósforo remanescente dos solos estudados.

Os solos LAdma1 e LAdm3 possuem alto potencial de adsorção de P, e o LAdm1 é o que apresenta o menor potencial de adsorção de P.

6. REFERÊNCIAS

- AINSWORTH, C. C.; SUMNER, M. E., HURST, V. J. Effect of aluminum substitution in goethite on phosphorus adsorption: I. Adsorption and isotopic exchange. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, n. 5, p. 1142-1149, 1985.
- AITKEN, R. L.; MOODY, P. W.; MCKINLEY, P. G. Lime requirement of acidic Queensland soils. I. Relationships between soil properties and pH buffer capacity. **Australian Journal of Soil Research**, v. 28, p. 28, p. 695-701, 1990.
- ALEVA, G. J. J. **Laterites: concepts, geology, morphology and chemistry**. ISRIC, Netherlands, 169 p. 1994.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Viçosa, MG: SBCS, 32p. 2000 (Boletim informativo, 25).
- AZEVEDO, A. C. e BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 609-617, mar./abr.2004.
- BASTOS, T. X. **O estado atual do conhecimento das condições climáticas da Amazônia brasileira**. In: ZONEAMENTO Agrícola da Amazônia. Belém, PA: IPEAN, 1972. p. 68-122. (IPEAN. Boletim técnico, 54).
- BOUYOUCOS, G. J. The hydrometer method improved for the mechanical analysis of soil. **Soil Science**, v. 23, p. 343-353, 1927.
- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto RadamBrasil: folha S.A 21 Santarém – geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1976.
- CARVALHO, M. A. **Eficiência de dispersantes na análise textural de materiais de solos com horizontes B Latossólico e B textural** (Dissertação). Escola Superior de Agricultura de Lavras Lavras, 1985.

CHEN, R. F.; ZHANG, F. L.; ZHANG, Q. M.; SUN, Q. B.; DONGA, X. Y.; SHENA, R. F. Aluminium-phosphorus interactions in plants growing on acid soils: does phosphorus always alleviate aluminium toxicity? **Journal of the science of food and agriculture**, v. 92 (5), p. 995-1000, 2012.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ed., Lavras. 359p. 1999.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F.; CURI, N. Propriedades cristalográficas de caulinitas de solos do ambiente Tabuleiros Costeiros, Amazônia e Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 32, n. 5, p. 1857-1872, 2008.

CRAVO, M. S.; SMYTH, T. J.; BRASIL, E. C. Calagem em Latossolo Amarelo Distrófico da Amazônia e sua influência em atributos químicos do solo e na produtividade de culturas Anuais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 895-907, 2012.

DAVIDSON, E. A.; VERCHOT, L. V.; CATTÂNIO, J. H.; ACKERMAN, I. L.; CARVALHO, J. E. Effects of soil water content on soil respiration in forest and cattle pastures of eastern Amazonia. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 53-69, jan. 2000.

DICK, D. P. **Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B latossólicos** (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986. 196f.

DIXON, J. B. Roles of clays in soils. **Applied Clay Science**, v. 5, p. 489-503, mar. 1991.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, Informação Tecnológica. 2009. 627p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-SPI, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2006. 306 p.

FAGERIA, N. K. e BALIGAR, V. C. Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sustainable crop production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, p. 1303-1319, 2001.

FALCÃO, N. P. S. e SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 3, p. 337-342, jul/set. 2004.

FITZPATRICK, R. W. e SCHWERTMANN, U. Al-substituted goethite – an indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. **Geoderma**, v. 27, p. 335-347, 1982.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, A. O.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 3, p. 627-646, jul./set. 2001.

FONTES, M. P. F. e WEED, S. B. Iron oxides in selected brazilian oxisols: I. Mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n. 4, p. 1143-1149, 1991.

FRITSCH, E.; MORIN, G.; BEDIDI, A.; BONNIN, D.; BALAN, E.; CAQUINEAU, S.; CALAS, G. Transformation of haematite and Al-poor goethite to Al-rich goethite and associated yellowing in a ferrallitic clay soil profile of the middle Amazon Basin (Manaus, Brazil). **European Journal of Soil Science**, v. 56, p. 575-588, 2005.

GARCIA, C. H. P.; LIMA, H. N.; SILVA, F. W. R.; NEVES JUNIOR, A. F.; TEIXEIRA, W. G.; MACEDO, R. S.; TAVARES, S. G. Chemical properties and mineralogy of soils with Plinthite and Petroplinthite in Iranduba (am), Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 936-946, 2013.

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.

GUALBERTO, V.; RESENDE, M.; CURI, N. Química e mineralogia de Latossolos, com altos teores de ferro da Amazônia e do Planalto Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 245-252, 1987.

HUSNI, M. H. A.; DEVI, S.; MANAS, A. R.; ANUAR, A. R.; SHAMSHUDDIN, J. Chemical variables affecting the lime requirement determination of tropical peat soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 26, p. 2111-2122, p. 1995.

INDA JUNIOR, A. V. e KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 851-866, 2005.

IRION, G. Soil fertility in the Amazonian rainforest. **Naturwissenschaften**, v. 65, p. 515-519, 1978.

KÄMPF, N. e CURI, N. Oxidos de ferro: indicadores de atributos de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: Novais RF, Alvarez VVH, Schaefer, CEGR. (ed.) **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 107-138, 2000.

KÄMPF, N; RESENDE, M.; CURI, N. Iron oxides in brazilian oxisols. In: Beinroth FH, Camargo MN, Eswaran H. eds. **International Soil Classification Workshop - Classification, Characterization and Utilization of Oxisols**, 8., Rio de Janeiro, 1988. Proceedings. Rio de Janeiro, p.71-77, 1988.

KÄMPF, N. **Die Eisenoxidmineralogie einer Klimasequenz von Böden aus Eruptiva in Rio Grande do Sul, Brasilien** (Tese). Freising, Technische Universität München. 1981.

KEENEY, D. R. e COREY, R. B. Factors affecting the lime requirements of Wisconsin soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 27, n. 3, p. 277-280, 1963.

KER, J. C. **Mineralogia, sorção e dessorção de fosfato, magnetização e elementos traços de latossolos do Brasil** (Tese de doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 181f, 1995.

KITAGAWA, Y. e MÖLLER MRF. Clay mineralogy of some typical soils in the Brazilian Amazon region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 14, n. 3, p. 201-208, 1979.

LADO, M. e BEN-HUR, M. Soil mineralogy effects on seal formation, runoff and soil loss. **Applied Clay Science**, 24, p. 209-224, 2004.

LEHMANN, J.; CRAVO, M. S. C.; MACÊDO, J. L. V.; MOREIRA, A.; SCHROTH, G. Phosphorus management for perennial crops in central Amazonian upland soils. **Plant Soil**, v. 237, p. 309-319, dez. 2001.

LIMA, H.N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001. 176p.

LINARES, J. e HUERTAS, F. Kaolinite synthesis at room temperature. **Science**, v. 171 (3974), p. 896-897, mar. 1971.

LOPES, A. S. e COX, F. R. Relação de características físicas, químicas e mineralógicas com fixação de fósforo em solos sob cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 82-88, 1979.

LUCAS, Y.; LUIZÃO, F. J.; CHAUVEL, A.; ROUILLER, J.; NAHON, D. The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. **Science**, v. 260 (5107), p. 521-523, abr. 1993.

MAIA, M. A. M. e MARMO, J. L. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. CPRM, Manaus, 2010, 275 p.

MARQUESI, J. D. O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; JUNIOR, O. F. C.; BATISTA, S. M.; AFONSO, M. A. C. B. Atributos químicos, físico-hídricos e mineralogia da fração argila em solos do Baixo Amazonas: Serra de Parintins. **Acta Amazonica**, v. 40, n. 1, p. 1-12, 2010.

MARQUES, J. J. G.; SCHULZE, D. G.; CURI, N.; MERTZMAN, S. A. Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v. 119, p. 179-195, 2004.

MEHRA, O. P. E. e Jackson, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, v. 7, p. 317- 327, 1960.

MELO, V. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, L. E. F.; CHAGAS, A. C.; LEMOS JÚNIOR, J. B.; ANDRADE, R. P. Caracterização física, química e mineralógica de solos da colônia agrícola do Apiaú (Roraima, Amazônia), sob diferentes usos e após queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 6, p. 1039-1050, 2006.

MOREIRA, A. e FAGERIA, N. K. Soil Chemical Attributes of Amazonas State, Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 40-17, p. 2912-2925, 2009.

MOREIRA, L. J. S. **Química, física, mineralogia e teores de metais pesados em solos do estado do Amazonas**. Tese (Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016. 162f.

NETTO, A. R. **Influência da mineralogia da fração argila sobre propriedades físico-químicas de solos brasileiros**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1996. 144f.

NORRISH, K. e TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminum in soil goethites. **European Journal of Soil Science**, v. 12, p. 294-306, set. 1961.

NOVAIS, R. F. e SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. 1. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

OLSEN, E. R. e WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. **Soil Science Society of America Journal**, v. 21, n. 2, p. 144-149, 1957.

PAL, D. K.; BHATTACHARYYA, T. M.; CHANDAN, P.; RAY, S. K. Linking minerals to selected soil bulk properties and climate change: A review. **Clay Research**, v. 31, p. 38-69, 2012.

PAL, D. K.; WANI, S. P.; SAHRAWAT, K. L.; SRIVASTAVA, P. Red ferruginous soils of tropical Indian environments: A review of the pedogenic processes and its implications for edaphology. **Catena**, v. 121, p. 260-278, out. 2014.

PALM, C.; SANCHEZ, P.; AHAMED, S.; ALEX AWITI, A. Soils: A Contemporary Perspective. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 32, p. 99-129, nov. 2007.

PANDOLFO, C. **A floresta amazônica brasileira: enfoque econômico-ecológico**. Belém: SUDAM, 1978. 118 p.

RAIJ, B van e QUAGGIO, S. **Uso eficiente de calcário e gesso na agricultura**. In: Simposio sobre fertilizante na agricultura Brasileira, Brasília, Anais..., Embrapa/Potafos. 323-46p. 1984.

REIS, N. J.; ALMEIDA, M. E.; RIKER, S. L.; FERREIRA, A. L. **Geologia e recursos minerais do Estado do Amazonas**. MME/CPRM/CIAMA, Programa de Geologia do Brasil (mapas geológicos estaduais, escala 1:1.000.000), Manaus, 125p. 2006.

RODRIGUES, T. E.; PEREIRA, L. C.; GAMA, J. R. N. F.; REGO, R. S.; HENRIQUE, L. M. **Uso e Ocupação do Solo da Amazônia Brasileira**. In: Anais do Congresso Brasileiro e Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservação de Solo, VIII; 1996; Londrina, Paraná: Londrina, 1996. p. 145-191.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, v. 43, n. 1, p. 137-154, mar. 2008.

SCHULZE, D. G. e SCHWERTMANN U. The influence of aluminium on iron oxides: X. Properties of Al-substituted goethites. **Clay Minerals**, v. 19, p. 521-539, 1984.

SCHULZE, D. G. The Influence of aluminum on iron oxides. VIII. Unit-cell dimensions of Al-substituted goethites and estimation of Al from them. **Clays Clay Minerals**, v. 32, n. 1, p. 36-44, 1984.

SCHWERTMANN, U. e CARLSON L. Aluminium influence on iron oxides: XVII. Unit-cell parameters and aluminium substitution of natural goethites. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 256-261, nov. 1992.

SCHWERTMANN, U.; FITZPATRICK, R. W.; TAYLOR, R. M.; LEWIS, D. G. The influence of aluminium on iron oxides. Preparation and properties of Al-substituted hematites. **Clays Clay Minerals**, v. 27, n. 2, p. 269-276, 1979.

SCHWERTMANN, U. e HERBILLON, A. J. Some aspects of fertility associated with the mineralogy of highly weathered tropical soils. In: Lal, R.; Sanchez, P. Myths and science of soils of the tropics. Madison, Soil Science Society America, 1992. p.47-59. (Special Publ. n.29).

SCHWERTMANN, U. e KÄMPF, N. Óxidos de ferro jovens em ambientes pedogenéticos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 251-255, 1983.

SCHWERTMANN, U. e KÄMPF N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. **Soil Science**, v. 139, p. 344-350, abr. 1985.

SCHWERTMANN, U. The differentiation of iron oxide in soil by a photochemical extraction with acid ammonium oxalate. Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde, **Weinheim**, v. 105, p. 104-201, 1964.

SCHWERTMANN, U. e LENTZE, W. Bodenfarbe and eisenoxidform. Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde, **Weinheim**, v. 115, p. 209-214, 1966.

SEHGAL, J. L. Red and lateritic soils: na overview. In: SEHGAL, J.; BLUM, W. E.; GAJBHIYE, K. S. (eds) **Red and lateritic soils. Managing red and lateritic soils for sustainable agriculture**. Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, v. 1, p. 3-10, 1998.

SINGER, A. Clay mineralogy as affecting dispersivity and crust formation in aridisols. In: **Transactions of the 15th World Congress of Soil Science** (Ed. Etchevers, J. D.), Acapulco, Mexico. Vol 8a. Int. Soc. Soil Sci. and Mexican Soc. Soil Sci., Acapulco, México, p. 37-46, 1994.

SIVAPULLAIAH, P. V. Surprising Soil Behaviour: Is It Really!!! **Indian Geotechnical Journal**, v. 45, p. 1-24, mar. 2015.

SOLOMON, D.; LEHMANN, J.; MAMO, T.; FRITZCHE, F.; ZECH, W. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands. **Geoderma**, v. 105, p. 21-48, 2002.

SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; SAMBATTI, J. A.; PETERNELE, W. S.; TORMENA, C. A.; MONTES, C. R.; CLEMENTE, C. A. Contribuição dos constituintes da fração argila de solos subtropicais à área superficial específica e à capacidade de troca catiônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1355-1365, nov./dez. 2007.

SOUZA, M. G. S.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS RF, ALVAREZ VVH, BARROS NF, FONTES RLF, CANTARUTTI RB, NEVES JCL. eds. **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007. Capítulo V, p. 206-232.

SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; TORRES, P. R. F.; BALIZA, D. P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 6, p. 975-983, 2006.

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

TUCCI, C. A. F. **Disponibilidade de fósforo em solos da Amazônia**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1991. 142 f.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. *Bragantia*, v. 62, n. 1, p. 111-118, 2003.

VAN RANST E. Rational soil management in the humid tropics. **Bull. Séanc. Acad. r. Sci. Outre-Mer Meded. Zitt. K. Acad, overzeese Wet**, v. 40, p. 209-233, 1995.

VILLANI, E. M. A.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; FONTES, L. E. F.; NEVES, J. C. L. Difusão de fósforo em solos com diferentes texturas e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, p. 343-347, 1993.

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.

CAPÍTULO 2: INTERAÇÃO ENTRE TEMPO DE CONTATO FÓSFORO-SOLO E TIPO DE SOLO: DISPONIBILIDADE DE P E CRESCIMENTO DO SORGO

RESUMO

A adsorção de P no solo tem mostrado ser dependente da textura, mineralogia e tempo de contato do fertilizante com o solo e, no caso dos solos da região central da Amazônia a compreensão desses processos ainda não foi satisfeita. No presente estudo foi testada a hipótese de que a eficiência da adubação fosfatada em solos do trópico úmido é dependente da interação entre o tempo de contato do fertilizante-solo e o tipo de solo. Os solos que promoveram a maior disponibilidade de P foram aqueles que receberam as maiores doses. Porém, a maior produção de biomassa do sorgo foi obtida nos solos com textura média e argilosa, mostrando que a quantidade de argila afeta o potencial de adsorção de P e sua disponibilidade nos solos estudados. A maior disponibilidade de P foi observada no menor tempo de contato fosfato-solo, porém a absorção de P e crescimento das plantas foram mais influenciados pelo maior tempo de contato fosfato-solo.

Palavras chave: *Sorghum bicolor* L., P-recuperado, trópico úmido.

ABSTRACT

The adsorption of P in the soil has been shown to be dependent on the texture, mineralogy and time of contact of the fertilizer with the soil and, in the case of the soils of the central region of the Amazon, the understanding of these processes has not yet been satisfied. In the present study we tested the hypothesis that the efficiency of phosphate fertilization in soils of the humid tropics is dependent on the interaction between the time of contact of the soil fertilizer and the type of soil. The soils that promoted the highest availability of P were those that received the highest doses. However, the highest sorghum biomass production was obtained in soils with medium and clayey texture, showing that the amount of clay affects the adsorption potential of P and its availability in the studied soils. The higher availability of P was observed in the lower soil phosphate contact time, but the P uptake and plant growth were more influenced by the longer soil phosphate contact time.

Index terms: phosphorus, *Sorghum bicolor* L., recovered P, humid tropic.

1. INTRODUÇÃO

Os solos de terra firme da região central da Amazônia são caracterizados por apresentarem restrições químicas que limitam os cultivos agrícolas (FAGERIA e BALIGAR, 2001). Dentre as principais limitações destacam-se: elevada acidez e deficiência generalizada de nutrientes, principalmente o fósforo (P) (CHEN et al. 2012). Além disso, esses solos apresentam pH ácido, com alumínio (Al), ferro (Fe) e manganês (Mn) em solução que contribuem para a precipitação do P em formas não absorvíveis pelas plantas (NOVAIS e SMYTH, 1999). Nesses solos predominam minerais do tipo 1:1 (caulinita), bem como, óxidos de ferro e alumínio, os quais contribuem para a adsorção de P, processo que acarreta a diminuição da eficiência agronômica dos adubos fosfatados (CAMPOS et al. 2016).

Vários são os fatores que influenciam a dinâmica de P no solo, com destaque para teor e tipo de argila, teor de matéria orgânica e tempo de contato do P com o solo. Em relação a este último fator, o aumento do tempo de contato solo-fosfato, causa maior solubilidade da fonte, porém contribui para uma menor disponibilidade de P para as plantas, devido a formação de P não lábil, sendo esse efeito mais marcante para as fontes de alta solubilidade (GONÇALVES et al., 1989).

Gonçalves et al. (1989), estudando o efeito do tempo de contato (0, 15, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 dias) das fontes KH_2PO_4 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ e NaH_2PO_4 , em quatro Latossolos Vermelho-Amarelos e um Latossolo Vermelho-Escuro do cerrado, verificaram que com o aumento do tempo de contato fosfato-solo houve decréscimo tanto do P extraível como na produção de matéria seca do sorgo. Comportamento semelhante foi observado por Freitas et al. (2013). Esses autores estudaram o efeito do tempo de contato (15, 30, 60 e 120 dias) de diferentes fontes fosfatadas de solubilidades distintas

com em três Latossolos do estado de Minas Gerais. Verificaram uma redução do P disponível em função do aumento do tempo de contato, principalmente, na fonte de maior solubilidade (Superfosfato Triplo) e no solo com maior fator capacidade de P.

De modo geral, o padrão de comportamento do P com o solo é dependente do tipo de solo, textura do solo, mineralogia da fração argila e da cristalografia dos minerais, condições que podem ser variáveis de região para região em função das condições locais influenciarem no tipo e composição dos diferentes solos.

Apesar desse padrão de comportamento citado anteriormente para solos da região de cerrado, Sudeste e Nordeste do Brasil, são inexistentes informações sobre a dinâmica e labilidade de P, em função do tempo de contato do fosfato com o solo, em solos de terra firme da Amazônia central. Objetivou-se com o presente estudo avaliar o efeito do tempo de contato de uma fonte de fósforo solúvel com 10 solos coletados sob floresta ombrófila aberta (Floresta Amazônica), sobre a disponibilidade de fósforo na produção da matéria seca de plantas de sorgo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Solos e condições de crescimento das plantas

Utilizou-se amostras de dez Latossolos Amarelos Distróficos, coletados no ambiente de terra firme, sob vegetação nativa (floresta ombrófila aberta) (PANDOLFO, 1978), em seis municípios do estado do Amazonas, sendo a descrição e localização dos mesmos, descritos na tabela 1.

Tabela 1. Classificação dos solos em função da classe textural e localização de coleta.

Solo*	Município	Coordenadas geográficas
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm1)	Iranduba	03° 12' 01" S e 60° 13' 01" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura média (LAdm2)	Presidente Figueiredo	02° 39' 15" S e 60° 03' 19" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda1)	Itacoatiara	02° 55' 51" S e 59° 09' 06" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda2)	Manacapuru	03° 15' 17" S e 60° 39' 28" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda3)	Iranduba	03° 12' 22" S e 60° 09' 47" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura argilosa (LAda4)	Manaus	03° 06' 11" S e 59° 58' 32" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma1)	Manacapuru	03° 06' 02" S e 59° 58' 28" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma2)	Rio Preto da Eva	02° 42' 37" S e 59° 26' 17" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma3)	Presidente Figueiredo	01° 25' 18" S e 60° 15' 20" W
LATOSSOLO AMARELO Distrófico textura muito argilosa (LAdma4)	Manaus	02° 39' 41,4" S e 60° 07' 57,5" W

*Brasil (1976)

Esses solos foram incubados com P em diferentes tempos e posteriormente cultivados com plantas de sorgo em casa de vegetação com $612,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de densidade de fluxo de fóton fotossintético, fotoperíodo de 12:00 h/12:00 h (dia/noite), temperatura média de 35,7°C e umidade relativa de 47,8 %, no Departamento de Engenharia Agrícola e Solos da Universidade Federal do Amazonas, Manaus-AM.

2.2. Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi instalado em delineamento de blocos casualizados, com três repetições e uma planta por unidade experimental, totalizando 165 plantas úteis neste estudo. Os tratamentos foram constituídos de uma combinação fatorial de cinco períodos

de contato do P com o solo (0, 15, 30, 60, e 120 dias) com 10 Latossolos, conforme descrito anteriormente na tabela 1.

As doses de P que cada solo recebeu, foram determinadas conforme o fósforo remanescente (P-rem) de cada solo (ALVAREZ e FONSECA, 1990): LAdma1 e LAdma3 - 455 mg dm⁻³; LAda2 e LAdma4 - 385,0 mg dm⁻³; LAdm2, LAda1, LAda3, LAda4 e LAdma2 - 320,0 mg dm⁻³; e LAdm1 - 185 mg dm⁻³ de P.

As plantas foram mantidas nessas condições por 50 dias e ao final desse período foram avaliados a concentração de P disponível no solo, teor foliar de P e produção de matéria seca.

2.3. Procedimentos específicos

2.3.1. Seleção do local e coleta dos solos

A seleção dos locais foi feita procurando abranger ampla faixa de solos que já vem sendo explorados com fins agrícolas na região. Os solos foram coletados em ambiente de terra firme na camada superficial de 0-20 cm de profundidade. A coleta foi efetuada em único ponto sob vegetação nativa (floresta ombrófila densa/aberta), onde os solos estavam mais preservados e mantinham suas características físicas e químicas originais.

2.3.2. Caracterização química e granulométricas dos solos estudados

Após a coleta as amostras de solos foram destorroadas, homogeneizadas, secas à sombra e subamostras foram passadas em peneira de 2,0 mm de abertura para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) e posteriormente submetidas à análises químicas e granulométricas (Tabela 2).

Tabela 2. Atributos químicos e granulométricos dos solos utilizados no estudo, 0-20 cm de profundidade.

Solo	pH (H ₂ O)	P mg dm ⁻³	Al ⁺³ -- cmol _c dm ⁻³ --	H+Al	T	V	m	P-rem mg L ⁻¹	M.O.S	Areia	Silte	Argila
						-- % --				----- dag kg ⁻¹ -----		
LAdm1	4,1	2,30	1,40	10,99	11,22	2,01	85,89	22,22	2,48	77	1	22
LAdm2	4,4	1,42	0,80	4,40	4,26	5,18	78,43	18,88	1,18	69	9	22
LAda1	4,2	1,42	1,20	8,80	9,02	2,44	84,51	17,11	1,87	61	3	36
LAda2	4,4	3,21	1,40	9,83	10,17	3,35	80,46	12,53	2,61	61	3	36
LAda3	4,0	2,60	1,60	10,99	11,22	2,06	87,43	17,11	2,48	56	5	39
LAda4	3,9	2,91	1,40	9,83	10,17	3,30	80,46	15,49	1,87	37	8	55
LAdma1	4,7	5,81	1,80	12,28	13,33	7,89	63,16	5,47	3,28	32	6	62
LAdma2	4,1	2,60	1,20	8,80	9,13	3,57	78,43	17,71	1,64	22	11	67
LAdma3	4,1	2,00	1,20	8,80	9,03	2,50	83,92	5,79	2,11	5	21	74
LAdma4	4,4	1,71	1,10	5,05	5,50	8,21	70,97	17,71	1,64	15	3	82

LAdm: Latossolo Amarelo Distrófico textura média; LAda: Latossolo Amarelo Distrófico textura argilosa; LAdma: Latossolo Amarelo Distrófico textura muito argilosa; P: Mehlich-1; Al⁺³: Acidez trocável; H+Al: Acidez potencial; T: capacidade de troca cátions total; V: Saturação por bases; m: Saturação por alumínio; P-rem: fósforo remanescente e M.O.S.: matéria orgânica do solo. Análises realizadas conforme Embrapa (2009).

2.3.3. Correção do solo e incubação com P

Os solos foram corrigidos com uma mistura de carbonato de cálcio e carbonato de magnésio puro para análise (p.a) na relação estequiométrica Ca:Mg de 4:1, adotando-se o critério de aumentar a saturação por bases (V) a 60% e, posteriormente os solos foram incubados por 30 dias. As doses de corretivos foram definidas conforme curvas de incubação (DUNN, 1943) determinadas via experimentos de laboratório (Batista, 2014). Após esse período, os solos foram secos e incubados com P, utilizando as fontes KH₂PO₄ e (NH₄)₂HPO₄, sendo os períodos iniciados em diferentes épocas, para que, em um mesmo e último dia, os diferentes períodos de equilíbrio P-solo fossem satisfeitos. Tanto a incubação do corretivo quanto as doses de P, foram feitas em vasos de polietileno com capacidade de 3,0 dm³, cheios de solo. Após esse período e antes do cultivo das plantas, foi coletada uma amostra de solo ($\approx 0,5$ dm³) em cada unidade experimental para avaliar a disponibilidade de P.

2.3.4. Cultivo do sorgo e adubação básica

Após 48 horas da última incubação (zero dia), foi feita a semeadura de 10 sementes por vaso de *Sorghum bicolor* (L.) Moench], cultivar BRS 330. Aos 13 dias após

a semeadura (DAS), realizou-se o desbaste, deixando apenas 4 plantas por vaso, época em que foi feita uma adubação básica com macro e micronutrientes adaptada de Allen et al. (1976) e Malavolta (1980) em todas as unidades experimentais, fornecendo 300 mg de N; 377 mg de K; 59 mg de S; 5 mg de Zn; 1,5 mg de Cu; 3,6 mg de Mn; 0,8 mg de B e 0,15 mg de Mo por dm^3 de solo. O fornecimento de N e K foi dividido em três aplicações, sendo a primeira realizada aos 13, a segunda aos 26 e a terceira aos 35 dias. No caso dos solos que receberam N e/ou K no momento da aplicação do P através das fontes KH_2PO_4 e $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, não foi realizado o fornecimento de um e/ou ambos elementos em cobertura, quando as doses de 300 mg de N ou 377 mg de K já tinham sido satisfeitas. A aplicação da adubação básica foi feita na superfície de cada vaso, na forma de solução com reagentes p.a., utilizando pipetas volumétricas.

Durante as fases de incubação e condução do experimento, a umidade no solo foi mantida em torno de 60% do volume total de poros, por meio de pesagem diária dos vasos e adição de água deionizada.

2.4. Avaliação do experimento

2.4.1. Disponibilidade de P no solo após o período de incubação

A disponibilidade de P no solo foi avaliada pelo extrator resina de troca iônica (RTI) (RAIJ et al., 1986).

2.4.2. Avaliação da produção de matéria seca das plantas

As plantas foram colhidas a 0,5 cm da superfície do solo, lavadas em água de torneira e água destilada separando-as em parte aérea (folhas + caule) e raízes. As partes foram secas em estufa de circulação de ar forçada, com temperatura de 65°C até atingirem

massa constante. Após a secagem foi determinada a massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR), utilizando-se balança do tipo Mettler PM 30-K com precisão de 0,001 g. A matéria seca total (MST) foi obtida pela soma MSPA + MSR. A MSR foi dividida por MSPA para obter a relação raiz parte aérea (RRPA).

2.4.3. Avaliação do teor foliar de P

0,5 g de tecido fresco do limbo da segunda folha a partir da folha bandeira (considerada folha zero) de cada unidade experimental, foi imersa em ácido perclórico, a $0,2 \text{ mol L}^{-1}$, posteriormente armazenada em freezer a -15°C , até o momento da determinação dos teores totais de P. A determinação dos teores foliares de P foi feita de acordo com metodologia proposta por Hogue et al. (1970), modificado por Fernandes et al. (2000).

2.5. Análise dos dados

As variáveis dependentes foram P-resina, teores foliares de P, MSPA, MSR, MST e RRPA. Como os dados não apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk ($P > 0,05$), os mesmos foram transformados na base raiz quadrada de X. Posteriormente os dados foram submetidos à análise de variância. Quando o F foi significativo ($P < 0,1$), as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey.

3. RESULTADOS

3.1. Disponibilidade de fósforo no solo

A interação entre os fatores tipo de solos e tempo de incubação influenciaram significativamente ($P < 0,1$) a disponibilidade de P no solo. Em relação ao comportamento do fator solo dentro do fator tempo de incubação nota-se que, de modo geral, os maiores teores de P recuperado foram observados nos solos LAd4, LAdm1, LAdm3 e LAdm4, independentemente do tempo de incubação.

Por outro lado, os menores valores de P recuperado foram observados principalmente nos solos LAdm1 e LAdm2 (Tabela 3). Entre os solos, os maiores valores percentualmente de P recuperado, proporcional a dose de P que cada solo recebeu, foi observado no solo LAd4, exceto com 30 dias de incubação. Por outro lado, as menores taxas de P recuperado foram observadas no solo LAdm1, exceto o tempo 30 dias, seguido pelo solo LAdm2, exceto no tempo zero e 60 dias seguido pelo solo LAd2, principalmente nos tempos 30 e 60 dias de incubação.

Tabela 3. Fósforo recuperado no solo pelo extrator resina em resposta ao tempo de contato do fosfato com diferentes solos.

Contato do resíduo com diferentes solos:															
Solo	Tempo de incubação (dias)														
	0			15			30			60			120		
	Resina (mg dm ⁻³)														
LAdm1	80,5	E	b	60,3	G	bc	124,9	CD	a	67,0	E	bc	48,0	E	c
LAdm2	197,8	BC	a	106,5	F	b	127,8	CD	b	132,2	BCD	b	112,6	CD	b
LAda1	167,7	CD	a	162,9	DE	ab	164,6	ABCD	ab	119,4	CD	bc	115,2	BCD	c
LAda2	211,1	BC	a	166,6	CDE	ab	156,4	ABCD	c	133,6	BCD	c	145,8	ABCD	c
LAda3	182,5	BCD	a	140,7	DEF	ab	141,5	BCD	ab	131,2	BCD	b	119,7	BCD	b
LAda4	232,3	BC	b	319,9	A	a	160,6	ABCD	c	179,0	AB	bc	147,8	ABCD	c
LAdma1	312,3	A	a	272,6	AB	a	206,0	A	b	196,0	A	b	176,8	ABC	b
LAdma2	179,6	BCD	a	158,8	DEF	ab	168,7	ABC	ab	152,4	ABC	ab	126,7	BCD	b
LAdma3	246,0	AB	a	232,5	BC	ab	187,1	AB	b	184,9	AB	b	195,8	A	ab
LAdma4	210,1	BC	a	186,3	CD	a	188,1	AB	a	158,8	ABC	a	169,0	AB	a

LAdm: Latossolo Amarelo Distrófico textura média; LAd4: Latossolo Amarelo Distrófico textura argilosa; LAdm3: Latossolo Amarelo Distrófico textura muito argilosa. Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas nas colunas ou minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 10% de probabilidade.

Quanto ao efeito do fator tempo de incubação dentro fator solo, verifica-se que a recuperação do P aplicado foi bastante dependente do tipo de solo. De modo geral, os maiores valores de P recuperado foram observados nos tempos 0 e 15 dias de incubação, exceto o tempo 30 dias de incubação no solo LAdm1 que também proporcionou alta taxa

de recuperação do P (Tabela 3). Por outro lado, o contato do fosfato com o solo não influenciou significativamente ($P < 0,1$) a recuperação do P no solo LAdma4 (Tabela 3).

No tempo zero dias de contato fosfato-solo verificou-se uma taxa de recuperação de P acima de 60% da quantidade fornecida nos solos LAdm2, LAda4 e LAdma1, sendo que no caso do LAda4, essa taxa foi de 72,59 %. Por outro lado, aos 120 dias de contato fosfato solo, foram observadas as menores taxas (25,9%) de recuperação de P no solo LAdm1, seguido pelo solo LAdm2, LAda1, LAda3 e LAda2 com taxas de recuperação de apenas 35,19; 36,00; 37,41; e 37,87, respectivamente.

3.2. Teor foliar de fósforo nas plantas de sorgo

A interação entre os fatores tipo de solo e tempo de incubação influenciaram significativamente ($P < 0,1$) o teor de P nas folhas de sorgo. De modo geral, o maior valor foi observado no solo LAdma3, enquanto que o menor valor de P foliar foi proporcionado pelo solo LAda2, independentemente do tempo de incubação (Tabela 4).

Tabela 4. Teor foliar de fósforo na folha das plantas de sorgo em resposta ao tempo de contato do fosfato com diferentes solos.

Solo	Tempo de incubação (dias)														
	0			15			30			60			120		
	g kg ⁻¹														
LAdm1	3,32	BC	a	3,21	ABCD	a	2,54	BCD	a	4,10	AB	a	2,82	BC	a
LAdm2	5,54	AB	a	3,95	ABCD	ab	3,63	ABCD	ab	2,61	BC	b	2,62	C	b
LAda1	4,34	ABC	a	6,08	AB	a	5,11	AB	a	4,91	AB	a	4,35	ABC	a
LAda2	2,27	C	ab	1,86	D	ab	1,45	D	ab	0,90	C	b	3,19	BC	a
LAda3	4,57	ABC	a	5,99	ABC	a	5,45	AB	a	5,26	AB	a	3,67	BC	a
LAda4	5,22	ABC	a	4,82	ABC	ab	2,47	BCD	b	4,58	AB	ab	3,20	BC	ab
LAdma1	2,98	BC	b	2,95	BCD	b	7,19	A	a	5,41	AB	ab	7,97	A	a
LAdma2	7,33	A	a	5,21	ABC	a	4,86	AB	a	5,20	AB	a	5,24	ABC	a
LAdma3	7,23	A	a	6,68	A	a	6,99	A	a	7,27	A	a	8,07	A	a
LAdma4	4,23	ABC	a	5,48	ABC	a	4,40	ABC	a	5,75	AB	a	6,12	AB	a

LAdm: Latossolo Amarelo Distrófico textura média; LAda: Latossolo Amarelo Distrófico textura argilosa; LAdma: Latossolo Amarelo Distrófico textura muito argilosa. Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas nas colunas ou minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 10% de probabilidade.

Quanto ao comportamento do fator solo dentro do fator tempo de contato fosfato-solo, nota-se que, de modo geral, os maiores valores de P foliar foram verificados no solo LAdma3 enquanto o menor valor foi proporcionado pelo solo LAda2, independentemente do tempo de contato (Tabela 4). Os teores de P foliar nos diferentes solos variaram de 0,90 g kg⁻¹ (solo LAda2, aos 60 dias de incubação) a 8,07 g kg⁻¹ (solo LAdma3, aos 120 dias de incubação).

Por outro lado, o comportamento do efeito dos solos no teor foliar de P, foi dependente do tempo de contato P-solo, sendo que com zero dias de contato P-solo os solos LAdm2, LAdma2 e LAdma3 proporcionaram os maiores valores de P disponível e não diferenciaram significativamente ($P < 0,1$), entre si. Comportamento semelhante a este foi observado no tempo 120 dias de contato P-solo. No caso do tempo de contato P-solo 15 dias, esse comportamento foi observado apenas para os solos LAdma3 e LAda1 (Tabela 4). No caso dos tempos de contato 30 e 60 dias, os menores valores de P foliar foram observados nos solos LAdm2 e LAda2, enquanto que os demais solos tenderam a diferenciarem significativamente ($P < 0,1$) (Tabela 4).

Em relação ao comportamento do fator tempo de incubação dentro do fator solo, nota-se que o tempo de contato P-solo não afetou significativamente ($P < 0,1$) o teor foliar de P nos solos LAdm1, LAda1, LAda3, LAdma2, LAdma3 e LAdma4 (Tabela 4). Apesar de haver influência do tempo de contato P-solo nos teores foliares de P das plantas cultivadas nos solos LAdm2, LAda2, LAda4 e LAdma1, observa-se que esse efeito ocorreu de forma bastante suave. No caso do solo LAdma1, onde o efeito tempo de contato foi mais intenso, verifica-se que os menores tempos de incubação (0 e 15 dias) proporcionaram os menores valores de P foliar enquanto que os demais tempos não diferiram significativamente entre si.

Por outro lado, o tempo de 60 dias de incubação do fosfato proporcionou os menores valores de P foliar nas plantas de sorgo cultivadas nos solos LAdm2 e LAda2, sendo que este último solo também apresentou os menores valores no tempo 120 dias de incubação. Os tempos 15, 30 e 60 dias de contato fosfato-solo contribuíram com os menores valores de P foliar no solo LAda4 (Tabela 4). Quanto aos demais solos, apesar de não serem observadas diferenças significativas ($P < 0,1$), os valores do teor de P foliar, de modo geral, foi em ordem decrescente: $120 \geq 0 > 30 > 15 >$ (dias).

3.3. Crescimento das plantas

Não houve efeito da interação do fator solo com o fator tempo de incubação sobre o crescimento das plantas, porém houve efeito significativo ($P < 0,1$) dos fatores isoladamente (Figuras 1 e 2).

Em relação ao efeito do fator solo sobre a variável matéria seca, observa-se que os maiores valores (40,40 e 38,48 g) para MSPA e (47,52 e 45,01 g) para MST foram proporcionados pelos solos LAda4 e LAda1, respectivamente (Figura 1A e B) enquanto que os menores valores de todas variáveis analisadas foram verificados nos solos LAdma2 e LAdma4 (Figura 1A, B, C e D). Os maiores valores para as variáveis MSR (8,35 e 7,64 g) e RRPA(0,236 e 0,210) foram observados no solo LAdm1 (Figura 1B e D).

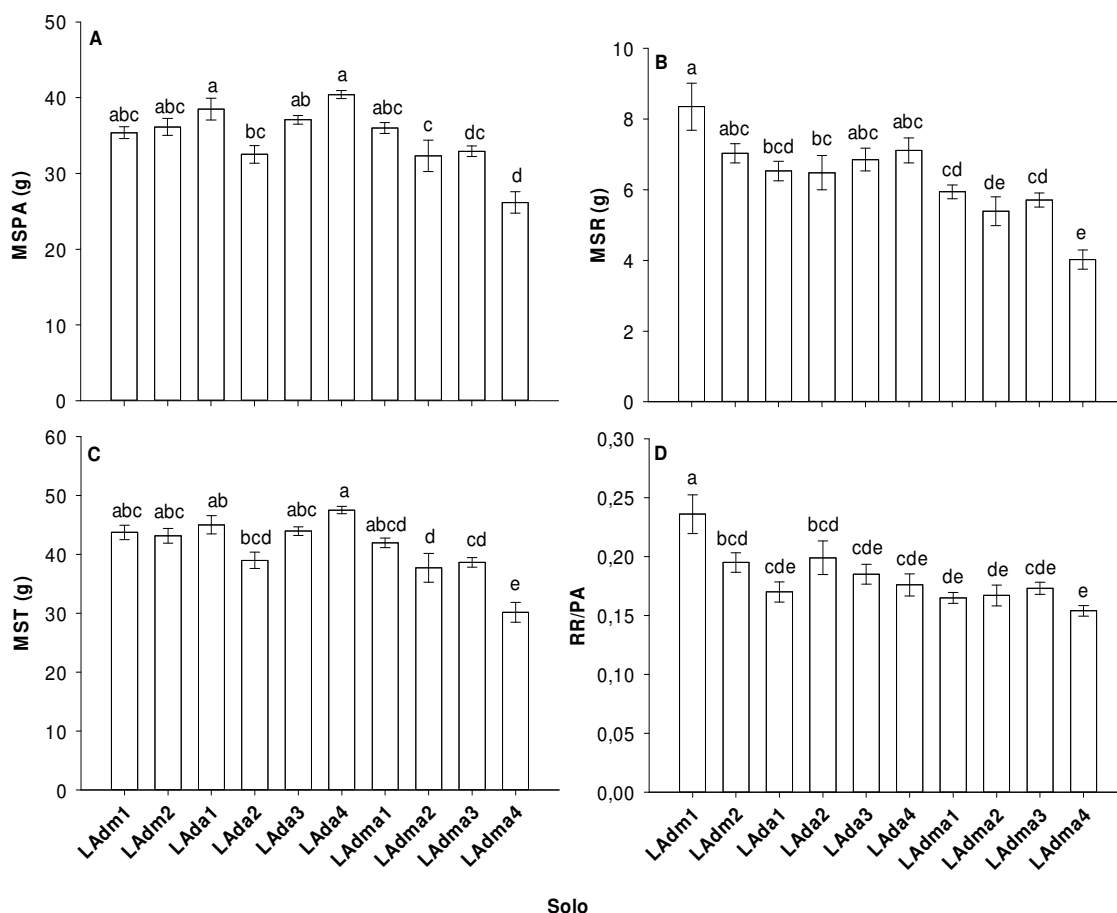


Figura 1. Massa seca da parte área (MSPA) (A), massa seca da raiz (MSR) (B), matéria seca total (MST) (C) e relação MSR:MSPA (RR/PA) (D) de plantas de sorgo aos 50 dias de cultivo, em resposta ao tipo de solo. As barras de erro representam erro padrão da média. Barras com as mesmas letras não diferem significativamente em $P < 0,1$. LAdm: Latossolo Amarelo Distrófico textura média; LAda: Latossolo Amarelo Distrófico textura argilosa; LAdma: Latossolo Amarelo Distrófico textura muito argilosa.

Quanto ao efeito do tempo de contato fosfato-solo no comportamento da produção de matéria seca, verifica-se que os maiores valores de MSPA, MSR e MST foram encontrados nos maiores períodos de contato fosfato-solo: 60 e 120 dias, respectivamente. Por outro lado, os menores tempos de contato fosfato-solo além de apresentarem os menores valores das variáveis, não diferiram significativamente ($P < 0,1$) entre si (Figura 2A, B e C). A relação MSR/MSPA não foi afetada pelo tempo de contato fosfato-solo (Figura 2D).

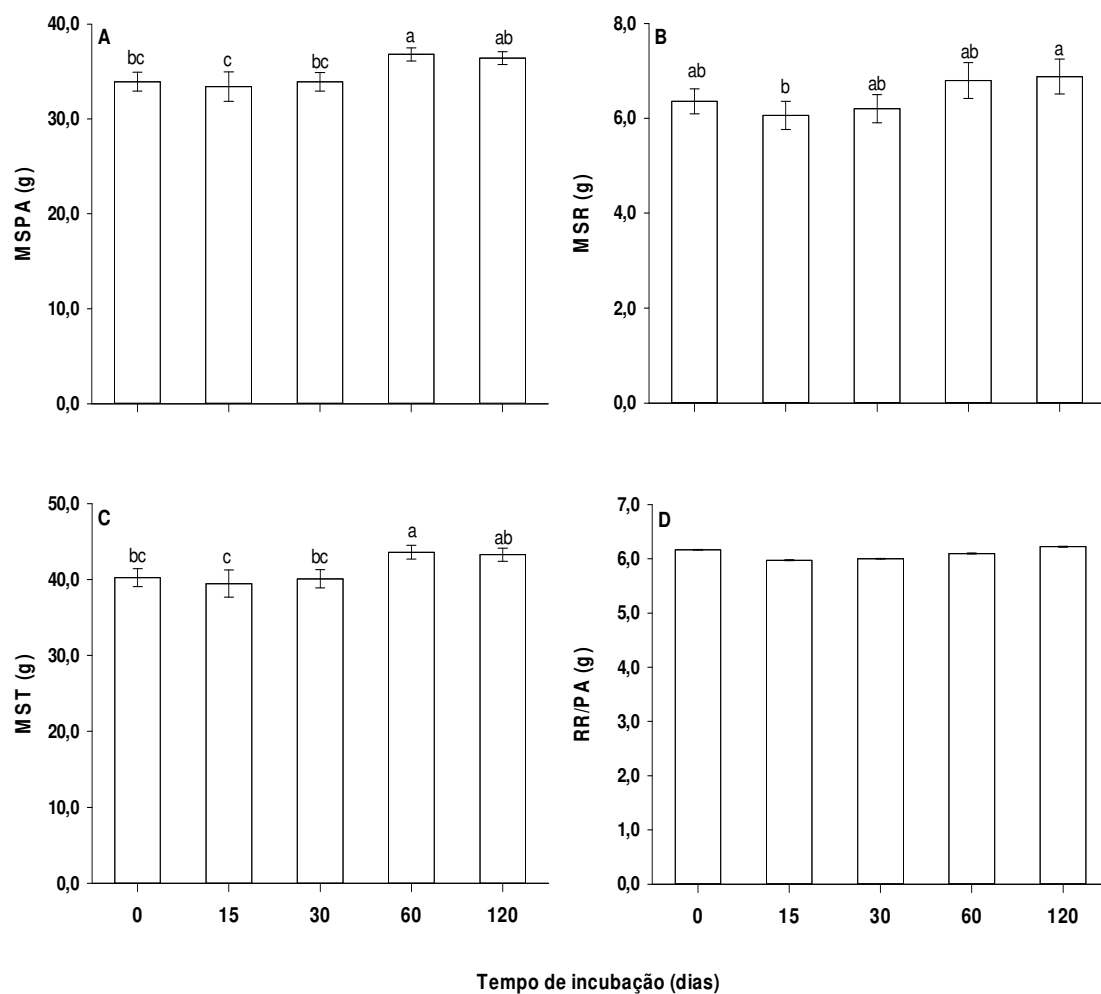


Figura 2. Massa seca da parte área (MSPA) (A), massa seca da raiz (MSR) (B), matéria seca total (MST) (C) e relação MSR:MSPA (RR/PA) (D) de plantas de sorgo aos 50 dias de cultivo, em resposta ao tempo de incubação do fósforo-solo. As barras de erro representam erro padrão da média. Barras com as mesmas letras não diferem significativamente em $P < 0,1$.

4. DISCUSSÃO

4.1. Disponibilidade de fósforo no solo

Os maiores valores de P disponível observados nos solos de textura muito argilosa e com valores intermediários e baixos de P-rem (solos LAdma1, LAdma3 e LAdma4) e textura argilosa e valores intermediários de P-rem (solo LAda4) não refletiram a relação existente entre essas características e a retenção de P pelos solos, que neste caso cria uma expectativa para menor disponibilidade de P (ALVAREZ e FONSECA, 1990; VALLADARES et al., 2003; SOUZA et al., 2006). Diante dessa premissa, a expectativa era de que os solos LAdma1 e LAdma3 com textura muito argilosa e menores valores de P-rem (5,5 e 5,6 mg L⁻¹) (Tabela 2), contribuíssem com uma menor recuperação do P aplicado. Por outro lado, uma maior recuperação do P aplicado deveria ocorrer no solo LAdm1, o que não foi observado no presente estudo.

Analizando o comportamento dos dados sob o ponto de vista da mineralogia, não observou relação estreita entre os teores dos minerais goethita, hematita, estado cristalográfico, área de superfície específica e substituição isomórfica desses minerais com a disponibilidade de P nos solos, havendo relação estreita apenas com os teores de Fe livre mal cristalizado (Fe oxalato) (dados não mostrados). Neste caso, foi observado que o solo LAdm1 que promoveu maior disponibilidade de P no solo apresentou menor teor de Fe mal cristalizado. Segundo Rolim Neto et al. (2004) quanto menor teor de Fe mal cristalizado menor é a superfície espécie dos mesmos e maior é a disponibilidade de P no solo.

No entanto, dada a falta de relação entre o P disponível com aqueles atributos que mais influenciam a dinâmica de P no solo, pode-se afirmar que o comportamento do P foi fortemente influenciado pelas doses de P recebida por cada solo. Tal premissa é

verdadeira pois solos que promoveram uma maior disponibilidade de P foram aqueles que receberam as maiores doses de P: solo LAdma1 e LAdma3 (455 mg dm^{-3}); solo LAdma4 (385 mg dm^{-3}) e solo LAda4 (320 mg dm^{-3}) enquanto que o solo LAdm1 recebeu a menor dose (185 mg dm^{-3}).

Segundo o princípio da recomendação de doses diferentes de P baseado no teor de P-rem de cada solo (ALVAREZ e FONSECA, 1990), uma maior dose de P em um solo com menor P-rem teria efeito semelhante que a aplicação de uma menor dose de P em um solo com alto P-rem. De acordo com os dados do presente estudo, tal premissa não deve ser extrapolada para solos da região, a menos que estudos de calibração sejam desenvolvidos. No caso do presente estudo, ficou claro que o efeito dose de P predominou sobre as características mineralógicas e texturais dos solos.

Segundo Gonçalves et al. (1985) a dinâmica de P no solo é influenciada pela concentração e também pelo tempo de contato deste com o solo. Normalmente mais de 90% do P aplicado ao solo passa para formas menos disponíveis nas primeiras horas de contato P-solo, podendo esse processo se estender por vários dias ou semanas, ocorrendo em primeiro instante uma reação rápida e em seguida uma reação mais lenta (GONÇALVES et al., 1985).

Solis e Silveira (1982) estudando um Latossolo Vermelho Amarelo e um Podzólico Vermelho Amarelo, coletados na camada superficial no Município de Piracicaba-SP, observaram que 90% do P aplicado tinha sido fixado dentro de 10 dias, e verificaram que o aumento da adsorção (em valores absolutos) foi proporcional a dose aplicada, porém houve uma diminuição dos valores relativos (% de P fixado). Neste mesmo estudo, houve um decréscimo de natureza exponencial do P extraído em função do aumento do tempo de incubação.

No referido estudo, os autores verificaram que o maior decréscimo do P disponível foi observado nos solos que apresentavam maior potencial para adsorção de P, como textura mais argilosa. Comportamento semelhante, foi observado por Broggi et al. (2010) avaliando a recuperação de P por diferentes extratores em função do tempo de contato fosfato-solo. Estes autores verificaram aos 90 dias de incubação que a taxa de recuperação do P foi dependente do tipo de solo, que variou de 2 a 51% do P aplicado.

É interessante observar que o comportamento da interação do P com o solo no presente estudo não parece estar associado apenas a diferença de doses, pois nos casos dos solos LAdma1, LAdm2 e LAda4 que proporcionaram as maiores taxas de recuperação de P (Tabela 3), observa-se que estes receberam doses de P completamente diferentes: solo LAdma1 (455 mg dm^{-3}) e solos LAdm2 e LAda4 (320 mg dm^{-3}).

Portanto, era de se esperar que nos menores tempos de contato-fosfato houvesse maior recuperação de P nos solos que receberam as maiores doses de P (solos LAdma1, LAdma3, LAda2 e LAdma4) ou naqueles que apresentassem maior P-rem (solos LAdm1, LAdm2, LAdma2 e LAdma4), comportamento que não foi seguido de forma rígida no presente estudo. Além disso, era de se esperar maior recuperação de P também no solo LAdm2, por apresentar textura média, em relação aos outros que apresentam textura argilosa e muita argilosa (solos LAda4 e LAdma1).

No caso da maior taxa de P recuperado no solo LAda4 comparativamente aos solos LAdm2 e LAdma1 (Tabela 3), provavelmente se deve ao fato de os primeiros apresentarem um menor teor de goethita e hematita (dados não apresentados) em relação aos solos LAdm2 e LAdma1. Os dados do presente estudo, confirmam os relatos de que esses solos do bioma amazônico tendem a fixar menos P comparados àqueles solos da região de cerrado. Tal premissa se sustenta no fato de que após 120 dias de contato do P

com o solo ainda foi possível recuperar em valores médios (todos os solos) $\approx 39\%$ do P aplicado.

Em estudo realizado por Santos et al. (2016) avaliando doses de P (0, 100, 200 e 300 mg dm⁻³) em diferentes períodos de incubação (0, 30, 60, 90, 180, 240 e 360 dias) em solos do Estado da Paraíba, entre eles dois Argissolos, verificaram uma recuperação na maior dose aplicada variando entre 26 e 71%, após os 360 dias de incubação. Valores ainda mais baixos (5,1 a 24, 4%) de recuperação de P foi observado por Gonçalves et al. (1989) em diferentes Latossolos do bioma cerrado, com a dose de 150 mg dm⁻³ e aos 300 dias de incubação. Este comportamento provavelmente é atribuído às características mineralógicas dos solos do cerrado, com alta capacidade de adsorção de P atribuídas à maior presença de goethita e gibbsita (ROLIM NETO et al., 2004).

4.2. Teor foliar de fósforo nas plantas de sorgo

As pesquisas realizadas com a cultura do sorgo (BOARETTO et al., 2009; FONSECA et al., 2008; MARTINEZ et al., 1999) estabelecem que os teores adequados de P foliar para o seu bom crescimento estão na faixa de 2 a 4 g kg⁻¹. No nosso estudo, os teores de P foliar, independente dos solos estudados e/ou tempo de contato estão na faixa de 0,90 a 8,07 g kg⁻¹, sendo que a maioria dos teores enquadram dentro da faixa considerada adequada ou em excesso de P (2 a 8,07 g kg⁻¹ P) (Tabela 4).

Observando os resultados encontrados, o solo LAdma3 que proporcionou as maiores médias (7,23; 6,68; 6,99; 7,27 e 8,07 g kg⁻¹ P aos 0; 15; 30; 60 e 120 dias, respectivamente) e contrasta com o solo LAda2 que apresenta as menores médias (1,86; 1,45 e 0,90 g kg⁻¹ P aos 15, 30, 60 dias, respectivamente). Observa-se que apesar destes últimos valores estarem abaixo da faixa considerada adequada (2-4g kg⁻¹), não refletiram

a disponibilidade de P no solo. Pois o solo LAdm1 que promoveu o menor valor de P disponível no solo (Tabela 3), não proporcionou o menor valor de P foliar (Tabela 4).

Segundo Malavolta (1980) uma concentração de P no solo que permite um crescimento adequado das plantas é em torno de 200 mg dm^{-3} de P. Observa que, além do solo LAda2, os demais não satisfizeram essa exigência, porém esse fato não comprometeu os teores foliares de P, como ocorreu no solo LAda2. Esse comportamento sugere que existem outros fatores controlando a absorção do P da solução do solo, além da concentração do elemento.

Segundo Baligar (2001) as características genéticas, morfológicas e fisiológicas da planta e suas interações com fatores externos como a umidade e biologia do solo, temperatura, luz e melhores práticas de gestão, influenciam a eficiência de utilização de P pelas plantas. Segundo este mesmo autor, a seleção de genótipos melhorados, adaptáveis a uma ampla gama de mudanças climáticas têm sido um dos principais contribuintes para o ganho global na produtividade das culturas.

Do ponto de vista fisiológico, como o P está envolvido em muitos aspectos do metabolismo da planta, espera-se que uma ampla gama de características fisiológicas esteja envolvida na eficiência de utilização de P (EUP), sendo que, algumas delas melhoram a utilização e a absorção de P. Outros promovem uma utilização mais econômica de P no crescimento da planta, por exemplo, ao otimizar a alocação dentro da planta. Essas estratégias geralmente são chamadas EUP externa e interna, respectivamente (WIEL et al., 2016).

Em relação a morfologia da planta, a arquitetura radicular é extremamente importante ao determinar a exploração do solo e, portanto, a aquisição de nutrientes. Os traços arquitetônicos como o comprimento e densidade de pelos radiculares é importante para a aquisição de nutrientes de baixa mobilidade, como P e K. A variação genética na

modificação da rizosfera através do efluxo de prótons, ácidos orgânicos e enzimas é importante para a mobilização de nutrientes, como P e metais de transição, e evitar a toxicidade de Al (LYNCH, 2007).

O sorgo é uma cultura que apresenta uma maior exigência quanto aos elementos N e K, seguido em ordem decrescente por Ca, Mg e P (EMBRAPA, 2007). Em relação ao híbrido BRS 333, este é granífero, apresenta um ciclo de 120 dias, sendo considerado com ótima tolerância ao Al tóxico no solo e ótima absorção de nutrientes, que lhe permite uma estabilidade de produção, com produtividade variando de 5,0 a 6,0 t ha⁻¹ (EMBRAPA, 2007). Leão et al. (2011) avaliando o acúmulo de nutrientes na parte aérea de plantas de *Sorghum bicolor* (cultivar BR-304), em resposta à doses que variaram de 0 a 150 mg dm⁻³ de P, verificaram que o melhor crescimento foi observado com doses menores que 125 mg dm⁻³.

Camacho et al. (2002) avaliando o efeito do P em oito genótipos de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench) cultivados em solução nutritiva sob condições de casa de vegetação, com três concentrações de P (0, 0,5 e 1,0 mmol L⁻¹) verificaram que aos 41 dias após a semeadura, os maiores teores de P (1,4 a 2,2 g kg⁻¹) na matéria seca das plantas foram com a omissão do nutriente. Neste caso isso deve estar associado a uma efeito indireto das maiores doses de P, como um possível antagonismo com outros elementos, especialmente com o zinco (MALAVOLTA, 2006).

O fato dos tempos de contato não terem influenciado significativamente ($P < 0,1$) os teores foliares de P deve estar relacionado às concentrações de P no substrato (solos) saturarem a capacidade de absorção de P pela espécie, o que está de acordo com os resultados observados por Leão et al. (2011). Nota-se que no presente estudo as concentrações de P nos diferentes tempos dentro de cada solo, estão acima dos valores

relatados por este autor, no entanto deve ser considerado que no presente estudo foi utilizado um híbrido novo, que pode apresentar exigência diferente quanto ao P.

Em relação ao LAdma1, único a apresentar efeito do tempo de contato do fosfato-solo no teor foliar de P, verificou-se maiores teores de P foliar quando o fosfato teve um maior tempo ($120 > 30 > 60$ dias). Nesta fase, é provável que tenha havido um melhor equilíbrio entre o fosfato e os constituintes do solo, proporcionando uma melhor absorção.

4.3. Crescimento das plantas

Os resultados do estudo indicam que o crescimento do sorgo foi ligeiramente influenciado pelo tipo de solo. Os maiores valores de MSPA e MSR indicam que estão pelo menos em parte relacionado aos maiores valores de P disponível observado no solo LAda4 (Tabela 3). Apesar destes maiores valores não traduzirem em maior teor foliar de P nesse solo (Tabela 4). É interessante observar que tanto o solo LAda4 quanto o LAda1, receberam a mesma dose de P (320 mg dm^{-3}), juntamente com o solo LAdm2 e LAda3.

Dessa forma, é provável que apesar das doses semelhantes recebidas pelos solos, o balanço entre a fonte com os constituintes de cada solo pode resultar em diferentes ajustes metabólicos e eficiência de uso do P pelas plantas, resultando em comportamentos morfológicos diferentes. Segundo Camacho et al. (2002), o crescimento vegetativo e floração do sorgo responde favoravelmente a aplicações de P. Efeito positivo da disponibilidade de P na produção de MSPA, diâmetro do colmo e altura de plantas de sorgo foram observados por Cessa et al. (2010).

Segundo Bastos et al. (2010), as plantas sorgo de desenvolvimento intenso e de ciclo curto, requerem maior nível de P em solução, especialmente em solos intemperizados, em que deve ocorrer a reposição mais rápida do P adsorvido. Para Ieiri

et al. (2010) em Latossolos brasileiros a deficiência de P é um dos principais problemas para a produtividade das gramíneas, pois segundo esses mesmos autores, sob condições de carência de P, o desenvolvimento do sistema radicular e o perfilhamento são limitados.

Em relação ao fato dos maiores valores de MSPA, MSR e MST serem verificados nos tratamentos onde o P ficou mais tempo em contato com o solo, é provável que a partir dos 60 dias de contato fosfato-solo os sítios de adsorção do solo tenham se saturado, e consequentemente, o P-lábil, que se refere àquele adsorvido aos coloides, mas em equilíbrio com a solução do solo, tenha contribuído para a absorção do nutriente pelas plantas (BROGGI et al., 2010). É provável que esse comportamento seja um indicador de solos com baixo potencial pra adsorver fosfato e ao baixo poder tampão de fosfato desses solos, evidenciado principalmente pelos valores de P-remanescente (Tabela 2) e pela mineralogia (dados não apresentados).

Os resultados do presente estudo divergem daqueles encontrados por Gonçalves et al. (1989), os quais incubando o P por períodos diferentes (0, 15, 30, 60, 120, 180, 240 e 300), verificaram decréscimo na produção de matéria seca de *Sorghum biocolor* (L.) com o aumento do tempo de incubação. Esse comportamento é esperado especialmente para os solos intemperizados, como é o caso da grande maioria dos solos de terra firme na região Amazônica. Moreira et al. (1991) avaliando o tempo de incubação de doses de P com diferentes Latossolos do Triângulo Mineiro e, Novais et al., (1980) estudando o efeito do tempo de contato de fosfato de Araxá com diferentes Latossolos também verificaram um decréscimo na eficiência do fosfato como fontes de P para as planta de sorgo, em função do aumento do tempo de contato do P com o solo.

No caso do presente estudo, é provável que a quase ausência de gibbsita nesses solos, além da quantidade de goethita, hematita, bem como a cristalografia tanto desses minerais quanto da própria caulinita possa explicar tal comportamento. Nesse sentido

estudos que avaliem doses de P nesses solos associados a tempo de contato fosfato-solo, bem como uma caracterização detalhada da mineralogia, devem ser realizados para que tais dúvidas sejam sanadas.

É importante observar que, a produção de MSR foi igual em todos os períodos de incubação (Figura 2B). O suprimento de nutrientes pode afetar o desenvolvimento da raiz diretamente, como resultado de mudanças na concentração externa do nutriente, ou indiretamente através de mudanças no estado nutricional interno da planta. A via direta resulta em respostas de desenvolvimento localizadas na parte da raiz exposta ao suprimento de nutrientes; a via indireta produz respostas sistêmicas e parece depender de sinais de longa distância que surgem na parte aérea (FORDE e LORENZO, 2001).

No caso deste estudo, este comportamento, em parte, pode ser explicado pela menor influência da disponibilidade de P no solo para o crescimento das raízes em relação à parte aérea. Segundo Camacho et al. (2002) em caso de deficiência de P, os efeitos são mais pronunciados na parte aérea, enquanto que o crescimento das raízes é pouco afetado. De acordo com a literatura, plantas sob deficiência de P aumentam o dreno de fotoassimilados para a raiz a fim de aumentar a capacidade da planta para absorção do presente nutriente (FREEDEN et al., 1989).

5. CONCLUSÕES

Os solos que promoveram a maior disponibilidade de P (Resina) foram aqueles que receberam as maiores doses: LAdma1, LAdma3, LAdma4, LAda4. Porém, a maior produção de biomassa do sorgo foi obtida nos solos com textura média e argilosa, mostrando que a quantidade de argila afeta o potencial de adsorção de P e sua disponibilidade nos solos estudados.

A dose de P recebida por cada solo parece sobrepor ao efeito tipo de solo, sugerindo que a recomendação de P pelo P-rem necessita de calibragem pra região.

A maior disponibilidade de P foi observada no menor tempo de contato fosfato-solo, porém a absorção de P e crescimento das plantas foram melhores no maior tempo de contato fosfato-solo.

6. REFERÊNCIAS

ALLEN, S. E.; TERMAN, G. L.; CLEMENTS, L. B. **Greenhouse techniques for soil-plant-fertilizer research**. Muscle Shoals: National Fertilizer Development Center; 1976. 55p.

ALVAREZ, V. V. H. e FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios de casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 48-55, 1990.

BALIGAR, V. C.; FEGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, p. 921-950, 2001.

BASTOS, A. L.; COSTA, J. P. V.; SILVA, I. F.; RAPOSO, R. W. C.; OLIVEIRA, F. A.; ALBUQUERQUE, A. W. Resposta do milho a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 5, p. 485-491, mai. 2010.

BATISTA, I. M. P. **Recomendação de calagem para alguns solos do Estado do Amazonas**. Tese (Doutorado em Agronomia Tropical). Universidade Federal do Amazonas, Manaus. 2014. 37f.

BOARETTO, A. E.; RAIJ, B van.; SILVA, F. C.; CHITOLINA, J. C.; TEDESCO, M. J.; CARMO, C. A. F. **Amostragem, acondicionamento e preparo de amostras de plantas para análise química**. In: SILVA, F. C., editor. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; 2009. p. 61-85.

BROGGI, F.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A. Adsorption and chemical extraction of phosphorus as a function of soil incubation time. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 32-38, 2010.

CAMACHO, R.; MALAVOLTA, E.; GUERRERO-ALVES, J.; CAMACHO, T. Crescimento vegetativo de sorgo granífero em resposta à nutrição fosfatada. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 771-776, 2002.

CAMPOS, M.; ANTONANGELO, J. A.; ALLEONI, L. R. F. Phosphorus sorption index in humid tropical soils. **Soil & Tillage Research**, v. 156, p. 110-118, mar. 2016.

CESSA, R. M. A.; NOVELINO, J. O.; VITORINO, A. C. T.; MAUAD, M. Absorção de fósforo e crescimento do sorgo em função da aplicação de silício e fósforo em Latossolo Vermelho distroférico. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 34, n. 1, p. 135-142, 2011.

CHEN, R. F.; ZHANG, F. L.; ZHANG, Q. M.; SUN, Q. B.; DONGA, X. Y.; SHENA, R. F. Aluminium-phosphorus interactions in plants growing on acid soils: does phosphorus always alleviate aluminium toxicity? **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 92, p. 995-1000, mar. 2012.

DUNN, L. E. Lime requirement determination of soils by means of titration curves. **Soil Science**, v. 56, p. 341-351, nov. 1943.

EMBRAPA. **Cultivo do Sorgo: nutrição e adubação**. 2007. Disponível em: <www.cnpms.embrapa.br> Acesso em 15 de junho de 2017.

FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CURIN. Frações de fósforo e atividade da fosfatase ácida em plantas de feijoeiro cultivadas em solos de várzea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 561-571, 2000.

FONSECA, I. M.; PRADO, R. M.; ALVES, A. U.; GONDIM, A. R. O. Crescimento e nutrição do sorgo (cv. BRS 304) em solução nutritiva. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 2, p. 113-124, 2008.

FREITAS, I. F.; NOVAIS, R.F.; VILLANI, E. M. A.; NOVAIS, S. V. Phosphorus extracted by ion exchange resins and mehlich-1 from oxisols (Latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, p. 37, n. 3, p. 667-677, mai./jun. 2013.

GONÇALVES, J. L. M.; FIRME, D. J.; NOVAIS, R. F.; RIBEIRO, A. C. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, p. 107-111, 1985.

GONÇALVES, J. L. M.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; RIBEIRO, A. C. Cinética de transformação de fósforo-lábil em não lábil, em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 13-24, 1989.

HOGUE, E.; WILCOX, G. E.; CANTLIFFE, D. J. Effect of soil phosphorus levels on phosphate fractions in tomato leaves. **Journal of the American Society of Horticultural Science**, v. 95, p. 174-176, 1970.

FORDE, B. e LORENZO H. The nutritional control of root development. **Plant and Soil**, v. 232, p. 51-68, mai. 2001.

FREEDEN, A. L.; RAO, I. M.; TERRY, N. Influence of phosphorus nutrition on growth and carbon partitioning in Glycyne max. **Plant Physiology**, v. 89, p. 225-230, jan. 1989.

IEIRI, A. Y.; LANA, R. M. Q.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S. Fontes, doses e modos de aplicação de fósforo na recuperação de pastagem com brachiaria. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 5, p. 1154-1160, set./out. 2010.

LEÃO, D. A. S.; FREIRE, A. L. O.; MIRANDA, J. R. P. Estado nutricional de sorgo cultivado sob estresse hídrico e adubação fosfatada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 74-79, jan./mar. 2011.

LYNCH, J. P. Roots of the second Green Revolution. **Australian Journal of Botany**, v. 55, p. 493-512, jan. 2007.

MALAVOLTA, E. **Elementos da nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H (eds.). **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais; 1999. p.143-168.

MOREIRA, A. e Fageria, N. K. Soil Chemical Attributes of Amazonas State, Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 40, p. 2912-2925, 2009.

NOVAIS, R. F.; BRAGA, J. M.; MARTINS FILHO, C. A. S. Efeito do tempo de incubação do fosfato-de-Araxá em solos sobre o fósforo disponível. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, p. 153-155, 1980.

NOVAIS, R. F. e SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. 1. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

PANDOLFO, C. A **A floresta amazônica brasileira: enfoque econômico-ecológico**. Belém: SUDAM; 1978. 118 p.

RAIJ, B Van; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 17, p. 547-566, 1986.

ROLIM NETO, F. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; COSTA, L. M.; CORRÊA, M. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; IBRAIMO, M. M. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 953-964, nov./dez. 2004.

SANTOS, H. C.; OLIVEIRA, F. H. T.; SOUZA, A. P.; SALCEDO, I. H.; SILVA, V. D. M. Phosphorus availability as a function of its time of contact with different soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 11, p. 996-1001, 2016.

SOLIS, F. A. M. e SILVEIRA, R. I. Fixação de fósforo em solos que receberam quantidades variáveis das argilas vermiculita e caulinita: I - efeitos da argila vermiculítica. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 39, n. 2, p. 883-916, 1982.

SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; TORRES, P. R. F.; BALIZA, D. P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 6, p. 975-983, 2006.

TUCCI, C. A. F. **Disponibilidade de fósforo em solos da Amazônia**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1991. 142 f.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 1, p. 111-118, 2003.

WIEL, C. C. M van; LINDEN, C. G van der; SCHOLTEN, O. E. Improving phosphorus use efficiency in agriculture: opportunities for breeding. **Euphytica**, v. 207, p. 1-22, jan. 2016.

CONCLUSÕES GERAIS

As lacunas existentes sobre o conhecimento da mineralogia dos solos da região central da Amazônia dificultaram as deduções a respeito dos fatores que regem a adsorção de P nesses solos. Contudo, mesmo considerando as dificuldades e limitações inerentes a esse tipo de estudo, as relações observadas entre a disponibilidade de P, pelo extrator resina, reiteram a resposta da adubação fosfatada para solos tropicais intemperizados.

Alguns resultados do presente trabalho permitem questionamentos da abrangência do método de recomendação de doses de P baseado no P-remanescente (P-rem) de cada solo. Segundo esse critério, a quantidade de P a ser aplicada, em mg dm^{-3} , a um solo com alto potencial de adsorção, deverá ser o suficiente para haver a adequada disponibilidade de P para as plantas, após as reações de adsorção que ocorrem no solo.

Ao considerar o LAdma1 e LAdma3, classificados como alto potencial de adsorção de P, verifica-se que tais solos receberiam as maiores doses de P, contudo, estes se equiparariam ao solo LAdm1, com menor potencial de adsorver P e que recebeu a menor dose. Com isso, é importante que a recomendação de P, utilizando o critério do P-remanescente, seja calibrado para cada região.

Além disso, as formas de ferro pedogênicas poderiam se constituir em um indicativo de sua capacidade de adsorção de P, e, desse modo, auxiliar na recomendação de aplicações de doses mais adequadas de P. Há uma necessidade de avaliar melhor as diferenças de capacidade de ligação entre minerais de argila e óxidos de Fe/Al através de estudos realizados nas mesmas condições experimentais e baixo fornecimento de PO_4^{3-} .