

## SUBSTÂNCIAS HÚMICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA E ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS TROPICAIS

Jéssyca Dellinhares Lopes Martins<sup>1</sup> e Michely da Silva Alves<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista – UNESP. Faculdade de Ciências Agronômica. Departamento de Produção Vegetal. Fazenda Experimental Lageado - Caixa Postal 237, Rua José Barbosa de Barros, nº. 1780, Botucatu, SP. CEP: 18610-307. E-mail: dellinhares@hotmail.com, michely-alves@hotmail.com

*RESUMO: Sabe-se que em solos de clima tropical a fração argila tem predomínio de oxidros de ferro e de alumínio, que influenciam significativamente a adsorção de fosfato, fenômeno este, que ocorre principalmente quando os óxidos estão carregados positivamente, apresentando desta forma, alta capacidade de fixação de fosfato, que é adsorvido às superfícies dos colóides por um complexo de esfera interna. Isto promove baixa concentração de fosfato na solução do solo e, como consequência, elevadas doses de fertilizantes fosfatados têm sido aplicadas nesses solos para aumentar a disponibilidade desse elemento para as plantas. Como alternativa a redução de adsorção de fósforo ao solo está a adição de matéria orgânica, que atua no bloqueio dos sítios de adsorção do fosfato. As substâncias húmicas podem afetar a disponibilidade de P das seguintes formas: bloqueando os sítios de adsorção de P dos hidróxidos de Fe e Al; competindo com os sítios de adsorção da fração mineral pelo P solúvel; e deslocando parte do P adsorvido pela fração mineral. O mecanismo de bloqueio dos sítios de adsorção ocorre através de ligações que se dão entre os grupos funcionais COOH e as hidroxilas da superfícies dos óxidos de ferro ou de alumínio.*

*PALAVRAS-CHAVE: intemperismo do solo, óxidos de ferro e alumínio, fixação de fósforo*

## HUMIC SUBSTANCES OF ORGANIC MATTER AND PHOSPHORUS ADSORPTION IN SOIL TROPICAL

*ABSTRACT: It is known that in tropical soils the clay fraction is predominantly iron oxidros and aluminum, which significantly influence the phosphate adsorption, this phenomenon, which occurs mainly when the oxides are positively charged, presenting this way, high capacity phosphate attachment, which is adsorbed to the surfaces of the colloid by an internal sphere of the complex. This promotes low concentration of phosphate in the soil solution, and, as a result, high doses of phosphate fertilizers have been applied in these soils to increase the availability of this element in the plant. Alternatively the reduction phosphorus adsorption is added to the soil organic matter, which acts blocking the phosphate adsorption sites. Humic substances can affect the availability of P in the following ways: blocking P sorption sites of Fe and Al hydroxides; competing with the adsorption sites of the mineral fraction of the soluble P; and shifting of the P adsorbed by the mineral fraction. The locking mechanism of adsorption sites occurs via connections which occur between functional groups COOH and the surface hydroxyls of iron oxides or aluminum.*

*KEY WORDS: soil weathering, iron and aluminum oxides, phosphorus fixation*

## INTRODUÇÃO

Dentre os macronutrientes mais exigidos pelas culturas está o fósforo (P), contudo, este, é o que, com mais frequência tem limitado a produção agrícola em condições brasileiras. Isto se deve a intensa interação que o fósforo apresenta com os solos altamente intemperizados (Vilar et al., 2010).

As regiões tropicais e subtropicais apresentam como principal constituintes da fração, argilominerais do tipo 1:1, predominantemente caulinita, e óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e de alumínio (Al) em função do avançado grau de intemperização desses solos (Fontes et al., 2001). Em condições de reação ácida a moderadamente ácida, os óxidos de ferro e alumínio apresentam-se preferencialmente com cargas positivas, sendo assim capazes de reter em sua superfície vários tipos de ânions, como os fosfatos (Volkswiss e Raij, 1977).

Uma das formas de reduzir a adsorção do fósforo no solo é aumentar sua disponibilidade é através da adição de matéria orgânica ao solo (MOS). A MOS consiste em uma mistura de compostos em diferentes estágios de decomposição, resultantes da degradação biológica de resíduos de plantas e animais e da atividade sintética de microrganismos. As substâncias húmicas (SH) constituem o produto final de decomposição de resíduos orgânicos, e essa classe de compostos engloba materiais coloidais do tipo ácido fúlvico, ácido húmico e humina, que exercem influência nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Stevenson, 1994).

Segundo Aquino (2004) a redução da adsorção de fósforo tem sido atribuída à (a) ação do ácido carbônico sobre a solubilização de minerais contendo fósforo; (b) formação de complexos com o húmus, fazendo com que o fósforo possa ser absorvido pelas plantas; (c) ao aumento da competição entre ânions orgânicos e o fosfato pelos sítios de adsorção de fósforo, e (d) pela formação de camadas de húmus ao redor dos óxidos de Fe e Al, diminuindo o poder de adsorção desses óxidos.

Assim, essa revisão objetivou abordar as características dos solos tropicais, a fixação de fósforo nesses solos e o aumento na disponibilidade desse nutriente, promovida pelas substâncias húmicas presentes no solo.

## CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS SOLOS TROPICAIS

Solos de regiões tropicais possuem muitas particularidades decorrentes das condições ambientais de clima, relevo, material originário e vegetação. É comum que nessas regiões, o processo pedogenético ou de formação de solo seja mais acelerado, estando associado ao

clima tropical úmido que apresenta temperaturas mais elevadas e ação mais intensa da água (Zaroni e Santos, 2011).

Sabe-se que quanto maior a disponibilidade de água, mais completas são as reações químicas do intemperismo. Conseqüentemente, os minerais primários das rochas sofrem reações químicas e o resultado são solos com maior proporção de minerais secundários refletindo as variações de material originário.

Em regiões de clima subtropical e tropical, o intemperismo de rochas básicas com minerais como olivina, piroxênio e feldspato plagioclásio podem originar solos argilosos com elevado conteúdo de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Estes óxidos e hidróxidos podem ocorrer no solo sob a forma de materiais amorfos até minerais altamente cristalizados e por serem abundantes e diversificados em grau de cristalinidade, apresentam considerável influência nas propriedades físicas e químicas dos solos, sendo inclusive seu teor usado como característica diferencial entre Latossolos (Pombo et al., 1982).

Sob influência de diversos fatores, mas principalmente do clima, os solos tropicais são altamente intemperizados com predomínio de argilas 1:1, óxidos de Fe e de Al. Do grupo das argilas 1:1 a caulinita é o principal mineral dos solos desenvolvidos sob condições tropicais úmidas, de alta temperatura, umidade e lixiviação, podendo ser formada diretamente do intemperismo das micas principalmente a biotita e feldspatos (Rebertus et al., 1986).

A caulinita é um mineral argiloso do tipo 1:1, com estrutura filossilicatada, formada pelo empilhamento de unidades cristalográficas constituídas de uma lâmina tetraedral de silício (Si) e oxigênios (O) e uma lâmina octaedral de alumínio (Al) e hidroxilas (OH). Em função da ligação das unidades serem feita por pontes hidrogeniônicas, o mineral é limitado quanto à possibilidade de expandir-se e expor suas superfícies internas, com isso, o mineral apresenta cargas apenas nas faces externas e nas bordas quebradas (Dixon, 1989).

Sob condições de clima tropical úmido a caulinita apresenta, freqüentemente, baixo grau de cristalinidade que depende de características químicas e morfológicas e de fatores pedobioclimáticos. Sua forma varia desde partículas hexagonais até partículas com alto grau de desordem estrutural com forma tubular (Singh e Gilkes, 1992).

Embora a caulinita seja o principal mineral dos sedimentos, os óxidos de ferro normalmente estão presentes, como a hematita e goethita que apresentam características mineralógicas distintas, como nível de substituição isomórfica de Fe por Al na estrutura, grau de cristalinidade, tamanho e forma do mineral, conforme o material de origem e estágio de intemperismo (Melo et al., 2002).

Dentre os oxihidróxido de ferro a goethita é um dos minerais argilosos mais encontrados em solos de clima tropical e em quase todos os tipos de solos nas mais diversas regiões climáticas do planeta. Onde há predomínio de goethita os solos apresentam coloração amarela ou bruna frequente em solos brasileiros (Fontes et al., 2001).

A hematita, verdadeiramente óxido de ferro, é um importante mineral argiloso componente de solos de regiões tropicais e subtropicais. É menos encontrado que a goethita por não aparecer com muita expressão em solos de regiões temperadas e frias. É responsável pela coloração vermelha dos solos, já tendo sido encontrada correlação positiva entre avermelhamento do solo e teor de hematita (Fontes, 1988; Torrent et al., 1993).

Os óxidos de Al estão representados nos Latossolos principalmente pela gibbsita, e sua presença está relacionada ao intemperismo intenso, favorecido pelas altas temperaturas e circulação intensa de água, permitindo a saída de sílica e bases do sistema (Ghidin et al., 2006). Dependendo do valor do pH do solo, os óxidos de Al participam diretamente da retenção de ânions e cátions, sendo um dos minerais que mais adsorve o P (Eberhardt et al., 2008). Além disso, os óxidos de Al exercem maior influência nos atributos físico-químicos do solo do que os óxidos de Fe (Pedrotti et al., 2003).

A gibbsita é um mineral não silicatado formado pelo empilhamento da unidade básica constituída por dois planos de hidroxila em empacotamento denso com o íon  $Al^{3+}$  em forma de sanduiche. O Al está presente em 2/3 dos espaços octaedrais e são distribuídos formando anéis hexagonais. Cada Al compartilha seis hidroxilas com outros três átomos de Al, fazendo com que cada hidroxila seja dividida por dois átomos de alumínio (Hsu, 1989).

Em função da fração argila, descrita anteriormente, constituinte dos solos de regiões de clima tropical e subtropical, é de se esperar que esses solos, principalmente nas camadas subsuperficiais, tenham baixíssimas quantidades de carga estrutural, à medida que avança o processo de intemperização, o que afeta a fertilidade do solo e a produtividade das culturas (Landell et al., 2003).

### **INTERAÇÃO DO FÓSFORO EM SOLOS TROPICAIS**

Dentre os macronutrientes mais exigidos pelas culturas, está o fósforo (P), porém, este, é o que, com mais frequência, tem limitado a produção agrícola em condições brasileiras. De forma geral, o teor total deste elemento no solo varia entre 200 a 3.000 mg kg<sup>-1</sup> (Novais e Smyth, 1999), sendo que menos de 0,1 % desse total, cerca de 0,002 a 2,0 mg L<sup>-1</sup>, encontra-se na solução do solo.

A atuação conjunta dos fatores como o clima, relevo, organismos, material de origem e tempo, e de processos como transformação, translocação, adição e remoção, regem o intemperismo, e faz com que os minerais primários em desequilíbrio termodinâmico tendam a se transformar em substâncias mais estáveis as condições ambientais reinantes. Assim sendo o P contido nesses minerais é liberado para a solução do solo, e ao mesmo tempo, ocorrem perdas de bases sílica e carbonatos, e aumento na atividade de elementos como Fe e Al, com a consequente transformação dos minerais primários em argilas 2:1, e estas em 1:1 e óxidos (Tiessen et al., 1984), aumentando a quantidade de grupos funcionais capazes de sorver P.

Os solos ocorrentes nas regiões tropicais e subtropicais possuem intensidade e duração de intemperismo diferentes. Todavia, a maioria dos solos presentes nesses biomas são altamente intemperizados, como os Latossolos e os Argissolos. Com as mudanças ocorridas em virtude do intemperismo, a fração sólida mineral do solo passa de fonte a dreno de P da solução (Rheinheimer et al., 2008).

Segundo Tiessen et al. (1984), com o avanço do intemperismo do solo o destino do fosfato solubilizado dos minerais primários fosfatados pode ser: precipitado com vários cátions, inclusive ocorrendo a neoformação de fosfatos de cálcio (Beck e Sanches, 1994); adsorvido pelos grupos funcionais dos minerais secundários, formando minerais fosfatados mais estáveis termodinamicamente; ou incorporado a compostos orgânicos biologicamente, formando o P orgânico do solo.

A adsorção de fósforo é o fenômeno pelo qual formas solúveis de P, através de ligações eletrostáticas ou covalentes, e de precipitação, com formação de compostos insolúveis, tornam-se indisponíveis para as plantas (Aquino, 2004).

O processo de adsorção pode seguir uma ordem preferencial de predomínio dos seguintes minerais: argilas 2:1 < argilas 1:1 < óxidos cristalinos de Fe e Al < óxidos amorfos de Fe e Al (Fox e Searle, 1978). A adsorção de fosfato é influenciada pelos minerais encontrados nos solos, que apresentam grupamentos superficiais Fe-OH e Al-OH, aos quais poderá ser adsorvido por meio de troca de ligantes (quimissorção) com o estabelecimento de ligações covalentes, além disso, a forma da estrutura mineral e sua superfície específica potencializam o efeito da adsorção (Mesquita Filho e Torrent, 1993).

Dessa forma a retenção de fósforo adicionado ao solo, em formas lábeis ou não lábeis, se dá tanto pela precipitação do P em solução com formas iônicas de Fe, Al e Ca, como, principalmente, pela sua adsorção pelos oxidróxidos de Fe e de Al, presentes, de modo geral, em maiores quantidades em solos tropicais mais intemperizados, de modo particular nos mais argilosos (Parfitt, 1978).

De acordo com Barrow (1985), quando o P é adsorvido a superfície dos agregados, ele pode difundir-se para seu interior em um processo lento, que pode durar anos até que o equilíbrio seja atingido, influenciando assim na redução da disponibilidade do P após a adubação do solo, com o aumento do contato do elemento com o solo.

### **SUBSTÂNCIAS HÚMICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO**

Em solos de regiões tropicais e subtropicais altamente intemperizados, a matéria orgânica do solo (MOS) tem grande importância: no fornecimento de nutrientes às culturas, retenção de cátions, estruturação do solo, permeabilidade, retenção de água complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, e atividade e biomassa microbiana, constituindo-se, assim, um componente fundamental da sua capacidade produtiva (Barreto, 2001).

A matéria orgânica compreende componentes vivos e não-vivos, sendo que os vivos se constituem por raízes de plantas e organismos do solo, correspondendo a aproximadamente 4% do total. Já os componentes não-vivos representam a matéria macrororgânica, constituída de resíduos de plantas em decomposição, as substâncias humificadas e as não humificadas. A MOS é o maior reservatório de carbono da superfície terrestre, e é dinâmica, variando em decorrência de práticas de manejo. Na maioria dos solos, o teor de MOS pode variar de 5 a 50 g kg<sup>-1</sup> nos horizontes minerais (Moreira e Siqueira, 2006).

A matéria orgânica pode ser dividida em dois grupos fundamentais: as biomoléculas e as substâncias húmicas (SH) (Stevenson, 1994). O primeiro grupo, das biomoléculas, é representado pelos carboidratos, gorduras, ceras, proteínas e ácidos nucleicos (Barreto et al., 2008), enquanto o segundo grupo, destacam-se os ácidos húmicos, os ácidos fúlvicos e as huminas. As SH desempenham importante papel no fornecimento de nutrientes às culturas, na retenção de cátions, na complexação de elementos tóxicos e de micronutrientes; na estabilidade de agregados, a qual interfere na infiltração, retenção de água e aeração do solo e na atividade e biomassa microbiana. Assim, as frações húmicas constituem-se um componente fundamental da capacidade produtiva dos solos (Bayer e Mielniczuck, 1999).

Com base em sua solubilidade em meio aquoso as SH são divididas em categorias: ácido húmico (AH), que é solúvel em extrato alcalino, mas precipita-se sob acidificação; ácido fúlvico (AF), que é a fração que permanece em solução quando o extrato alcalino é acidificado, e humina (HU) que é a fração que não pode ser extraída de solos e sedimentos por diluição ácida ou básica, ou seja, é o resíduo que sobra da separação das outras duas frações (Swift, 1996).

O estudo das substâncias húmicas foi iniciado com sua extração de turfas em 1786, por Achard, na Alemanha. Vauquelin em 1797, tentou a mesma extração em resíduos de plantas. O termo “húmus”, proveniente do latim e equivalente a “solo”, foi introduzido por Saussure em 1804 para descrever o material orgânico de coloração escura originado do solo. Sprengel, entre 1826 e 1837, buscou compreender a origem e a natureza química das SHs. Berzelius deu contribuições valiosas sobre métodos de extração e conteúdo elementar das SHs. Foi Oden em 1919 que criou a nomenclatura de AF, AH e HU usada até hoje (Rocha e Rosa, 2003).

Segundo Rocha e Rosa, (2003) a bioquímica da formação das SH constitui ainda hoje um dos aspectos pouco compreendidos da química do húmus. Pelo menos quatro principais vias possíveis para a formação das SH durante a decomposição de resíduos no solo são consideradas. O principal processo é a oxidação de substratos hidrolisados monoméricos, formando polímeros macromoleculares de coloração mais ou menos escura e elevada massa molar. As quatro vias podem ocorrer simultaneamente no solo, porém não com a mesma extensão e importância: a primeira via propõe a formação do húmus a partir da polimerização não enzimática por condensação entre aminoácidos e açúcares formados como subprodutos da atividade microbiana; outras duas vias envolvem a participação de quinonas e, representando a teoria clássica; numa quarta via as SH seriam derivadas de ligninas modificadas (Rocha e Rosa, 2003).

Quanto a estrutura das substâncias húmicas, na literatura existem várias propostas estruturais. O modelo mais aceito é de que estas são macromoléculas que têm sua conformação variável de acordo com as condições do meio (Stevenson, 1994). Este modelo explica macroscopicamente as principais interações das substâncias húmicas, como a capacidade de adsorção e complexação de íons e interação com minerais do solo (Rosa et al., 2009).

Há também a teoria de Picollo (2002) que propõe que as substâncias húmicas são formadas por arranjo supraestrutural de pequenas moléculas orgânicas através de forças de interação fraca, de forma que este modelo torna-se bastante útil para descrever o comportamento ambiental das SH, assim como os efeitos que elas têm sobre o metabolismo das plantas.

Os ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina são as três frações principais do carbono orgânico total do solo, sendo a humina representada por cerca de 30 a 80% (Guerra e Santos, 1999). Estas frações interagem com o material mineral, interferindo, assim, na dinâmica de nutrientes no sistema solo-planta, e exercendo um papel primordial na manutenção da

fertilidade do solo (Mendonza, 1996). Além do mais a quantidade e a proporção com que essas frações são encontradas nos solos tem servido como indicador de qualidade dos solos em diversos trabalhos, devido a forte interação das substâncias húmicas com o material mineral do solo (Fontana et al., 2001).

### **INTERAÇÃO ENTRE O FÓSFORO E AS SUBSTÂNCIAS HÚMICAS NO SOLO**

Sabe-se que em solos de clima tropical a fração argila tem predomínio de oxidroxidos de ferro (Fe) e de (Al), que influenciam significativamente a adsorção de fosfato (Fontana et al., 2008), fenômeno este, que ocorre principalmente quando os óxidos estão carregados positivamente, apresentando desta forma, alta capacidade de fixação de fosfato, que é adsorvido às superfícies dos colóides por um complexo de esfera interna (Meurer et al., 2004). Isto promove baixa concentração de fosfato na solução do solo e, como consequência, elevadas doses de fertilizantes fosfatados têm sido aplicadas nesses solos para aumentar a disponibilidade desse elemento para as plantas (Andrade et al., 2003).

Como alternativa a redução de adsorção de fósforo ao solo está a adição de matéria orgânica, que atua no bloqueio dos sítios de adsorção do fosfato (Almeida et al., 2003). De acordo com Andrade et al., (2007) as substancias húmicas podem afetar a disponibilidade de P das seguintes formas: bloqueando os sítios de adsorção de P dos hidróxidos de Fe e Al; competindo com os sítios de adsorção da fração mineral pelo P solúvel; e deslocando parte do P adsorvido pela fração mineral. Segundo Hue (1991), o mecanismo de bloqueio dos sítios de adsorção ocorre através de ligações que se dão entre os grupos funcionais COOH e as hidroxilas da superfícies dos óxidos de ferro ou de alumínio.

Também as SH podem solubilizar fosfatos de Fe e Al, reduzindo a precipitação de fosfatos com íons Fe e Al e diminuir a adsorção de fósforo por oxidróxidos de ferro e de alumínio (Traina et al., 1986). Isto deve-se ao fato dos oxidroxidos de Fe e Al adsorverem as substâncias húmicas com grande energia e assim competirem com o fosfato pelos mesmos sítios de adsorção (Mesquita Filho e Torrent, 1993).

A efetividade no bloqueio desses sítios varia de acordo com a taxa de mineralização das SH. Compostos orgânicos de cadeia mais simples, por exemplo, são decompostos mais rapidamente (Geelhoed et al., 1999) e moléculas com maior número de grupos funcionais, como OH e COOH, são mais efetivas na competição pelos sítios de adsorção (Andrade et al., 2003).

Andrade et al. (2003) observaram redução na adsorção do P com a aplicação conjunta de ácidos húmicos e fosfato e ácidos húmicos anterior ao fosfato em relação a outros ácidos



orgânicos em experimento com aplicação de diferentes ácidos orgânicos e fosfato em Latossolos.

Em solos tropicais Sibanda e Young (1986) verificaram redução na adsorção de fosfato quando a concentração de ácidos húmicos foi elevada de 4,0 a 30,0 g kg<sup>-1</sup>, o que equivale a um aumento de 7,2 a 52 g kg<sup>-1</sup> da matéria orgânica do solo. De acordo com esses autores, porém, essa eficiência não é exclusivamente atribuída à adsorção de grupos carboxílicos pelos sítios de adsorção, mas também pela forte complexação de Fe e Al na solução do solo pelos AH, reduzindo a adsorção de P.

Antelo et al. (2007) observaram redução da adsorção do fosfato quando os ácidos húmicos foram aplicados anterior ou simultaneamente a aplicação de PO<sub>4</sub>. Também Zhiyou Fu et al. (2013) obtiveram em seus estudos que a ordem de adição de PO<sub>4</sub> e SH pode influenciar a adsorção de PO<sub>4</sub> como se segue: antes da adição PO<sub>4</sub> > adição simultânea > adição prévia de SH.

A aplicação do composto orgânico possibilitou a redução da fixação de P pelo solo, contribuindo para a elevação da absorção do mineral pela cultura da cana-de-açúcar, o que pode ser atribuída às substâncias húmicas presentes nos compostos, nos experimentos de Lima (2011).

Andrade et al. (2007) observaram que a adição de ácidos orgânicos aumentou a disponibilidade de P para plantas de milho, o que resultou em maiores acúmulos de massa seca e P nas plantas e que, especificamente, os ácidos húmicos, em comparação aos ácidos acético e ácido cítrico promoveram os melhores resultados. Isto deve-se ao fato dos AH serem muito resistentes a degradação por microrganismos (Stevenson, 1994) e, portanto, terem um maior tempo de residência no solo em comparação aos outros ácidos orgânicos estudados, provavelmente, possibilitou uma maior eficiência em reduzir a adsorção de P ao longo do tempo, proporcionando maior disponibilidade do nutriente para as plantas.

Lopez Hernandez et al. (1986) puderam constatar redução da adsorção de P sobre a superfície de partículas minerais devido à capacidade dos ácidos húmicos, málicos e oxálicos em competir com o P pelos sítios de adsorção de carga.

De acordo com Cessa et al., (2010) os ácidos húmicos e fúlvicos, compostos mais estáveis e de longa persistência na fração orgânica do solo, também podem competir pelos sítios de adsorção. No entanto, a adsorção dos ácidos orgânicos e conseqüentemente a redução da adsorção de P não dependem apenas da eficiência dos grupos carboxílicos, mas também da capacidade de esses ácidos complexarem Fe e Al livres em solução, os quais poderiam formar precipitados com P. Além disso, a redução da adsorção de P é mais

importante quando a incubação é realizada simultânea ou primeiramente com ácidos orgânicos.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitas pesquisas comprovam cientificamente a importância dos processos que envolvem a matéria orgânica e seus benefícios para o solo e plantas cultivadas. A interação da matéria orgânica, em especial das substâncias húmicas, em solos tropicais, nos quais a adsorção de fósforo é intensa, vem como uma estratégia de manejo e uso do solo, benéfica aos sistemas de produção agrícolas economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis, visto que a entrada de insumos como fertilizantes fosfatados pode ser reduzido pelo manejo adequado da matéria orgânica do solo.

### REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J.A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor do solo, formas do fósforo e adsorção de fosfato em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.985-1002, 2003.

ANDRADE, F.V.; MENDONÇA, E.S.; ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.27, p.1003-1011, 2003.

ANDRADE, F.V.; MENDONÇA, E.S.; SILVA, I.R.; MATEUS, R.F. Dry-matter production and phosphorus accumulation by maize plants in response to the addition of organic acids in Oxisols. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.38, p.2733–2745, 2007.

ANTELO, J.; ARCE, F.; AVENA, M. FIOL, S.; LÓPEZ, R.; MACÍAS, F. Adsorption of soil humic acids on the surface of goethite and its competitive interaction with phosphate. **Geoderma**, Amsterdam, v.138, p.12-19, 2007.

AQUINO, B. F. **Conceitos fundamentais em fertilidade do solo**. Fortaleza: UFC, 182p. 2004. (Apostilas Didáticas).

BARRETO, A. C. et al. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1471-1478, 1997.

BARRETO, A. C.; FERNANDES, M. F. **Recomendações técnicas para o uso da adubação verde em solos de tabuleiros costeiros** (Embrapa: Tabuleiros Costeiros. Circular Técnica, 19). Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001 (Circular Técnica- Embrapa).

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

BAYER, C.; MIELNICKZUC, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. de A.; CAMARGO, F. O (eds). **Fundamentos da matéria orgânica: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. cap. 2, p. 09-23.

BECK, M. A.; SANCHEZ, P. A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1424-1431, 1994.

CESSA, R. M. A. et al . Adsorção de fósforo em frações argila na presença de ácido fúlvico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 34, n. 5, 2010.

DIXON, J.B. Montmorillonite and other smectite minerals. In: Dixon, J. B., Weed, S. B. **Minerals in soil environments**. Soil Science Society of America Journal. Madison, p.293-321, 1989.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; BECQUER, T.; GUIMARÃES, M. F. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção de fósforo em Latossolos sob pastagens no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1009-1016, 2008.

FONTANA, A.; NASCIMENTO, G. B.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; EBELING, A. G. Matéria orgânica em solos de Tabuleiros na região norte fluminense (RJ). UFRRJ, **Revista Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 1, p.114-119. 2001.

FONTANA, A.; PEREIRA, M.G.; SALTON, J.C.; LOSS, A.; CUNHA, T.J.F. Fósforo remanescente e correlação com as substâncias húmicas em um Latossolo Vermelho sob diferentes sucessões de cultura em plantio direto. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.14, p.1-6, 2008.

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

FONTES, M.P.F. **Iron oxides mineralogy in some Brazilian Oxisols**. Raleigh, 1988. 175p. Tese (Ph.D.) - North Carolina State University.

FOX, R.L.; SEARLE, 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, 1978. p. 97-119.

GEELHOED, J. S.; VAN RIEMSDIJK, W. H.; FINDENEGG, G. R. Simulation of the effect of citrate exudation from roots on the plant availability of phosphate adsorbed on goethite. **European Journal of Soil Science**, v.50, p.379-390, 1999.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I - mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 292-306, 2006.

GUERRA, J. G. M.; SANTOS, G. A. de. Métodos Químicos e Físicos. In: Santos, G. A. & Camargo, F.A.O. (Eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Ed. Gênese.1999, 49p.

HSU, P.H. Aluminum hydroxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.331-378.

HUE, N.V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, Madison, v.152 n.6. p.463-471, 1991.

HUGHES, J.C & BROWN, G. A crystallinity index for soil kaolinite and its relation to parent rock, climate and soil maturity. **Journal Soil Science**, 30:557-563, 1979.

LANDELL, M.G.A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A.C.M.; PERENCIN, D.; ROSSETO, R.; BIDOIA, M.A.P.; SILVA, M.A. & XAVIER, M.A. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agricola**, v.60, p:741-745, 2003.

LIMA, C. Disponibilidade de fósforo para a cana-de-açúcar em solo tratado com compostos orgânicos ricos em silício. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 12, 2011.

LOPEZ HERNANDEZ, D.; SIEGERT, G. & RODRIGUEZ, J.V. Competitive adsorption of phosphate with malate and oxalate by tropical soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.1460-1462, 1986.

MELO, V. F., SCHAEFER, C. E. G. R., SINGH, B., NOVAIS, R. F., & FONTES, M. P. F. Propriedades químicas e cristalográficas da caulinita e dos óxidos de ferro em sedimentos do Grupo Barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 01, p. 53-64, 2002.

MELO, V.F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C.E.G.R.; NOVAIS, R.F. & FONTES, M.P.F.F. Chemical and mineralogical properties of kaolinite-rich Brazilian soils. **Soil Science Society America Journal**, 65:1324-1333, 2001.

MENDOZA, H. N. **Efeitos de sistemas de colheita dos canaviais sobre propriedades químicas e biológicas em solos de Tabuleiro no Espírito Santo** (Tese de Mestrado). 1996. 113p. Rio de Janeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

MESQUITA FILHO, M.V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the Cerrado region (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v. 58, p. 107-123, 1993.

MEURER, E. J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fenômeno de sorção em solos. In: MEURER, J. E. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Gênese, 2004. p.131-179.

MOREIRA, F.M.S. SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2ª ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729p.

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

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, New York, v. 30, p. 30-50, 1978.

PEDROTTI, A.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; LIMA, J. M.; CARVALHO, R. Relações entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 1, p. 1-9, 2003.

PICOLLO, A. The supramolecular structure of humic substances: A novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. **Advances in Agronomy**, v.75, p:57-134, 2002.

POMBO, L. C. A. et al. Identificação de óxidos de ferro na fração argila de Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.6, n. 1, p. 12-18, 1982.

REBERTUS, R. A.; WEED, S. B.; BUOL, S. W. Transformations of biotite to kaolinite during saprolite-soil weathering. **Soil Science Society of America Journal** v. 50. p.810-819, 1986.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Fósforo orgânico do solo. In: SANTOS, G. A. (Ed.) et al. **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais e Subtropicais**. 2.ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metropole, p. 139-157, 2008.

ROCHA, J.C. & ROSA, A.H. **Substâncias húmicas aquáticas – interações com espécies metálicas**. São Paulo, UNESP, 2003. 110p.

ROLIM NETO, F. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; COSTA, L. M. et al. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p.953-964, 2004.

ROSA, C.M. da; CASTILHOS, R.M.V.; VAHL, L.C.; CASTILHOS, D.D.; PINTO, L.F.S.; OLIVEIRA, E.S.; LEAL, O. dos A. Efeito de substâncias húmicas na cinética de absorção de potássio, crescimento de plantas e concentração de nutrientes em *Phaseolus vulgaris* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.959-967, 2009.

SANTOS, G. de A.; CAMARGO, F. A. de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. 508p.

SIBANDA, H.M.; YOUNG, S.D. Competitive adsorption of humus acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. **Journal Soil Science**, Madison, v.37, p.197-204, 1986.

SINGH, B. & GILKES, R.J. Properties of soil kaolinites from south-western Australia. **Journal Soil Science**, 43:645-667, 1992.

STEVERSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2 ed New York: John Willey, 1994, 496p.

SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America: American Society of Agronomy, 1996. p. 1011-1020.

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

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Laboratory measurement of soil colour. In: BIGHAM, J.M.; CIOLKOSZ, E.J. (Ed.) **Soil Colour**. Madison: Soil Science Society of America, 1993. p.21-33. (Special Publication).

TRAINA, S.J.; SPOSITO, G.; HESTERBERG, D.; KAFKAFI, U. Effects of pH and organic acids on orthophosphate solubility in an acidic, montmorillonitic soil. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.50, p.45-52, 1986.

VILAR, C. C. C.; COSTA, A. C. S.; HOEPERS, A.; SOUZA JUNIOR, I. G. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1059-1068, 2010.

VOLKSWEISS, S.; RAIJ, B. van. **Retenção e disponibilidade de fósforo em solos**. In: FERRI, M. G., (Coord.) SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO: BASES PARA UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 1977, Belo Horizonte. Anais ... São Paulo: Universidade de São Paulo, 1977. p. 317-332.

ZARONI, M. J.; SANTOS, H. G. Embrapa: **Formação do Solo**. Disponível em: [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONT000gn362j9v02wx5ok0liq1mqy0jc9b7.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn362j9v02wx5ok0liq1mqy0jc9b7.html). Acesso em 20/06/2014.

ZHIYOU FU, et al. Competitive interaction between soil-derived humic acid and phosphate on goethite. **Applied Geochemistry**, v. 36, p.125-131, 2013.