

## Capítulo 19

### Agregados do solo e dinâmica do P: uma relação ainda pouco compreendida

Danilo Andrade Santos<sup>1</sup>, Amanda Gomes Silva<sup>2</sup>, Renato Ribeiro Passos<sup>3</sup>, Otacílio José Passos Rangel<sup>4</sup>

#### Introdução

O fósforo (P) é um nutriente essencial para o desenvolvimento de plantas (MARSCHNER, 2012), e tal característica de essencialidade implica resumidamente que sem o suprimento de P a planta não completa o seu ciclo de vida e que o mesmo não pode ser substituído por outro elemento (BUCHER et al. 2018). Contudo a disponibilidade deste nutriente, para a absorção por plantas, em solos altamente intemperizados, típicos de zonas tropicais, é fortemente limitada em função de reações que ocorrem entre os íons fosfato (sobretudo os ânions  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , formas de P absorvida pelas plantas) e os sítios de sorção presentes em argilominerais do tipo 1:1, bem como os óxidos e hidróxidos de Fe e Al (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Tais reações de sorção indisponibilizam o fósforo presente no solo para a nutrição de plantas, de tal forma que a quantidade de fertilizante fosfatado a ser adicionado ao solo objetivando determinada produtividade vegetal não depende apenas da necessidade da cultura, mas depende fortemente da quantidade de fósforo extraível nestes solos, quantidades estas resultantes da capacidade de fixação de fósforo que estes solos apresentam (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Comumente, sob sistema de produção vegetal intensivo, as limitações do fornecimento de fósforo para plantas são geralmente superadas pelo uso de fertilizantes fosfatado. Contudo, conforme mencionado acima, a quantidade de fertilizante fosfatado que é adicionado ao solo substancialmente excede os requerimentos das plantas podendo assim ter um significativo impacto negativo com relação aos aspectos ecológicos e econômicos.

<sup>1</sup>Dr. Pesquisador Bolsista de Desenvolvimento Científico Regional do CNPq - Nível C. Universidade Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre, CEP: 29500-000, Alegre-ES. e-mail: danilo\_as@live.com;

<sup>2</sup>Ma. em Produção Vegetal pelo Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre, CEP: 29500-000, Alegre-ES. e-mail: gomesamanda211@gmail.com

<sup>3</sup>Dr. Professor da Universidade Federal do Espírito Santo, Caixa Postal 16, CEP: 29500-000, Alegre-ES. e-mail: renatoribeirypassos@hotmail.com

<sup>4</sup>Dr. Professor do Instituto Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre, Caixa Postal 47, CEP: 29500-000, Alegre-ES. e-mail: ojprangel@ifes.edu.br

Notadamente as fontes inorgânicas de P, principais fontes para produção de fertilizantes fosfatados, possuem caráter não renovável (CORDELL; WHITE, 2011; JASINSKI, 2013) e dada as características de essencialidade deste nutrientes e o papel que a segurança alimentar possui para a sobrevivência humana (BAYEYE, 2015) é fundamental o estímulo ao desenvolvimento de estratégias que reduzam tanto a dependência de fertilizantes fosfatados quanto as perdas de fósforo por efeito de ligações irreversíveis em solos sob sistemas de produção agrícola.

A correção da acidez do solo, o manejo da matéria orgânica e a saturação dos sítios de sorção de P, são algumas das estratégias utilizadas para otimizar o uso de fertilizantes fosfatados. Todavia, novas respostas para contornar este problema podem estar contidas num exame mais refinado dos processos que ocorrem ao nível estrutural do solo.

Se por um lado os argilominerais 1:1 e óxidos e hidróxidos de Fe e Al atuam como sítios de sorção de fósforo, marcadamente em solos de clima tropical, esses materiais também desempenham, juntamente com a matéria orgânica do solo, papel importante no desenvolvimento, tipo e estabilidade de agregados do solo (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999), podendo conferir inclusive proteção física à matéria orgânica do solo ao mesmo tempo que reduz o acesso das raízes de plantas e até mesmo microrganismos a compartimentos de carbono (BRAIDA et al. 2011).

Na literatura científica são identificados importantes estudos que avaliam a hipótese do desenvolvimento de efeitos benéficos no que diz respeito à dinâmica, estoques e disponibilidade de fósforo em solos altamente intemperizados associado com a estrutura dos solos (LINQUIST et al., 1997; WANG; YOST; LINQUIST, 2001; MCDOWELL et al., 2007; WRIGHT, 2009; FONTE et al., 2014; SHEKLABADI et al., 2014; NESPER et al., 2015; LI et al., 2016; GARLAND et al., 2017; MARGENOT et al., 2017).

Alguns estudos sugerem a adoção de manejos que favoreçam a agregação podem também favorecer a conservação e disponibilidade deste nutriente (MCDOWELL et al., 2007; FONTE et al., 2014; NESPER et al., 2015; GARLAND et al., 2017; MARGENOT et al., 2017), de tal forma que a biodisponibilidade do P parece estar relacionada com o tamanho dos agregados ainda que os resultados em grau de disponibilidade e teor das diferentes frações do P do solo em função do tamanho dos agregados sejam variáveis (LINQUIST et al., 1997; WANG; YOST; LINQUIST, 2001; WRIGHT, 2009; SHEKLABADI et al., 2014; LI et al., 2016; SINSUK et al., 2019).

Alguns estudos sugerem que os processos que regem a transformação de agregados (quebra, alterações de tamanho, agregação, etc.) podem também influenciar a dinâmica do P no solo (FONTES et al. 2014; NESPER et al. 2015; GARLAND et al. 2018), já que a

ciclagem da fração orgânica do P está diretamente atrelada à dinâmica do carbono (GARLAND et al. 2018). Assim, por exemplo, uma lenta transformação dos macroagregados permite a retenção e proteção de microagregados (microagregados oclusos), dentro dos macroagregados, bem como a estabilização da matéria orgânica do solo associada com estes agregados resultando em menor número de eventos de mineralização, solubilização e/ou dessorção e, subsequente, menor probabilidade de aumento da concentração de nutrientes, inclusive P não-lábil, em microagregados livres (OADES, 1984; ANGERS; RECOUS; AITA, 1997; SIX; ELLIOTT; PAUSTIAN, 1999), como dito, nutrientes estes inicialmente estocados nos macroagregados.

Neste capítulo exploram-se parte do histórico das pesquisas que envolvem a relação entre agregados do solo e a dinâmica do P, bem como se investiga os indícios relatados na literatura que apontam para estes possíveis efeitos associados entre agregação e conteúdo de P em solos agrícolas.

### **A problemática: limitações da relação P-solo para a nutrição de plantas e sustentabilidade da nutrição fosfatada**

Em Ciência do Solo é conhecido e bem estabelecido que em solos altamente intemperizados, típicos de regiões tropicais e subtropicais, o nutriente fósforo é frequentemente um dos principais fatores que limita a produção agrícola. Isso é em parte devido à abundante presença de argilominerais 1:1, bem como óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, que são reconhecidos por apresentarem sítios de sorção para ligações irreversíveis de íons fosfatos (NOVAIS; SMYTH, 1999). Assim, embora o conteúdo total de P no solo possa ser adequado, a alta capacidade para sorção de P desses solos torna o P do solo nativo e o P oriundo de fertilizantes apenas moderadamente solúveis ou ainda insolúveis, pois as reações contínuas do solo incorporam os íons fosfatos em compostos de P orgânico e inorgânico mais fortemente ligados e, portanto, reduzidamente disponíveis para a nutrição de plantas. Com o objetivo de contornar estes problemas, as taxas de aplicação de fertilizantes em recomendações de adubação fosfatada excedem em alto grau o que é efetivamente necessário para o aproveitamento pelas plantas elevando assim os custos de produção, o grau de insustentabilidade do uso de fertilizantes fosfatados, e potencializando impactos ecológicos desfavoráveis.

## **Agregação do solo como fator condicionante da disponibilidade de P nos solos**

As estratégias que visam reduzir os efeitos indesejáveis destas reações de sorção devem levar em conta que, quanto menor for a área superficial de sólidos disponível para o contato e, consequente, sorção de íons fosfato com a fração reativa do solo, menor tende a ser os eventos de fixação de fósforo no solo. Assim, por exemplo, manter o P sob uma forma biologicamente ativa (incorporados na biomassa microbiana do solo) (ZHU; WHELAN, 2018), pode ser um dos caminhos a serem seguidos. Contudo, ainda assim o conteúdo orgânico fosfatado precisa sofrer mineralização e solubilização para então ser absorvido pelas plantas o que ao mesmo tempo também expõe os íons fosfato a processos de fixação.

Assim como no solo a retenção de P ao nível de agregados do solo também é dependente das propriedades químicas do mesmo (HAO; CHANG; LI, 2004; RANATUNGA; REDDY; TAYLOR, 2013). Contudo tem se relatado que há uma possível dependência com relação ao tamanho dos agregados (LINQUIST et al., 1997, WANG et al., 2000, de WANG; YOST; LINQUIST, 2001). Outro ponto a se observar é que há neste aspecto um paradigma a ser encarado, pois: por um lado, quanto maior o conteúdo de argila em solos altamente intemperizados, maior é a probabilidade dos íons fosfatos entrarem em contato com os sítios de sorção presentes nos argilominerais 1:1 e óxidos de Fe e Al; por outro, esse conteúdo da fração argila (os argilominerais e os óxidos ora citados) pode condicionar estabilidade aos agregados e proteção física aos compartimentos de fósforo dentro dos agregados.

Somasse ainda que: a proteção física desenvolvida via agregação pode condicionar inclusive redução da disponibilidade de fósforos, já que a sua difusão para fora dos agregados é igualmente lenta à difusão que ocorre quando o fósforo é adicionado ao solo (LINQUIST et al. 1997). Como observado por Linquist et al. (1997) e Wang et al. (2000) a tendência é do P que se difunde nos agregados torna-se menos disponível para a absorção imediata pelas plantas, de modo que benefícios residuais em longo prazo seriam baixos em solos com alta proporção de agregados maiores.

Tais considerações sobre a proteção física proporcionada pelos agregados e a lenta difusão de P no solo tem influência direta sobre as determinações laboratoriais que estimam o fósforo disponível no solo, onde as amostras de solo são destorroadas e peneiradas expondo assim o conteúdo de fósforo presente nos espaços internos dos agregados, conteúdo este que não necessariamente está acessível às raízes de plantas.

## Indícios de redução de fixação de P em função da agregação

O tamanho do agregado possui um papel chave no que se refere a quantidade de massa de sólidos reativa e disponível aos processos de fixação de íons fosfatos. O conceito de massa reativa é apresentado por Linquist et al. (1997) e é definida como a camada no agregado de solo onde os íons fosfatos recentemente adicionados ao solo sofre efeitos de sorção. Em outras palavras, íons fosfatos movimentam-se no solo por difusão, contudo a taxa de movimentação é muito lenta deixando os mesmos sujeitos a reações de sorção nas argilas de uma fina camada destes agregados. Em função disso, a difusão de íons fosfatos em direção a conteúdo sólido interno dos agregados tende a ser muito lenta o que faz com que a sorção de íons se concentre numa fina camada externa dos agregados (GUNARY; HALLSWORTH; CRAWFORD, 1964).

Linquist et al. (1997) apresentaram esse conceito ao avaliar a difusão de fósforo (marcado com  $^{32}\text{P}$ ) aplicado em agregados do solo. Os autores identificaram que, após 3, 14, e 28 dias da aplicação, o fósforo aplicado se difundiu numa camada que eles chamaram de massa reativa, que pode ser definida como a camada no agregado onde o fosfato recentemente adicionado sofre efeitos de sorção. Sete dias após realizar um segundo experimento adicionando fósforo em uma mistura de diferentes agregados os autores observaram um aumento do teor de  $55 \text{ mg kg}^{-1}$  para  $245 \text{ mg kg}^{-1}$  entre classes de agregados de 3,4 mm e 0,375 mm, contudo, em classes de agregados menores que 0,375 mm de diâmetro não foram observadas diferenças significativas, chegando assim à conclusão que a massa reativa dos agregados em estudo era de aproximadamente 0,188 mm (o raio médio para agregados de 0,375 mm de diâmetro).

Wang et al. (2000), ao realizarem estudos semelhantes em nove solos distintos, observaram resultados semelhantes, onde os solos com maior diâmetro médio de agregados apresentaram menor sorção de fósforo. Igualmente aos resultados de Linquist et al. (1997), os resultados de Wang et al. (2000) também apontam que quanto maior o diâmetro médio dos agregados menor é a massa reativa.

As implicações de pesquisas como as de Linquist et al. (1997) e Wang et al. (2000) é que agregados maiores de solos fortemente agregados mesmo associados a altos teores de óxidos de Al e Fe (comuns para solos altamente intemperizados) resultariam em valores menores de massa reativa, ou seja, menor sorção por unidade de massa de solo, apresentando, portanto, correlações negativas entre tamanho do agregado e massa reativa (WANG et al., 2000). Tais observações são indícios que quanto maior a proporção de grandes agregados menor é a massa reativa e, portanto, menor a capacidade tampão de fósforo.

## **Estudos envolvendo relações entre P, diferentes classes de agregados e crescimento de plantas em vasos**

Estudos objetivando avaliar o crescimento de plantas em vasos selecionando determinadas classes de agregados de solo como tratamentos a serem testados, foram desenvolvidos. de Wang; Yost; Linqvist (2001) observaram maior conteúdo total de P e peso seco em brotos de soja e alface cultivados em vasos com agregados maiores (2-6 mm). Contudo há também resultados contraditórios como os de Wiersum (1962), Cornforth (1968) e Misra, Alston e Dexter. (1988), que observaram aumentos no crescimento de plantas e absorção total de P com a diminuição do tamanho dos agregados. Esses pesquisadores atribuem os resultados descritos à menor absorção de P nas camadas de grandes agregados em comparação com pequenos agregados, em função da maior impedância mecânica à penetração da raiz, e conseqüentemente, a redução do acesso aos sítios fontes de P dentro dos agregados, e a menor disponibilidade de P nos agregados maiores.

Resultados semelhantes também foram observados por Thao et al. (2008). Neste trabalho, verificou-se um maior crescimento de plantas e absorção de P encontrados em agregados menores. Os autores atribuem esses resultados ao maior crescimento de raízes mais longas e mais finas como resultado da promoção de adequada aeração do solo (em todos os tratamentos) e maior contato solo-raiz para absorção de água e nutrientes, incluindo P.

O cuidado quanto à aeração do solo aplicado por Thao et al. (2008) dever ser destacado, uma vez que o mesmo é um problema frequentemente encontrado nos estudos envolvendo agregados de solo de diferentes tamanhos, e haja visto que certos descuidos podem conduzir a confusão na interpretação dos efeitos da aeração do solo com o tamanho do agregado. Veja, agregados pequenos tendem a se contactar mais, resultando em aeração limitada do solo para o crescimento adequado das raízes. A aeração insuficiente comumente resulta em crescimento deficiente da raiz e, portanto, reduz a capacidade das raízes em absorver água e nutrientes, incluindo P; conseqüentemente refletindo em reduzido crescimento da planta.

Inclusive destacam-se que problemas de aeração podem ser uma das principais razões que levam aos resultados conflitantes de estudos que examinam agregados de solo de diferentes tamanhos. No estudo de Thao et al. (2008), os autores utilizaram potes planos de barro que ajudaram a eliminar o problema de aeração entre os tratamentos utilizados no experimento. Além disso a camada de solo nos potes era de 4 cm de altura, aumentando assim a exposição do solo ao ar. Soma-se ainda que o pote foi regado de baixo para cima, via ascensão capilar, para evitar que os agregados se compactassem e quebrassem,

permitindo assim que o experimento fosse capaz de eliminar o efeito da reduzida aeração e então avaliar mais precisamente o tamanho dos agregados do solo sobre a disponibilidade de P nas plantas.

Em experimentos, como os de Wang, Yost e Linqvist (2001) e Widowati (2001) foram usados uma mistura de agregados de solo-vermiculita para minimizar os problemas de aeração dos agregados menores e os potes eram regados por cima. Esses pesquisadores descobriram que o crescimento da planta e a absorção de P eram menores nos agregados de menor tamanho. Uma possível razão para isso foi que, em sistemas de crescimento com adição de vermiculita, problemas de compactação e aeração do solo ainda ocorrem com pequenos agregados, resultando em baixo crescimento da planta e absorção de nutrientes, incluindo P, nesses agregados em comparação com os agregados maiores.

### **Avançando com os estudos sobre a relação entre agregação e dinâmica do P no solo**

Investigações mais abrangentes têm sido desenvolvidas com relação aos estudos que envolvem agregação e dinâmica do fósforo no solo, já que por um lado a agregação do solo não é um efeito estático e isolado, e por outro a dinâmica do fósforo no sistema solo-planta não se limita à simples adição desse nutriente ao solo, via fertilização química, seguida de posterior absorção por plantas das frações mais lábeis do solo.

Independente do nutriente, melhorias em agregação são favoráveis à conservação dos compartimentos de nutrientes no solo (JIEN; WANG, 2013), principalmente para aqueles mais limitantes à produção vegetal, como é o caso do P (FONTE et al., 2014; NESPER et al., 2015; GARLAND et al., 2017). Se por um lado um solo bem estruturado condiciona a proteção física da fração orgânica do solo, inclusive as frações fosfatadas, por outro, processos de degradação têm como uma das principais consequências a perda de estrutura do solo com consequentes efeitos negativos sobre a ciclagem do C do solo: tratando-se de solos tropicais, também sobre os compartimentos do fósforo orgânico (FONTE et al., 2014; NESPER et al., 2015).

O conteúdo de fósforo orgânico está intimamente relacionado com a dinâmica do carbono no solo, ainda que o P tenha um ciclo relativamente fechado com a maior parte do P mineralizado sendo adsorvido em microagregados por partículas de tamanho de argila não agregadas (<53  $\mu\text{m}$ ) ou utilizado por plantas (GARLAND et al., 2018). Assim, a agregação do solo é então entendida como um fenômeno intimamente relacionado com o conteúdo orgânico do solo e conhecida por promover aumento em biomassa microbiana assim como acúmulo e manutenção da matéria orgânica (OBERSON et al., 2011) ao mesmo tempo que

reduz a proporção de partículas de tamanho argila e silte livres e disponíveis para a sorção de P.

O armazenamento de fósforo orgânico nos macroagregados de solos intemperizados sugere portanto que os efeitos do manejo na agregação podem influenciar a disponibilidade de P no solo por meios adicionais além da fixação de P (FONTE et al., 2014; NESPER et al., 2015; GARLAND et al., 2018), pois o fósforo orgânico é uma fonte potencial de P passível de mineralização pelas fosfatases do solo, que transformam o fósforo orgânico para fósforo inorgânico disponível às plantas (NANNIPIERI et al., 2011).

É também importante destacar que determinadas espécies de plantas, tais com o feijão-guandu (*Cajanus cajan* L.), podem ser incluídas como estratégias em cultivo de cereais intercalados com leguminosas capazes de mineralizar reservas de P solúvel no solo através de exsudatos das raízes tais como as fosfatases e ácidos orgânicos (LI et al., 2007; HINSINGER et al., 2011). Apesar dos mecanismos envolvidos permanecerem pouco estudados, existem convincentes evidências que pelo menos uma leguminosa tropical, feijão-guandu, pode mobilizar P (AE et al., 1990).

As fosfatases também podem ser influenciadas pelo preparo do solo e pelo manejo de resíduos. Por exemplo, a atividade potencial da fosfomonoesterase ácida aumentou sob plantio direto em um Latossolo Vermelho e foi fortemente associada com o diâmetro médio dos agregados (GREEN et al., 2006), embora as atividades da fosfomonoesterase alcalina e da fosfodiesterase não tenham sido examinadas. Além disso, as atividades de fosfatase em solos intemperizados podem ser estimuladas por adições de matéria orgânica (CUI et al., 2015; SENWO et al., 2007) e foram encontradas para se correlacionar fortemente com maior macro e microagregação (WEI et al., 2014).

Em função destas observações, uma abordagem ecologicamente viável para aumentar o conteúdo de P orgânico do solo pode estar atrelada aos sistemas de manejo que melhorem a estrutura do solo, uma vez que os aumentos na agregação do solo há muito são conhecidos por aumentar o armazenamento de matéria orgânica do solo e a ciclagem de nutrientes, protegendo fisicamente esses compostos da degradação biológica e física e da erosão (SIX et al., 2004).

Neste sentido é importante citar que a biota do solo exerce papel fundamental sobre a disponibilidade de fósforo no solo em sistemas de manejo de base ecológica por atuarem conjuntamente sobre o desenvolvimento e transformação de agregados, sobre a atividade enzimática (ZHU et al., 2018) interação com a rizosfera aumentando as reações de solubilização de fósforo (CHIARAMONTE, 2018) e inclusive sobre a solubilização de formas inorgânicas de fósforo no solo (ALORI; GLICK; BABALOLA, 2017).

Assim sendo, estratégias de manejo conservacionista dos solos, sobretudo aquelas sob reduzido ou ausente revolvimento do solo, com preservação e acúmulo de matéria orgânica,



quer seja via manutenção de resíduos e/ou adição de insumos orgânicos, quer seja pela adoção da rotação de culturas e diversidade de culturas, favorecem processos que possibilitam o desenvolvimento de agregados do solo, tais como o desenvolvimento de raízes e a atividade microbiana. A perturbação mínima do solo associada à manutenção de resíduos culturais, bem como cobertura do solo são componentes-chave para a manutenção e melhoria da agregação do solo com consequentes efeitos sobre a dinâmica e disponibilidade de nutrientes fundamentais para a nutrição de plantas (PORTELLA et al., 2012).

A maior parte das pesquisas que envolvem agregados e ciclagem de nutrientes concentra-se nos estudos do carbono orgânico do solo. Contudo, estudos recentes indicam que o P orgânico pode ser armazenado de maneira semelhante (FONTE et al., 2014; NESPER et al., 2015; GARLAND et al., 2018), o que seria particularmente benéfico para solos tropicais.

Fonte et al. (2014) fornecem importantes *insights* acerca de como o manejo de pastagens pode fortemente influenciar os compartimentos de P orgânico. Naturalmente espera-se que a perda de matéria orgânica seja acompanhada de perdas em agregação do solo, levando assim ao declínio do conteúdo de P orgânico com potenciais implicações sobre a ciclagem de P nestes solos.

Nesper et al. (2015), em uma continuação do trabalho de Fonte et al. (2014), enfatizaram que pastagens degradadas tem significativamente menos macroagregados que microagregados, seguido de menor concentração de P orgânico em comparação com pastagens produtivas. Ainda foram observadas concentrações de P inorgânico total e extraível no solo como um todo, e os componentes estruturais não diferiram entre os tipos de pastagem, sugerindo uma mudança do P orgânico para o não extraível, após a degradação. Solos sob pastagens produtivas continham 37% mais P orgânico do que solos degradados (em  $\text{mg kg}^{-1}$  de solo), principalmente em grandes macroagregados. Os grandes macroagregados e, em particular, os microagregados oclusos, os quais foram identificados como um local importante para o armazenamento de P orgânico.

Além disso há evidências de que o aumento da biodiversidade das culturas, por exemplo por meio de rotação de culturas ou consórcio de duas ou mais espécies de plantas também pode melhorar a agregação do solo.

Por exemplo, em uma rotação milho-leguminosa no oeste do Quênia, a biomassa microbiana foi significativamente aumentada em comparação com o cultivo contínuo de milho (BÜNEMANN et al., 2004). É sabido que o C orgânico exsudado pelas comunidades microbianas é um impulsionador chave do desenvolvimento estrutural do solo ao ligar as partículas primárias do solo em agregados maiores (BRONICK; LAL, 2005). À medida que se aumenta a agregação do solo, o armazenamento de matéria orgânica também melhora,

aumentando a disponibilidade de nutrientes para as plantas em crescimento e comunidades microbianas e, assim, apoiando ainda mais a agregação do solo (LAL, 2006). Como tal, o consórcio de milho com uma cultura local e preferencialmente nutritiva e comestível pode ser uma estratégia potencial para melhorar a agregação do solo e, conseqüentemente, a fertilidade do solo e a absorção de nutrientes pela cultura em solos altamente degradados, além de contribuir com o fator social.

Os trabalhos de Garland et al. (2017) e Garland et al. (2018) apontam enriquecedoras informações acerca de como a interação entre raízes de plantas e solo podem afetar a agregação do solo e a dinâmica do P nos agregados. Em Garland et al. (2017), os autores identificam uma maior agregação do solo sob feijão-guandu quando comparado a cultivo de milho e, em Garland et al. (2018), os autores propõem que esse aumento significativo em agregação do solo juntamente com a lenta taxa de transformação de agregado do solo sob feijão-guandu induziu um maior acúmulo de P, sobretudo a fração P orgânico, em microagregados livres. Tal comportamento pode reduzir perdas de P orgânico de frações oclusas de agregados e sua subsequente sorção como P inorgânico em partículas de silte e argila.

## **Considerações finais**

Verificam-se, portanto, que o fósforo adicionado ao solo pode sim encontrar uma maior massa reativa em solos com maior quantidade de agregados menores e partículas livres de silte e argila, e que a promoção do desenvolvimento de agregados maiores pode servir como estratégia para reduzir a quantidade de P sorvido por unidade de massa de solo.

Entende-se também que o P sorvido por agregados maiores pode se tornar indisponível em função da proteção física, sendo assim, é possível que microagregados livres sirvam mais facilmente como fonte de fósforo do que agregados maiores. Além disso, verificam-se que solos com alto conteúdo de fósforo tendem a ser superestimados quanto a disponibilidade deste conteúdo em função dos processos de determinação laboratoriais já que a quebra de agregados para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) pode induzir um efeito de disponibilidade não obtido em campo pelos processos de absorção de nutrientes, via raízes de plantas.

Há fortes indícios que a agregação do solo pode sim servir como uma estratégia eficaz para redução das perdas de P por efeitos de sorção seguido de maior disponibilidade de P para plantas. Tal efeito é esperado desde que se optem por sistemas de manejo que promovam o desenvolvimento da estrutura do solo acompanhada do aumento em biomassa microbiana com conseqüente maior atividade enzimática e acúmulo e manutenção da

matéria orgânica. Desta maneira, ao mesmo tempo, (I) reduzindo a proporção de partículas de tamanho argila e silte livres e disponíveis para a sorção de P (II) e aumentando o conteúdo de P nos compartimentos vivos do sistema de produção.

## Agradecimentos

À FAPES pelo financiamento e ao CNPq pela bolsa, ambos vinculados ao edital FAPES/CNPQ nº 11/2019 - Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Regional (PDCTR).

## Referências

AE, N.; ARIHARA, J.; OKADA, K.; YOSHIHARA, T.; JOHANSEN, C. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian Subcontinent. **American Association for the Advancement of Science**. v. 248, p. 477–480, 1990.

ALORI, E.T., GLICK, B.R., BABALOLA, O.O. Microbial phosphorus solubilization and Its potential for use in sustainable agriculture. **Frontiers in Microbiology**. v. 8, p. 971-979, 2017.

ANGERS, D.A.; RECOUS, S.; AITA, C. Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of  $^{13}\text{C}$   $^{15}\text{N}$ -labelled wheat straw in situ. **European Journal of Soil Science**, v. 48, p. 295–300, 1997.

BAVEYE, F.C. Looming scarcity of phosphate rock and intensification of soil phosphorus research. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.637-642, 2015.

BRAIDA, J.A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A.L.; GATIBONI, L.C. (Orgs.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2011. v. VII, p. 222-227.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p. 3-22, 2005.

BUCHER, C.A.; BUCHER, C.P.C.; ARAUJO, A.P.; SPERANDIO, M.V.L. Fósforo. In: FERNANDES, M.S.; SOUZA, S.R.; SANTOS, L.A. **Nutrição mineral de plantas**. 2. ed. Viçosa: SBCS, 2018. p. 401-427.

BÜNEMANN, E.K.; SMITHSON, P.C.; JAMA, B.; FROSSARD, E.; OBERSON, A. Maize productivity and nutrient dynamics in maize-fallow rotations in western Kenya. **Plant and Soil**, v. 264, p.195–208, 2004.

CHIARAMONTE, J.B. **The rhizosphere microbiome of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and the effects on phosphorus uptake**. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

CORNFORTH, I.S. The effect of size of soil aggregates on nutrient supply. **The Journal of Agricultural Science**, v. 70, p. 83–85, 1968.

CUI, H.; ZHOU, Y.; GU, Z.; ZHU, H.; FU, S.; YAO, Q. The combined effects of cover crops and symbiotic microbes on phosphatase gene and organic phosphorus hydrolysis in subtropical orchard soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 82, p.119–126, 2015.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 507–514, 1999.

FORTE, S.J.; NESPER, M.; HEGGLIN, D.; VELÁSQUEZ, J.E.; RAMIREZ, B.; RAO, I.M.; BERNASCONI, S.M.; BÜNEMANN, E.K.; FROSSARD, E.; OBERSON, A. Pasture degradation impacts soil phosphorus storage via changes to aggregate-associated soil organic matter in highly weathered tropical soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. 150–157, 2014.

GARLAND, G.; BÜNEMANN, E.; OBERSON, A.; FROSSARD, E.; SNAPP, S.; CHIKOWO, R.; SIX, J. Phosphorus cycling within soil aggregate fractions of a highly weathered tropical soil: a conceptual model. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 116, p.91–98, 2018.

GARLAND, G.; BÜNEMANN, E.K.; OBERSON, A.; FROSSARD, E.; SIX, J. Plant-mediated rhizospheric interactions in maize-pigeon pea intercropping enhance soil aggregation and organic phosphorus storage. **Plant and Soil**, v. 415, n. 1–2, p. 37–55, 2017.

GREEN, V.S.; DAO, T.H.; CAVIGELLI, M.A.; FLANAGAN, D.C. Phosphorus fractions and dynamics among soil aggregate size classes of organic and conventional cropping systems. **Soil Science**, v. 17, n. 11, p. 874–885, 2006.

GUNARY, D.; HALLSWORTH, E.G.; CRAWFORD, D.V. The experimental study of the mobility of ions in soil, with particular reference to phosphorus. **Easter School in Agricultural Science**, v. 11, p. 149-156, 1964.

HAO, X.; CHANG, C.; LI, X. Long-term and residual effects of cattle manure application on distribution of P in soil aggregates. **Soil Science**, v. 169, p. 715–728, 2004.

HINSINGER, P.; BETENCOURT, E.; BERNARD, L.; BRAUMAN, A.; PLASSARD, C.; SHEN, J.; TANG, X.; ZHANG, F. P for two, sharing a scarce resource- soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species. **Plant Physiology**, v. 156, p. 1078–1086, 2011.

JASINSKI, S. Phosphate rock, statistics and information. In: **US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries**, Reston: US Geological Survey, 2013.

JIE, S.H.; WANG, C.S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. **Catena**, v. 110, p. 225–233, 2013.

LAL, R. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. **Land Degradation & Development**, v. 17, p. 197–209, 2006.

LI, B.; GE, T.; XIAO, H.; ZHU, Z.; LI, Y.; SHIBISTOVA, O.; LIU, S.; WU, J.; INUBUSHI, K.; GUGGENBERGER, G. Phosphorus content as a function of soil aggregate size and paddy cultivation in highly weathered soils. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 8, p. 7494–7503, 2016.

LI, L.; LI, S.M.; SUN, J.H.; ZHOU, L.L.; BAO, X.G.; ZHANG, H.G.; ZHANG, F.S. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, p. 11192–11196, 2007.

LINQUIST, B.A.; SINGLETON, P.W.; YOST, R.S.; CASSMAN, K.G. Aggregate size effects on the sorption and release of phosphorus in an Ultisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 160–166, 1997.

MARGENOT, A.J.; PAUL, B.K.; SOMMER, R.R.; PULLEMAN, M.M.; PARIKH, S.J.; JACKSON, L.E.; FONTE, S.J. Can conservation agriculture improve phosphorus (P) availability in weathered soils? effects of tillage and residue management on soil P status after 9 years in a Kenyan Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 157–166, 2017.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. London: Elsevier, 2012. 643p.

MCDOWELL, R.W.; SCOTT, J.T.; STEWART, I.; CONDRON, L.M. Influence of aggregate size on phosphorus changes in a soil cultivated intermittently: analysis by  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance. **Biology and Fertility of Soils**, v. 43, n. 4, p. 409–415, 2007.

MISRA, R.K.; ALSTON, A.M.; DEXTER, A.R. Root growth and phosphorus uptake in relation to the size and strength of soil aggregates. I. experimental studies. **Soil Tillage Research**, v. 11, p. 117–132, 1988.

NANNIPIERI, P.; GIAGNONI, L.; LANDI, L.; RENELLA, G. Role of Phosphatase Enzymes in Soil. In: BÜNEMANN, E.; OBERSON, A.; FROSSARD, E. **Phosphorus in action**, v. 100, p. 215–243, 2011.

NESPER, M.; BÜNEMANN, E. K.; FONTE, S.J.; RAO, I.M.; VELÁSQUEZ, J.E.; RAMIREZ, B.; HEGGLIN, D.; FROSSARD, E.; OBERSON, A. Pasture degradation decreases organic P content of tropical soils due to soil structural decline. **Geoderma**, Special issue on developments in soil organic phosphorus cycling in natural and agricultural ecosystems, v. 257–258, p. 123–133, 2015.

NOVAIS, R.F.; SMITH, T.J. **Fósforo em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 399 p.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, v. 76, n. 1–3, p. 319–337, 1984.

OBERSON, A.; PYPERS, P.; BÜNEMANN, E. K.; FROSSARD, E. Management impacts on biological phosphorus cycling in cropped soils. In: BÜNEMANN, E.; OBERSON, A.; FROSSARD, E. (Eds.). **Phosphorus in action: biological processes in soil phosphorus cycling**. Heidelberg: Springer, 2011.

PORTELLA, C.M.R.; GUIMARÃES, M. de F.; FELLER, C.; FONSECA, I.C. de B.; TAVARES FILHO, J., Soil aggregation under different management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36, p. 1868–1877, 2012.

RANATUNGA, T.D.; REDDY, S.S.; TAYLOR, R.W. Phosphorus distribution in soil aggregate size fractions in a poultry litter applied soil and potential environmental impacts. **Geoderma**, v. 192, p. 446–452, 2013.

SENWO, Z.N.; RANATUNGA, T.D.; TAZISONG, I.A.; TAYLOR, R.W.; HE, Z. Phosphatase activity of Ultisols and relationship to soil fertility indices. **Journal of Food Agriculture & Environment**. v. 5, p. 262–266, 2007.

SHEKLABADI, M., MAHMOUDZADEH, H., MAHBOUBI, A.A., GHARABAGHI, B., AHRENS, B. Land use effects on phosphorus sequestration in soil aggregates in western Iran. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, n. 10, p. 6493–6503, 2014.

SINSUK, S., THANACHIT, S., ANUSONTORNPERM, S., KHEORUENROMNE, I., Phosphorus availability in different aggregate sizes of tropical red soils amended with Cassava Starch Waste. **Agriculture and Natural Resources**. v. 53, p. 179–187, 2019.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, p. 7–31, 2004.

SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p. 1350–1358, 1999.

THAO, H.T.B.; TAKEO, T.G.; TAKEO, Y.; WIDOWATI, L.R. Effects of soil aggregate size on phosphorus extractability and uptake by rice (*Oryza sativa* L.) and corn (*Zea mays* L.) in two Ultisols from the Philippines. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 54, n. 1, p. 148–158, 2008.

WANG, X.; JACKMAN, J.M.; YOST, R.S.; LINQUIST, B.A. Predicting soil phosphorus buffer coefficients using potential sorption site density and soil aggregation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 1, p. 240–246, 2000.

WANG, X.; YOST, R.S.; LINQUIST, B.A. Soil aggregate size affects phosphorus desorption from highly weathered soils and plant growth. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 1, p. 139–146, 2001.

WEI, K.; CHEN, Z.H.; ZHANG, X.P.; LIANG, W.J.; CHEN, L.J. Tillage effects on phosphorus composition and phosphatase activities in soil aggregates. **Geoderma**, v. 217–218, p. 37–44, 2014.

WIDOWATI, L.R. **Aggregate size effects on extractable phosphorus in acid upland soils, Los Baños: University of the Philippines**. (MS thesis). 2001.

WIERSUM, L.K. Uptake of nitrogen and phosphorus in relation to soil structure and nutrient mobility. **Plant Soil**, v.16, p. 62–70, 1962.

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