



Grupo eumed.net / Universidad de Málaga y
Red Académica Iberoamericana Local-Global
Indexada en IN-Recs (95 de 136), en LATINDEX (33 DE 36), reconocida por el DICE, incorporada a la
base de datos bibliográfica ISOC, en RePec, resumida en DIALNET y encuadrada en el Grupo C de la
Clasificación Integrada de Revistas Científicas de España.
Vol 9. N° 27
Octubre 2016
www.eumed.net/rev/delos/27

BIOCARVÃO: UM POSSÍVEL CONDICIONADOR DE FÓSFORO EM SOLOS AMAZÔNICOS?

João Batista Dias Damaceno¹
joaodiasrm@gmail.com

Danielle Monteiro de Oliveira²
dmoliveira.am@gmail.com

Brasil

CONTENIDO

Resumo	2
Abstract	2
1. Introdução	2
2. Metodologia	3
3. Resultados e discussão	4
3.1 Solos da Amazônia	4
3.1.1 Latossolos	4
3.1.2 Terra Preta de Índio	4
3.2 Biocarvão	5
3.2.1 Produção do biocarvão	6
3.2.2 Utilização do biocarvão no solo	6
3.3 Fósforo	7
3.3.1 Fósforo no solo	8
3.3.2 Efeito residual da adubação fosfatada	9
4. Conclusão	10
5. Referências bibliográficas	11

¹ Engenheiro Agrônomo, Mestrando em Agricultura no Trópico Úmido –INPA. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA,

² Bióloga, Mestre em Agricultura no Trópico Úmido – INPA, Doutoranda em Ciências Florestais – UNESP Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho – UNESP

RESUMO

O estado atual da agricultura na Amazônia depende em parte das características químicas de seu solo que provocam dificuldade de manejo. Uma das principais dificuldades na nutrição de plantas no Trópico Úmido é a baixa disponibilidade natural de fósforo nos solos associado a sua alta taxa de retenção e fixação. Buscar alternativas que garantam a fertilidade e a manutenção do fósforo nesses solos é o objetivo dos estudos que estão sendo realizados com biocarvão enfocando seu comportamento e sua relação com o fósforo.

Palavras-chave: Condicionador do solo, Adubação fosfatada, Reações químicas, Carbono pirogênico.

ABSTRACT

The current state of agriculture in the Amazon depends in part on the chemical characteristics of its soil that cause difficulty in handling. One of the main difficulties in plant nutrition in the Humid Tropics is the low natural phosphorus availability in soils associated with its high retention rate. Seek alternatives to ensure fertility and phosphorus in these soils maintenance is the goal of the study being carried out with biochar focusing on their behavior and its relationship with the match.

Key-words: Soil Conditioner, phosphorus fertilization, chemical reactions, pyrogenic carbon.

1. INTRODUÇÃO

Os solos que predominam em toda a região amazônica pertencem a classe dos Latossolos e Argissolos, caracterizados pelo baixo conteúdo de nutrientes, principalmente Fósforo (P), elevada acidez, predominância de argilas de baixa atividade, baixa Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e elevada quantidade de óxidos de Ferro (Fe) e Alumínio (Al) (Sanchez, 1982). Apesar de todos esses fatores limitantes, a ciclagem de nutrientes garante a manutenção das florestas, o que não ocorre em solos agricultáveis e sem cobertura vegetal, resultando em perda da fertilidade num curto espaço de tempo (Lima et al., 2011; Vale Junior, 2011).

Diferente do que ocorre na grande maioria dos solos de terra firme, há na Amazônia, pequenas manchas de solos com alta fertilidade conhecidas como Terras Pretas de Índio (TPI's) (Sombroek, 2003). Essas são caracterizadas pelo pH mais elevado, baixa saturação por Al e elevado teor de nutrientes, principalmente o P, além de apresentar estabilidade da fertilidade ao longo de centenas a milhares de anos desde suas formações antrópicas. Nas TPI's, acredita-se

que a elevada presença de carbono pirogênico (biocarvão) associada a matéria orgânica depositada pelas comunidades tem a função de garantir sua contínua fertilidade (*Lehmann e Joseph, 2009; Beesley et al., 2010*).

O biocarvão é o subproduto resultante da combustão incompleta de resíduos orgânicos em oxigênio limitado ou ausente, que apresenta estrutura aromática condensada resistente a decomposição (*Lehmann e Joseph, 2015*). A sua utilização em solos tropicais associada a outras medidas como a incorporação de matéria orgânica e adubos minerais visa reproduzir as características encontradas nas TPI's num menor tempo, visto que confere diversas mudanças nos solos como estoque de carbono, retenção de água, ambiente favorável a microorganismos, aumento da CTC e pH, diminuição da saturação de Fe e Al e melhoria na disponibilidade de P, porém sua relação com o P ainda demanda pesquisas (*Lehmann e Joseph, 2009*).

A utilização do biocarvão, que tem capacidade de adsorver fósforo, pode melhorar as condições de fornecimento inicial de P e influenciar sobre seu efeito residual no solo (*Lehmann, 2007; Falcão et al., 2003*). Alguns estudos pontuam que a adsorção de P pelo biocarvão tem característica fraca, como a ligação eletrostática ou adsorção física, enquanto que a adsorção por Fe e Al ocorre de forma forte, por ligação covalente. Esse fenômeno impede ou retarda a adsorção e fixação de P pelos óxidos e argilominerais (*DeLuca et al., 2009; Gatiboni et al., 2013*). O tipo de material e o sistema de produção do biocarvão pode influenciar na criação de grupos funcionais de superfície (carboxílicos, fenólicos etc.) que adsorvem mais ou menos o fósforo (*Morales et al., 2013*).

Devido à alta capacidade de adsorção e fixação de P pelos solos amazônicos, cerca de 90% do P aplicado na forma de fertilizantes solúveis não é aproveitado pelas plantas inicialmente. Esse baixo aproveitamento limita a produção e a produtividade, além de gerar altos custos com fertilizações futuras numa mesma área (*Grant et al., 2001; Raij, 2011*). A adição de biocarvão no solo pode diminuir a necessidade por adubações de manutenção por possivelmente beneficiar o aumento do efeito residual de P, porém outros fatores estão associados a este processo como o pH, teor de argila, e as fontes de P utilizadas (*Novais et al., 2007; Cordell et al., 2009*).

2. METODOLOGIA

Foi realizada revisão bibliográfica com levantamento da literatura nacional e internacional, buscando compreender os solos amazônicos, suas principais características químicas e físicas e sua baixa disponibilidade de fósforo. Com isso, o objetivo desse trabalho é discutir sobre a importância desse elemento, suas principais reações e uma possível medida para contornar esse cenário utilizando o biocarvão como condicionador de solo, podendo aumentar o efeito residual do fósforo no solo, diminuindo custos com adubações frequentes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Solos da Amazônia

Os solos da Amazônia foram formados pelo intemperismo de rochas sedimentares e ígneas a milhões de anos, sendo que as características do material de origem, o tempo de exposição das rochas, o clima e a ação das chuvas intensas na região aceleraram este processo, dando origem a solos profundos e com boas condições de drenagem (Falesi, 1986). A mineralogia é na sua maior parte composta por caulinita, porém ocorrem outros minerais, como a goethita, gibbsita, hematita, mica, feldspatos e quartzos (Kitagawa e Moller, 1979). De maneira geral, apesar das boas características físicas, os solos da Amazônia são quimicamente prejudiciais ao bom desenvolvimento das plantas, limitando seu uso para a agricultura (Sanches et al., 1982). O material de origem pobre, resulta em baixo pH do solo, elevada saturação por alumínio (Al), reduzida capacidade de troca de cátions (CTC), pouca reserva de macro e micronutrientes, especialmente em fósforo (P), pela alta capacidade de fixação desses solos (Cravo et al., 2012; Vale Junior, 2011).

Na Amazônia cerca de 75% dos solos são classificados como Latossolos e Argissolos. Os Latossolos representam cerca de 42% deste total, equivalente a uma área de mais 2.000.000 Km². Os Argissolos abrangem uma área superior a 1.600.000 Km², representando quase 33 % dos solos (Rodrigues, 1996). Em contrapartida, as Terras Pretas de Índio (TPI's), que apresentam boa fertilidade quando comparadas a estes solos, cobrem entre 0,1 a 0,3% da Bacia Amazônica, equivalente a uma área entre 6 a 18 mil Km² (Sombroek et al., 2003).

3.1.1 Latossolos

Os Latossolos são solos minerais que apresentam um horizonte diagnóstico (B Latossólico - Bw) bastante intemperizado e com pouca diferenciação entre os horizontes com transições difusas. Predomina a argila caulinita 1:1 e os óxidos de Fe e Al. Na fração areia predominam o quartzo e poucos fragmentos de feldspatos (Coelho et al., 2002). Ocorrem predominantemente em relevo plano ou levemente ondulado, prevalecendo Latossolos Amarelos. São solos profundos (> 2m), classificados na sua maioria como argilosos, possuindo boa porosidade e drenagem (Marques et al., 2004). Em sua maioria, apresentam caráter distrófico e /ou álico com baixos valores de pH. A sua baixa fertilidade relativo aos teores de bases trocáveis e P associado, alto teor de Al e acidez limitam estes solos, tornando-os exigentes em corretivos e fertilizantes (Shinzato et al., 2005).

3.1.2 Terra Preta de Índio

Na Amazônia são encontradas algumas manchas de solos escuros com alta fertilidade comparadas aos outros solos, conhecidas como Terras Pretas de Índio (TPI's). Esses solos

contém matérias característicos indígenas, como pedaços de cerâmica e há registros de ocupação por populações pré-colombianas (Sombroek, 1966; Falesi, 1972; Sombroek, 2003; Kern, 2003; Falcão et al., 2003). As TPI's não possuem ordem na classe de solos, sendo classificada como horizonte superficial A, com aspecto antrópico (A antrópico) e estão mais presentes em Latossolos e Argissolos (EMBRAPA, 2006). A profundidade média das TPI's está entre 30 e 60 cm, mas pode chegar a 2 m (Kern et al., 2003). Segundo Smith (1980), cada 1 cm de TPI representa 10 anos de ocupação antrópica. A sua cor escura é devida ao processo de queima de materiais orgânicos das comunidades (ossos de animais e humanos, excrementos, restos de vegetais, etc.). Glaser (2007) sugeriu que a formação das TPI's engloba três processos: A formação do carbono pirogênico (biocarvão), a incorporação dos nutrientes advindos dos resíduos e ação dos micro-organismos.

Com base na fertilidade, as TPI's apresentam altos teores de Cálcio (Ca), Magnésio, (Mg), Manganês (Mn), Zinco (Zn), Nitrogênio (N), Fósforo (P), Carbono (C), Matéria Orgânica (MO), baixa saturação por Al, baixo teor de Potássio (K), pH próximo a 6,0 e alta CTC. O P é a característica marcante nesses solos e são possivelmente provenientes de ossos (Falcão et al. 2001; Falcão e Borges, 2006; Glaser, 2007). O carbono pirogênico compõe cerca de 35 a 45% do carbono orgânico das TPI's e tem o papel de sustentar sua fertilidade. Nos últimos anos, a utilização do biocarvão tenta reproduzir as características que o carbono pirogênico exerce nas TPI's no objetivo de melhorar as características químicas, físicas e biológicas dos solos não-antrópicos (Glaser et al., 2003, Sombroek, 2003; Lehmann, 2009).

3.2 Biocarvão

O biocarvão é o produto sólido obtido através da decomposição térmica (pirólise) de biomassa (madeira, folhas, etc.) em ambiente com ausência ou limitação de oxigênio (O₂) sob temperaturas consideradas baixas (<700 °C) e se difere do carvão vegetal, na sua obtenção e destinação, mas não como fonte de energia (Lehmann e Joseph, 2015) O termo biocarvão ou *biochar* (*bios*: vida, *char*: carvão), foi obtido através dos estudos do carbono pirogênico presente nas TPI's, e sua relevância na qualidade dos solos e o estoque de carbono (Lehmann e Joseph, 2009).

A estrutura do biocarvão produzido artificialmente, policíclica aromática condensada, se assemelha a encontrada nas TPI's dando origem aos grupos funcionais, capazes de garantir a estabilidade que varia de séculos a milênios. As pesquisas em andamento para a produção do biocarvão visam obter essas características, tendo como eixo as pesquisas relacionada a melhoria dos solos tropicais, a geração de biocombustíveis e a sustentabilidade ambiental. A utilização de resíduos vegetais para produzir o biocarvão tem evidenciado aspectos que o viabilizam como condicionar de solo para a agricultura, trazendo uma série de benefícios (Rezende et al., 2011; Novotny et al., 2012; Peake et al., 2014).

3.2.1 Produção do biocarvão

Para a produção do biocarvão, através pirólise, utiliza-se um equipamento chamado biocarbonizador, conhecido popularmente como “retorta”. A biomassa degradada nesse processo se divide em três subprodutos, o bio-óleo que é um vapor líquido condensável, os gases não condensáveis (hidrocarbonetos) e uma fração sólida com estrutura porosa carbonizada, o biocarvão (Stewart et al., 2013). Há vários tipos de pirólise, que variam conforme a finalidade, sendo as principais a rápida, com temperaturas próximas a 500 °C (bio-óleo) e a lenta, com temperaturas entre 350-750 °C (biocarvão) (Nachenius et al., 2013).

Materiais vegetais como celulose, a hemicelulose e a lignina são degradados de acordo com a temperatura. Aos 150 °C, a hemicelulose começa ser degradada, formando óxidos de carbono, já a celulose degrada-se entre 280 a 350 °C e lignina entre 200 e 500 °C, sendo a última a ser degradada (Taccini, 2010). Temperaturas mais elevadas (>550 °C) produzem um biocarvão mais estável a decomposição (recalcitrante) e com maior área superficial (>400 m² g⁻¹), enquanto menores temperaturas (<550 °C) promovem menor recalcitrância, menor área superficial e maior CTC, devido aos grupos funcionais. De modo geral, a faixa entre 450-550 °C é considerada ideal para produção do biocarvão (Lehmann, 2007; Keiluweit et al., 2010).

Na carbonização, ocorrem a quebra das ligações carbono-carbono do material de origem, formando camadas de anéis aromáticos, em forma de anel benzênico com ligações carbono-oxigênio ou carbono-hidrogênio. Após a carbonização, no biocarvão ainda há uma pequena quantidade de matérias não volatilizados e cinzas. As características físicas e químicas finais do biocarvão dependem das propriedades da matéria-prima utilizada e a temperatura de pirólise (Lehmann e Joseph, 2009; Sohi et al., 2010).

3.2.2 Utilização do biocarvão no solo

No solo, o biocarvão tem a capacidade de alterar as propriedades físicas, químicas e biológicas, além de apresentar benefícios ambientais. O comportamento do biocarvão quanto as reações químicas, podem ser tão complexas quanto as que ocorrem nas argilas (Joseph et al., 2010). Ambientalmente, o uso do biocarvão reduz os gases do efeito estufa, como o gás carbônico (CO₂) e o óxido nitroso (N₂O), pois o carbono fica protegido da decomposição e liberação para a atmosfera dentro das estruturas aromáticas. Além disso, auxilia na purificação da água por reter metais pesados (Singh et al., 2010; Chen et al., 2014). O biocarvão também aumenta a atividade e estrutura dos micro-organismos no solo, pois melhora a retenção e nutrientes e oferece condições de sobrevivência e abrigo em seus micro e macroporos (Lehmann et al., 2011).

As melhorias físicas promovidas pelo biocarvão são determinadas pela estrutura da matéria-prima. O biocarvão tem a capacidade de elevar a área superficial do solo por aumentar os espaços porosos com a ordenação dos átomos de carbono e a perda de compostos voláteis. Essa elevação intensifica processos de retenção e acúmulo de água por capilaridade e aumento a aeração do solo (Lehmann e Joseph, 2009). Quanto as características químicas, a aplicação do

biocarvão, pode elevar o pH do solos, diminuir os teores de Al, elevar a retenção de nutrientes, devido a área superficial com cargas negativas, e a elevar a CTC (Liang et al., 2006; Karhu et al., 2011).

Van Zwieten et al. (2010) demonstraram que a aplicação de 10 ton^{-1} de biocarvão em Latossolo elevou em três meses o pH e diminuiu o Al trocável no solo. A elevação da CTC promovida pelo biocarvão é atribuída a presença de grupos funcionais reativos sobre suas partícula, alguns dependentes de pH (Cheng et al., 2008). Segundo Glaser et al. (2003), a oxidação do carbono do biocarvão pode explicar a criação de grupos funcionais com cargas negativas (carboxílicos, etc) e podem ser resultado de dois processos a oxidação superficial das partículas e a adsorção de matéria orgânica sobre a superfície do biocarvão.

As principais reações desses grupos funcionais no aumento na disponibilidade de P no solo são a redução do ponto de carga zero dos óxidos de Fe e Al e dos minerais 1:1, a competição por sítios de adsorção e a precipitação com cátions livres na solução (Al) (Guppy et al., 2005). As condições de pirólise, o tamanho das partículas, a composição da matéria prima e as propriedades do solos interferem sobre o tipo e as taxas de reações de adsorção-dessorção, precipitação-dissolução do P na superfície do biocarvão (Kuzuyakov et al., 2009).

3.3 Fósforo

O fósforo (P) é uma macronutriente mineral finito e insubstituível nas plantas, proveniente da mineração de rochas fosfáticas, sendo as apatitas (fosfatos de cálcio) os minerais primários mais comuns. Nos solos, a distribuição e as formas do P são influenciadas pelo material de origem e o grau de intemperismo (Malavolta, 2006). As fontes de P se dividem em solúveis, que representam 90% do utilizado na agricultura e os praticamente insolúveis em água. As principais fontes solúveis utilizadas são o superfosfato simples (SFS), o triplo (SFT) e os fosfatos de amônio (MAP e DAP) (Lana et al., 2004).

A China, os EUA e o Marrocos produzem cerca de 73% de todo o fosfato mundial e o Brasil apenas 3%. Em 2014, a produção nacional foi de pouco mais de 6 milhões de toneladas (82% em Minas Gerais e Goiás), porém ainda foram importadas 3 milhões de toneladas de fertilizantes fosfatados (DNPM, 2015). Estudos apontam que até o final do século as reservas mundiais de P serão esgotadas, sendo necessário medidas que melhore o aproveitamento desse nutriente (Cordell et al., 2009).

As plantas absorvem P por gradiente de concentração, de forma ativa, e sua absorção depende da interceptação radicular, que tem maior eficiência em até 2 mm de distância. As formas mais absorvidas pelas plantas são o ortofósforo biácido (H_2PO_4^-) em maior proporção e o ortofósforo monoácido (HPO_4^{2-}) em menor proporção e a disponibilidade das formas depende do pH do solo (Faquin, 2005; Novais et al., 2007). Na planta, o P desempenha funções de armazenar e transferir energia, através das moléculas fosfáticas (ADP e ATP). Além disso, exerce papel

fundamental na fotossíntese, respiração e na divisão celular, sendo também componente de várias proteínas e ácidos nucleicos (Grant et al., 2001; Dechen e Nachtigall, 2007).

A deficiência de P nas plantas provoca coloração verde-escura a arroxeada nas folhas mais velhas. Lima (2009), comenta que essa coloração é resultado do acúmulo de antocianinas, que reduzem a respiração e fotossíntese, afetando o crescimento das plantas, atraso de lançamento de folhas, redução de raízes secundárias e menor produção de matéria seca. Oliveira et al. (1994), observou que em mudas de Castanheira-do-brasil, a deficiência de fósforo provoca sintomas visuais de limbo mais claro que as nervuras e necrose nas pontas das folhas mais velhas. Segundo Taiz e Zeiger (2010), o P é fundamental no desenvolvimento inicial das plantas e que sua limitação promove crescimento atrofiado na fase juvenil.

3.3.1 Fósforo no solo

O P movimenta-se pouco no solo, permanecendo no local de intemperismo ou de adubação, sendo pouco lixiviado mesmo em solos mais arenosos, e sua movimentação depende da umidade do solo (Raij, 1991; Stutter et al., 2015). No solo, as formas inorgânicas de P são os íons ortofosfatos derivados do ácido ortofosfórico ($\text{H}_3\text{PO}_4^{3-}$) que dependem diretamente do pH para determinar a forma aniônica predominante. Com pH entre 2,1 e 7,2, predomina a forma de $\text{H}_2\text{PO}_4^{4-}$, entre 7,2 e 12 a forma de HPO_4^{-2} e acima de 12, a forma de fosfato PO_4^{3-} . Em função do pH, nos solos tropicais mais de 90% do P está sob a forma de $\text{H}_2\text{PO}_4^{4-}$ (Raij, 2011). As formas orgânicas de P fazem parte dos resíduos vegetais, como fosfatos de inositol (10 a 80%), fosfolipídios (0,5 a 7%), ácidos nucleicos (~3%) e outros ésteres fosfato (> 5%) (Giaveno et al., 2010).

O grau e a energia de abastecimento do P ligado ao solo para o P em solução (P-disponível) determina sua classificação na fase sólida em P-lábil, que é a fase mineral e a solução estão em equilíbrio, P-moderadamente lábil, onde devido a energia de ligação, os fosfatos retidos tem mais dificuldade para serem liberados e P- não lábil, que está indisponível na solução e as plantas (Gatiboni et al., 2013). Essa classificação é influenciada pelos seguintes fatores de P: fator intensidade (I), que é o P da solução, fator quantidade (Q) que é o P na fase sólida e o fator capacidade de P (FCP), que é a taxa com que (I) é abastecida por (Q), sendo controlada pelas energias de ligações do nutriente a argila e óxidos (Novais e Smyth, 1999; Silva e Raij, 1999). Nos solos tropicais, acontecem reações químicas complexas que interferem a disponibilidade de P, sendo elas: precipitação/dissolução, adsorção/dessorção e fixação/liberação.

A precipitação é uma reação química lenta, onde dependendo do pH, os íons fosfatos formam compostos com baixa solubilidade (precipitados) com os cátions de Al (Variscita), Fe (Strengnita) em solos ácidos e com o Ca (Hidroxiapatita) em solos alcalinos. A dissolução ocorre com o aumento do pH, que solubiliza as ligações Fe-P e Al-P e com a diminuição do pH, que solubiliza as ligações Ca-P. No geral, a menor formação de precipitados ocorre nas faixas de pH em água entre 5,5 e 6,8 (Sample et al., 1980).

A adsorção (P-lábil) pode ocorrer pela formação de complexos de esfera externa ou interna. O de esfera externa ocorrem lentamente com a adsorção do fosfato nos oxihidróxidos (Fe e Al) e nos grupos funcionais (Aluminol) das argilas por troca de ligantes (OH_2^+ e OH^-) que estão o grupo funcional de superfície e os íons fosfatos, tornando uma ligação eletrostática fraca. O de esfera interna ocorre rapidamente, sendo a adsorção direta do grupo funcional com o íon fosfato por ligação covalente. Nos solos tropicais ocorre mais complexos de esfera interna com os grupamentos superficiais dos óxidos de Fe (Fe-OH), Al (Al-OH) e argilominerais (Pierzynski et al., 2005; Meurer, 2010). A dessorção depende da natureza e da energia de ligação do P aos grupos funcionais que pode se ligar em forma monodentada (um oxigênio do fosfato ligado ao metal), bidentada (dois oxigênios ligados) e binucleada (dois oxigênios do fosfato ligados a dois átomos do metal). A energia de ligação aumenta na ordem de monodentada > bidentada > binucleada, diminuindo na mesma proporção a possibilidade da dessorção do P (Parfitt, 1989; Rheinheimer e Anghinoni, 2003).

A fixação (P- não lábil) ocorre inicialmente através processo de adsorção de P, porém com o envelhecimento dessa adsorção, as ligações tendem a ser específicas com a formação de compostos binucleados ou com a penetração do P nas imperfeições dos minerais, que torna a relação adsorvato (P) – adsorvente (solo) muito forte. Essa reação resulta na menor possibilidade de dessorção devido à alta estabilidade, tornando o processo praticamente irreversível (Meurer, 2010). Os óxidos de Fe mal cristalizados, a quantidade de Al e a caulinita são os responsáveis por este fenômeno em solos tropicais (Parfitt, 1989).

3.3.2 Efeito residual da adubação fosfatada

O efeito residual do P no solo diz respeito a quantidade de P disponível as plantas com o passar dos meses ou anos. Os adubos fosfatados, quando adicionados ao solo e sob a presença de água tem efeito imediato sobre a absorção da cultura instalada, mas permanece no solo após a retirada da cultura. No geral, os decréscimos de P nos solos variam com o tempo e resultam da relação de vários fatores, como o tipo de solo, método de aplicação, a presença de óxidos de Fe e Al, o teor de argila, pH do solo, exportação pela cultura (dreno), doses e fonte de P (Sousa e Lobato, 2003).

A fonte tem grande influência sobre o efeito residual do P nos solos, sendo fontes solúveis reagem mais rapidamente nos solos quando comparado aos fosfatos naturais (Novais et al., 2007). Os fertilizantes fosfatados solúveis em água, em geral, tem efeito residual de 60%, 45%, 35%, 15% e 5%, após um, dois, três, quatro e cinco anos da aplicação na fertilidade do solo (Sousa et al., 1987). Levando em consideração os solos tropicais, onde o aproveitamento de P pelas plantas gira em torno de 10 % do aplicado, a utilização do P residual pode ser ainda mais eficaz e é primordial para economia na adubação (Alcarde et al., 1991).

Segundo Almeida et al. (2003) a melhor forma de avaliar o efeito residual da adubação fosfatada sobre o cultivo subsequente é inferindo sobre a produção, o rendimento geral de matéria

seca (parte aérea e raízes) e o conteúdo de P presente nas culturas. Pode-se ainda inferir com base em sintomas visuais de deficiência e através de análise do conteúdo de P no solo.

3.3.2.1 Biocarvão no efeito residual do fósforo

Poucos estudos que evidenciam a relação do biocarvão sobre o efeito residual do P nos solos, porém sua adição melhora a disponibilidade de P e auxilia no crescimento das plantas. Sabe-se que o biocarvão tem a capacidade de adsorver fortemente os íons de ortofosfato, porém o mecanismo ainda não está bem esclarecido (Lehmann, 2007; Falcão et al., 2003). A adsorção do fosfato pelo biocarvão evita sua adsorção por óxidos de Fe e Al, disponibilizando o P por mais tempo a solução do solo. O P pode estar ligado ao biocarvão através de adsorção física (van der waals), onde os íons fosfato não estejam ligados a superfície do coloide artificial, mas sim por uma certa distância através de uma campo elétrico. Essa força de baixa magnitude permite a fácil troca do P com a solução do solo e por esse motivo a adsorção ao biocarvão não provoca processo de fixação, diferente das caulinitas e dos óxidos (DeLuca et al., 2009; Gatiboni et al., 2013).

Para Wang et al. (2012), o efeito da aplicação do biocarvão no solo sobre o P pode ser indireto, pois ele tem a capacidade de adsorver diretamente os cátions (Al^{3+} , Fe^{3+} e Ca^{2+}) que interagem com o P, resultando na diminuição da adsorção e envelhecimento de complexos, fixando-o. Cui et al. (2011) também observaram que a presença do biocarvão diminuiu a adsorção do P nos óxidos de Fe e Al, aumentando seu poder residual. Já Morales et. al. (2013) descobriram que a produção do biocarvão pode influenciar nas taxas de adsorção e dessorção de P, visto que a pirólise rápida diminuiu a adsorção, enquanto a pirólise lenta teve o efeito oposto. O P contido da matéria-prima no biocarvão pode contribuir para o efeito residual, mesmo que pouco, pois os processos de oxidação são lentos devido a sua recalcitrância (Nguyen e Lehmann, 2009).

Outro fator que pode influenciar no efeito residual é o tipo de grupos ácidos presentes na superfície do biocarvão. No geral, os grupos carboxílicos são mais efetivos na redução da fixação de P que os grupos fenólicos. Dentro dos grupos carboxílicos, o ácido cítrico (tricarboxílico) é mais eficiente que o ácido oxálico (dicarboxílico) em reduzir essa fixação, preservando o efeito da adubação fosfatado ao longo do tempo (Andrade et al., 2003; Mukherjee et al., 2011).

4. CONCLUSÃO

Contudo, o fósforo é uma elemento muito importante quando se quer estabelecer uma agricultura forte e duradoura e sua deficiência nos solos amazônicos traz consigo o aumento de custos ligados a correções do solos e adubações constantes. A utilização do biocarvão, que objetiva diminuir as perdas de fósforo por fixação e indisponibilidade para as plantas e aumentar o efeito residual das fertilizações, é um tema que trouxe interesse para pesquisadores ligados a ciência do solo na Amazônia.

Os indicativos de resultados são promissores, o que admite-se dizer que provavelmente a utilização do biocarvão aumente o efeito do fósforo no solos, diminuindo os custos de produção, a demanda por fertilizantes e a pressão sobre as reservas nacionais e mundiais de fosfato.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcarde JC, Guidolin JA, LOPES AS. *Os Adubos e a eficiência das adubações*. 2 nd ed. ANDA, São Paulo; 1991.
- Almeida JA, Torrent JB. Cor de solo, Formas de Fósforo e Adsorção de Fosfatos em Latossolos Desenvolvidos de Basalto do Extremo- Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. 2003; 27:985-1002.
- Andrade FV, Mendonça ES; Alvarez VH, Novais RF. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2003; 27:1003-1111.
- Beesley L, Jimenez EM, Gomez LEJ. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environmental Pollution*. 2010; 158:2282-2287.
- Chen T, Zhang YX, Wang HT, Lu WJ, Zhou YC, Ren, LL. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. *Bioresource technology*. 2014; 164: 47-54.
- Cheng CH, Lehmann J, Engelhard MH. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008; 72: 1598-1610.
- Coelho MR, Santos HG, Silva HF, Aglio MLD. O recurso natural solo. In: Manzatto CV, Junior EF, PERES JRR, editores. *Uso agrícola dos solos brasileiros*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2002. p. 1-11.
- Cordell D, Drangert JO, White S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*. 2009; 19:292-305.
- Cravo MS, Smyth TJ, Brasil EC. 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*. 2012; 36:895-907.
- Cui HJ, Wang MK, Fu ML. Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar. *Soils Sediments*. 2011; 11:1135-1174.
- Dechen AR, Nachtigall GR. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: Novais RF, Alvarez v, VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves, JCL, editores. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p. 91 – 132.
- DeLuca TH, MacKenzie M D, Gundale M J. Biochar effects on soil nutrient transformation. In: Lehmann J, Joseph S, editores. *Biochar for environmental management science and technology*. London: Earthscan; 2009. p. 251–280.
- Departamento Nacional de Produção Mineral. *Sumário da produção mineral do ano 2014* [internet]. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia; 2015 [Acesso em 20 jun 2016]. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2nd ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2006.
- Falcão NPS, Borges LF. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (*Carica papaya* L.). *Acta Amazônica*. 2006; 36:401-406.
- Falcão NPS, Carvalho EJM, Comerford N. *Avaliação da fertilidade de solos antropogênicos da Amazônia Central*. In: XI Congresso da Sociedade de Arqueologia Brasileira, Grupo de trabalho: Terras Pretas Arqueológicas na Amazônia: Estado da Arte, Rio de Janeiro; 2001.
- Falcão NPS, Comerford N, Lehmann J. Determining nutrient bioavailability of Amazonian Dark Earth soils, methodological challenges. In: Lehmann J, Kern DC, Glaser B, Woods WI,

- editores. *Amazonian Dark Earths; origin, properties, managements*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2003. p. 255-270.
- Falesi IC. *Estado atual de conhecimentos de solos da Amazônia brasileira*. In: I Simpósio do trópico úmido; Belém, Brasil. Belém: Embrapa Trópico Úmido; 1986. p. 1984.
- Falesi IC. *Estado atual de conhecimentos de solos da Amazônia brasileira*. I Zoneamento Agrícola da Amazônia. Belém: IPEAN; 1972. (Boletim técnico, 1).
- Faquin V. Nutrição de plantas. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2005.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The statistics division* [internet]. [Acesso em 18 jun 2016]. Disponível em: www.fao.org.
- Gatiboni LC, Brunetto G, Rheinheimer DS, Kaminski J. *Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações*. Tópicos em Ciência do Solo. 2013; 8:142-187.
- Giaveno C, Richardson A, Simpson R, Barberis E. Interaction of phytases with minerals and availability of substrate affect the hydrolysis of inositol phosphates. *Soil Biology and fertility of soils*. 2010; 49:491-498.
- Glaser B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2007; 362:187-196.
- Glaser BG, Guggenberger G, Zech W, Ruyter ML. Soil Organic Matter Stability in Amazonian Dark Earths. In: Lehmann J, Kern DC, Glaser B, Woods WI, editores. *Amazonian Dark Earths: origin, properties, management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2003. p. 141-158.
- Grant CA, Platen DN, Tomaziewicz DJ, Sheppard SC. *A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta*. Informações Agronômicas. Piracicaba: Potafos; 2001. (Encarte técnico, 95).
- Guppy CN, Menzies NW, Mood PW, Blamey FPC. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. *Soil Research*. 2005; 43:189-202.
- Joseph SD, Camps AM, Lin Y, Munroe P, Chia CH, Hook J, Van zwielen L, Kimber S, Cowie A, Singh BP, Lehmann J, Foidl N, Smernik RJ, Amonette JE. An investigation into the reactions of biochar in soil. *Australian Journal of Soil Research*. 2010; 48:501-515.
- Karhu K, Mattila, T, Bergström I, Regina K. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – Results from a shortterm pilot field study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2011; 140:309-313.
- Keiluweit M, Nico PS, Johnson MG, Kleber M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environmental Science & Technology*. 2010; 44: 1247-1253.
- Kern DC, Rodrigues TE, Sombroek W. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: Lehmann J, Kern DC, Glaser BG. *Amazonian Dark Earths: origin, properties, Management*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers; 2003. p. 51-75.
- Kitagawa Y, Möller MRF. Clay mineralogy of some typical soils in the Brazilian Amazon region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 1979; 14:201-208.
- Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H, Bogomolova I, Xu X. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. *Soil Biology & Biochemistry*. 2009; 41:210-219.
- Lana RMQ, Zañão LA, Luz JMQ, Silva JC. Produção da alface em função do uso de diferentes fontes de fósforo em solo de cerrado. *Horticultura Brasileira*. 2004; 22:525-528.
- Lehman J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. Biochar effects on soil biota – a review. *Soil Biology and Biochemistry*. 2011; 43: 912–1836.
- Lehmann J, Joseph S. *Biochar for Environmental Management: An Introduction*. In: *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*, 2nd ed. Earthscan; 2015.
- Lehmann J, Joseph S. *Biochar for Environmental Management: An Introduction*. In: *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*. Earthscan; 2009.
- Lehmann J. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2007; 5: 381-387.
- Liang B, Lehmann J, Sohi SP, Thies JE, O’Niell B, Trujillo L, Gaunt J, Solomon D, Grossman J, Neves EG, Luizão FJ. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry*. 2010; 41: 206-213.

- Lima SS, Leite LFC, Oliveira FC, Costa DB. Atributos químicos e estoques de carbono e nitrogênio em Argissolo Vermelho-amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no norte do Piauí. *Revista Árvore*. 2011; 35:51-60.
- Malavolta E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres; 2006.
- Marques JD, Teixeira WGT, Reis AM, Cruz-Júnior O, Martins GC. Estudo de parâmetros físicos, químicos e hídricos de um latossolo amarelo na região Amazônica. *Acta Amazônica*. 2004; 34: 145-154.
- Meurer EJ. *Fundamentos de química do solo*. 4th ed. Porto Alegre: Evangraf; 2010.
- Morales MM, Comerford N, Guerrini IA, Falcão NPS, Reeves JB. Sorption and desorption of phosphate on biochar and biochar–soil mixtures. *Soil Use and Management*. 2013; 29:306-316.
- Mukherjee A, Zimmerman AR., Harris W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*. 2011; 163: 247-255.
- Nachenius RW, Venderbosch R, Ronsee F, Prins W. Biomass Pyrolysis. In: Murzin DY, editor. *Advances in chemical engineering*. Publisher: Academic Press; 2013. p. 75–139.
- Nguyen BT, Lehmann J. Black carbon decomposition under varying water regimes. *Organic Geochemistry*. 2009; 40:846-853.
- Novais RF, Smyth TJ, Nunes FN. Fósforo. In: Novais RF, Alvarez VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti, RB, Neves JCL, editores. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p. 471-550.
- Novais RF, Smyth TJ. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 1999.
- Novotny EH, Madari BE, Maia CMB, Mangrich AS. *O Potencial do Biocarvão (Carvão Pirogênico) no Sequestro de Carbono; na Ciclagem de Nutrientes; no Crescimento das Plantas e no Estímulo de Processos Microbiológicos*. In: Fertbio 2012. Alagoas, Brasil. Alagoas: Sociedade Brasileira de Ciência do solo; 2012. p. 31-38.
- Oliveira FA, Haag HP, Carmello QA. *Sintomatologia de deficiência de macronutrientes em Castanha-do-brasil*. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Vitória, Brasil. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo; 1994. p. 46-54.
- Parfitt RL. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *Journal of Soil Science*. 1989; 40: 359-369.
- Peake LR., Reid BJ, Tang X. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. *Geoderma*. 2014; 235:182-190.
- Pierzynski GM, McDowell RW, Sims JT. Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils. In: Sims JT, Sharpley, editores. *Phosphorus: agriculture and the environment*. Madison: American Society of Agronomy; 2005. p. 53-86.
- Raij BV. *Fertilidade do solo e adubação*. Piracicaba: Ceres; 1991.
- Raij BV. *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute; 2011.
- Rezende EIP, Angelo LC, Santos SS, Mangrich AS. *Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono*. *Revista Virtual Química*. 2011; 3:426-433.
- Rheinheimer DS, Anghinoni I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2003; 34:2339-2354.
- Rodrigues TE. Solos da Amazônia. In: Alvarez VH, Fontes LEF, Fontes MPF. *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 1996. p. 19-60.
- Sample EC, Soper RJ, Racz GJ. Reactions of phosphate in soils. In: Khasawneh FE, Sample, EC, Kamprath EJ, editores. *The role of phosphorus in agriculture*. Madison: American Society of Agronomy; 1980. p. 263-310.
- Sanchez PA, Bandy D, Villarica J, Nicholaides J. Amazon basin soils: management for continuous crop production. *Science*. 1982; 216: 821-827.
- Shinzato E, Martins GC, Martins, JS, Coelho MR, Teixeira WG. *Os solos do distrito agropecuário da Suframa – DAS*. Manaus; 2005.
- Silva FC, Raij BV. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 1999; 34:267-288.

- Singh PB, Hatton JB, Singh B, Cowie L. Annette; Kathuria, Amrit. Influence of biochar on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils, *American Society of Agronomy*. 2010; 1224-1234.
- Smith NJH. Anthrosols and human carrying capacity in Amazonian. *Annals of the Association of American Geographers*. 1980; 70:553-556.
- Sohi SP, Krull E, Lopez CR, Bol A. *Review of biochar and its use and function in soil*. In: Sparks DL, editor. *Advances in Agronomy*. Burlington: Academic Press; 2010. p. 47-82.
- Sombroek WG, Ruivo MDL, Fearnside PM, Glaser B, Lehmann J. Amazonian Dark Earths as carbon stores and sinks. In: Lehmann J, Kern DC, Glaser B, Woods W, editores. *Amazonian Dark Earths – Origin, Properties, and Management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher; 2003. p. 125-139.
- Sombroek WG. *Amazon Soils - A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region*. Center for Agriculture Publications and Documentation Wageningen. PUDOC; 1966.
- Sousa DMG, Lobato E. *Adubação fosfatada em solos da região do cerrado*. Informações Agrônomicas. Piracicaba: Potafos; 2003. (Encarte técnico, 102).
- Stewart CE, Zheng J, Botte J, Contrufo MF. Co-generated fast pyrolysis biochar mitigates green-house gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils. *Global Change Biology Bioenergy*. 2013; 5:153-164.
- Stutter MI, Shand CA, George TS, Blackwell MAS, Dixon L, Bol R, Mackay RL, Richardson AE, Condon LM, Haygarth PM. Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. *Geoderma*. 2015; 257:29-39.
- Taccini MM. *Study of the methodologies of the United Nations Framework Council on Climate* [dissertação]. Piracicaba: Universidade de São Paulo; 2010.
- Taiz L, Zeiger E. *Plant Physiology*. 5nd ed. Sunderland: Sinauer Associates; 2010.
- Vale Junior JF, Schaefer CER., Costa JAV. Etnopedologia e transferência de conhecimento: diálogos entre os saberes indígena e técnico na terra indígena malacacheta, Roraima. *Revista brasileira de ciência do solo*. 2011; 31:403-412.
- Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Chan YK, Downie A, Joseph S, Cowie A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil*. 2010; 327:235-246.
- Wang T, Arbestain MC, Hedley M, Bishop P. Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. *Plant soil*. 2012; 357:173-187.