



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ANTONIA KILMA DE MELO LIMA

**ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS E ESTOQUE DE CARBONO EM UM LATOSSOLO
AMARELO COM ADIÇÃO DE BIOCARVÃO EM MANAUS-AMAZONAS.**

BELÉM

2017



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ANTONIA KILMA DE MELO LIMA

**ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS E ESTOQUE DE CARBONO EM UM LATOSSOLO
AMARELO COM ADIÇÃO DE BIOCARVÃO EM MANAUS-AMAZONAS**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agronomia com área de concentração em Agronomia, para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Dra. Herdjania Veras de Lima, Co-orientador: Dr. Newton Paulo de Souza Falcão.

BELÉM

2017

ANTONIA KILMA DE MELO LIMA

**ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS E ESTOQUE DE CARBONO EM UM LATOSSOLO
AMARELO COM ADIÇÃO DE BIOCARVÃO EM MANAUS-AMAZONAS.**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agronomia com área de concentração em Agronomia, para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Dra. Herdjania Veras de Lima
Co-orientador: Dr. Newton Paulo de Souza Falcão

Aprovada em 24 de fevereiro de 2017

BANCA EXAMINADORA

Herdjania Veras de Lima-Orientador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA

Eduardo Jorge Maklouf Carvalho– 1º Examinador
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA

Sueli Rodrigues – 2º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA-UFRA

Lorena Chagas Torres– 3º Examinador
ENGENHEIRA AGRÔNOMA

Milena Carvalho Moraes – 4º Examinador
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI - MPEG

BELÉM

2017

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente à Deus pois sem ELE nada seria possível em minha vida, e a minha Fiel intercessora, Nossa Senhora de Nazaré, que nos momentos mais difíceis desta caminhada foi meu refúgio, abrigo e a esperança de que chegaria até o final de mais essa etapa em minha vida.

À minha Mãe, minha maior incentivadora e com toda certeza a maior torcedora de minhas conquistas, muitíssimo obrigada por tudo, essa vitória também é sua. Aos meus irmãos pela torcida sempre.

Aos professores do departamento solos. A Secretária do programa de pós-graduação Samanta Gomes, por esta sempre disposta a nos ajudar e resolver nossas broncas.

À minha orientadora Prof. Dra Herdjania Lima, pela paciência e por todo ensinamento repassado durante esses anos no qual tive a oportunidade de trabalhar diretamente, e ainda pela oportunidade de trabalhar na área de Física do solo e pelas oportunidades concedidas.

À Sueli Rodrigues pelo acompanhamento no desenvolvimento de todo o trabalho pela paciência, amizade e grande ajuda principalmente nessa etapa final.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior – CAPES, pelo financiamento da bolsa de pesquisa e da tese através do Projeto Pró-integração UFRA/ESALQ (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz).

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), por meio do Dr. Newton Falcão por ceder a área de estudo, ao técnico de campo Sandoval pelo essencial auxílio na coleta das amostras.

Ao Prof. Álvaro Pires (*in memoriam*) da Universidade do Estado de São Paulo (USP/ESALQ) que possibilitou a realização das análises no laboratório de Física do Solo, assim como a parceria no projeto que financiou a tese. Agradeço à Prof Herdjania que possibilitou a mim conhecer e conviver por determinado período com um dos Pesquisadores de maior referência da Física do Solo, muito grata.

Aos amigos/irmãos da LIGA por todo apoio, orações e torcida sempre nos momentos difíceis.

Aos amigos da Física do Solo: Daniel Oliveira, amigo de longa data! Michel Sato, Daynara Vieira, Artur Leal e Ana Fernanda pela amizade. Em especial à amiga Katiane Barros minha companheira e parceira de doutorado, obrigada por dividir as alegrias e momentos tensos dessa intensa vida de pós-graduandas.

Aos amigos e colegas de Piracicaba- SP, que tornaram melhores e mais alegres meus dias na ESALQ e na cidade.

E a galera que frequenta a sala de estudo da pós-graduação, não vou citar nomes para não ser injusta! Obrigada pelos momentos de descontração, conversas, palavras de incentivo e muitos cafezinhos compartilhados na copa rsrs.

Aos que não foram citados mas contribuíram, o meu agradecimento!

RESUMO GERAL

Os solos da região amazônica são altamente intemperizados devido às condições climáticas de elevadas temperaturas e precipitações que também aceleram o processo de decomposição da matéria orgânica no solo diminuindo sua permanência no solo. Assim, buscar alternativas eficientes e sustentáveis para melhorar as propriedades destes solos tanto química, física quanto biológica é crucial para os solos dessa região. O biocarvão, um subproduto oriundo de diversos materiais orgânicos que são transformados pelo processo de pirólise, tem sido amplamente utilizado com o intuito de melhorar os atributos do solo sob diversos aspectos, pois, trata-se de um material muito rico em carbono orgânico e altamente recalcitrante, que permite que o mesmo permaneça por longo tempo estocado no solo. O objetivo geral da tese foi avaliar as propriedades físico- hídricas e estruturais de um Latossolo amarelo na região amazônica com adição de biocarvão. Para atender o objetivo geral a tese foi subdividida em dois capítulos. No primeiro capítulo foi avaliado como a adição do biocarvão atuou sobre as propriedades físico-hídricas em um Latossolo Amarelo. No segundo capítulo objetivou-se quantificar a distribuição do tamanho dos agregados, avaliar a estabilidade destes e calcular o estoque de carbono (EC) em solo com adição de biocarvão. Foram avaliados uma área com aplicação de biocarvão após oito anos, na dosagem de 80 Mg ha⁻¹, e uma área de mata secundária que foi utilizada como referência. Os solos foram amostrados nas profundidades de 0–0,10; 0,10–0,20 e 0,20–0,30 m. Foram determinados: densidade do solo, porosidade, resistência do solo à penetração, curva de retenção de água no solo, distribuição do tamanho dos agregados, porcentagem de macro e microagregados, diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG), conteúdo de carbono/matéria orgânica e estoque de carbono do solo. No primeiro capítulo após um período de oito anos da adição do biocarvão não foram constatados efeitos significativos sobre as propriedades físicas do solo em relação a área de referência, sob floresta secundária, que apresentou melhores condições para os atributos físicos avaliados. Neste capítulo concluiu-se, que nas duas áreas prevaleceu a classe de agregados de maior tamanho (4 mm). No solo com biocarvão 90% dos agregados abrangeram a classe dos macroagregados enquanto os microagregados apresentaram as menores percentagens. A área de floresta secundária apresentou uma melhor distribuição das diferentes classes de tamanho dos agregados. A aplicação de biocarvão foi eficiente em aumentar a DMP e DMG do solo, os valores de CO e EC do solo com biocarvão foram semelhantes ao do solo sob floresta secundária em superfície.

Palavras-chave: Biochar. Retenção Água. Propriedades Estruturais. Agregados solo. Matéria Orgânica.

ABSTRACT

The soils of the Amazon region are highly weathered due to the climatic conditions of high temperatures and precipitation that also accelerate the process of organic matter decomposition in the soil, decreasing its lifetime in the soil. Thus, searching for efficient and sustainable alternatives to improve the chemical, physical and biological properties of these soils is crucial for the region. Biochar, a byproduct from diversified organic materials that are produced by the pyrolysis process, has been widely used to improve soil attributes in several aspects, since it is a material very rich in organic carbon and highly recalcitrant, which allows it to remain for a long time stored in the soil. The general objective of the thesis was to evaluate the physico-hydraulic and structural properties of a oxisol in the Amazon region with addition of biochar. To attain the general objective the thesis was subdivided into two chapters. In the first chapter, we evaluated how the addition of biochar affected in the physical-hydraulic properties in a oxisol. In the second chapter the objective was to quantify the size distribution of the aggregates, to evaluate their stability and to calculate the carbon stock (CS) in a soil with addition of biochar. An area with application of biochar, at a rate of 80 Mg ha^{-1} , was evaluated after eight years, and a secondary forest area that was used as reference. The soils were sampled at depths of 0-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m. Were evaluated: soil bulk density, porosity, soil penetration resistance, soil water retention curve, size distribution of aggregates, percentage of macro and microaggregates, weighted mean diameter (WMD) and geometric mean diameter (GMD), carbon/organic matter content and soil carbon stock. In the first chapter, after a period of eight years of the addition of the biochar, no significant effects were observed on the physical properties of the soil in relation to the reference area, under secondary forest, the latter presented better conditions for the physical attributes evaluated. In the second chapter, it was concluded that in the two areas the class of aggregates of larger size (4 mm) prevailed. In the soil with biochar, 90% of the aggregates covered the class of macroaggregates while the microaggregates had the lowest percentages. The secondary forest area presented a better distribution of the different aggregates size classes. The application of biochar was efficient in increasing WMD and GMD of the soil. At surface the OC and CS values of the soil with biochar was similar to that of the soil under secondary forest.

Key words: Biochar. Water retention. Structural Properties. Soil Aggregates.

Sumário

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. CONTEXTUALIZAÇÃO	9
REFERÊNCIAS	10
2. PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DE UM LATOSSOLO AMARELO COM ADIÇÃO DE BIOCÁRVÃO NO MUNICÍPIO DE MANAUS/AM	11
RESUMO	11
ABSTRACT	11
2.1 Introdução	11
2.2 Materiais e Métodos	12
2.3 Resultados e Discussão	14
2.4 Conclusão	20
REFERÊNCIAS	21
3. EFEITO DO BIOCÁRVÃO SOBRE A AGREGAÇÃO E ESTOQUE DE CARBONO EM UM LATOSSOLO AMARELO	23
RESUMO	24
ABSTRACT	25
3.1 Introdução	24
3.2 Materiais e Métodos	25
3.3 Resultados e Discussão	28
3.4 Conclusão	35
REFERÊNCIAS	36

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O uso intensivo dos solos da região amazônica, principalmente pela agricultura itinerante, que desde o início de sua exploração utiliza áreas antes agricultáveis e com boas condições do solo para o desenvolvimento da agricultura, estão levando os solos amazônicos ao intenso processo de degradação, pois o manejo inadequado e uso irracional dos seus recursos naturais intensificam o desgaste e depleção de algumas características básicas do solo. A região por si só, devido as condições climáticas da região já apresentam condições pouco favoráveis a manutenção das características físicas e químicas dos solos, pois o processo de intemperização destes é muito grande, principalmente devido à alta precipitação e temperatura da região, que em conjunto com o uso inadequado dos recursos naturais aceleram a degradação do solo.

Hoje busca-se conscientizar quem vive na região sobre a forma correta de utilizar esse recurso natural e as possíveis formas de recuperação dessas áreas, porém como são regiões extensas a busca pelo restabelecimento das propriedades do solo que foram degradadas ao longo do tempo tornam-se onerosa e quase inviável pelas práticas convencionais. A fim de melhorar as condições dessas áreas uma alternativa é a aplicação do biocarvão, como um condicionante do solo na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos de terra firme da Amazônia, buscando a restauração de áreas degradadas com aumento do estoque de carbono e aumentando a sustentabilidade agrícola via construção de um solo mais fértil e produtivo.

O biocarvão é um material muito rico em carbono que é produzido pela assim chamada decomposição térmica de material orgânico, sob limitado fornecimento de oxigênio e em temperatura relativamente baixa (<700°C) (LEHMANN e JOSEPH, 2009). Esse material termicamente alterado se degrada muito mais lentamente, criando um grande estoque de carbono no solo a longo prazo, ele é cerca de 1500 a 2000 vezes mais estável do que a matéria orgânica não pirolisada. As estruturas orgânicas interna semelhante à do grafite contribui para que o biocarvão tenha sua recalcitrância mantida por um maior período de tempo, caracterizando um sistema de sequestro de carbono mais eficiente (REZENDE et al.,2011), podendo assim também ser uma alternativa para mitigação dos efeitos do desmatamento na mudança do clima, pois ajuda a estocar o CO₂ no solo.

A utilização do biocarvão como condicionante do solo acontece em diversas partes do mundo, Países como China e Japão já comercializam e utilizam de forma mais intensa esse subproduto do processo de pirólise, e é muito difundido seus benefícios de melhoria sobre alguns parâmetros dos solos, o mesmo quando utilizado buscando promover melhoria do solo atua tanto no aspecto químico, físico e biológico. As propriedades adsorventes do biocarvão

potencialmente alteram algumas características físicas do solo tais como: a distribuição do tamanho dos poros, densidade, capacidade de retenção de água e resistência solo à penetração (MUKHERJEE e LAL, 2013), outros autores relatam seu benefício também sobre a estrutura, textura, tamanho partículas, permite maior profundidade de penetração das raízes e melhora consistência do solo (van ZWIETEN et al., 2010), ainda em alguns solos reduz significativamente os valores de densidade do solo (ABEL et. al., 2013; JONES et al., 2010; PEREIRA et al., 2012), também age de forma benéfica sobre a estabilidade dos agregados do solo no qual foram adicionados (HERATH et al., 2013; SUN e LU 2014).

Deste modo, a adição de biocarvão no solo como prática de incorporação de um resíduo advindo de material orgânico, pode ser uma alternativa de recuperação para os solos que se encontram degradados na Amazônia. Nesse sentido, como forma de buscar a melhoria dos solos amazônicos, a adição de biocarvão em solos de terra firme poderá auxiliar no restabelecimento destas, aumentar o estoque de carbono e promover a sustentabilidade agrícola pela construção de um solo mais fértil e produtivo. Portanto, o objetivo geral da tese é avaliar as propriedades físicas, hídricas e estruturais de um Latossolo amarelo na região amazônica com adição de biocarvão.

Para atender o objetivo geral a tese foi subdividida em dois capítulos. No primeiro capítulo busca-se avaliar como a adição do biocarvão atua sobre as propriedades físicas e hídricas em um Latossolo amarelo. No segundo capítulo objetivou-se quantificar a estabilidade dos agregados e o estoque de carbono em solo com adição de biocarvão.

REFERÊNCIAS

ABEL, S. *et. al* Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma**, p.183-191, 2013.

HERATH, H.M.S.K.; CAMPS-ARBSTAIN, M.; HEDLEY, M. Effect of biochar o soil physical properties in two contrasting soil: An Alfisol and Andisol. **Geoderma**, p.188-197.2013.

JONES, B. E.H; HAYNES, R.J; PHILLIPS, I.R. Effect of amendment of bauxite processing sand with organic materials on its chemical, physical and microbial properties. **Journal of Environmental Management**, Londres, p.2281-2288, 2010.

LEHMANN, J.; JOSEPH S., Biochar for Environmental Management: An introduction. Chapter 1. In: Lehmann J. and Joseph S. **Biochar for environmental management science and technology**, London, pp 1–9, 2009.

MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A. R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. **Geoderma**, Amsterdam, v.193-194, p. 122–130, 2013.

PEREIRA, R.G. Transpiration response of upland rice to water deficit changed by different levels of eucalyptus biochar, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.5, p.716-721, 2012.

REZENDE, E. I. P.; ANGELO, L. C.; dos SANTOS, S. S.; MANGRICH, A. S. Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono, **Revista Virtual Química**, Rio de Janeiro, v.3, p. 426-433, 2011.

VAN ZWITEN, L. et. al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 327, p.235–246, 2010.

2. PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DE UM LATOSSOLO AMARELO COM ADIÇÃO DE BIOCÁRVÃO NO MUNICÍPIO DE MANAUS – AM¹

RESUMO – O biocarvão vem sendo amplamente utilizado como um condicionante do solo, por melhorar atributos químicos e biológicos dos solos, podendo melhorar propriedades físicas e hidráulicas. Porém, evidências para tal efeito para regiões de clima quente e úmido ainda são exíguas. Objetivou-se caracterizar propriedades físico-hídricas de um Latossolo Amarelo na região amazônica, ao qual foi adicionado biocarvão, município de Manaus-AM. Biocarvão obtido a partir de resíduos de carvoarias foi adicionado ao solo a uma dosagem de 80 t ha⁻¹. Uma área de mata secundária foi utilizada como referência. Após oito anos da aplicação, os solos foram analisados em três profundidades (0–0,10; 0,10–0,20 e 0,20–0,30 m) pela densidade do solo, porosidade, resistência à penetração e capacidade de retenção de água. Conclui-se que, após um período de oito anos, a adição de biocarvão no solo foi constatada não ter efeitos significativos sobre as propriedades físicas do solo. A área de referência, sob floresta secundária, apresentou melhores condições físicas para todos os atributos físicos avaliados

Palavras-chave: Estrutura do solo. Densidade do solo. Porosidade do solo. Retenção de água no solo. Resistência do solo à penetração.

ABSTRACT – Biochar has been widely proposed as a soil conditioner that can changes physical and hydraulic properties of the soil. However, evidence of these effects for several regions is still limited. Thus, the aim of this study was to characterize some physical-hydraulic

¹ Este capítulo segue as normas de apresentação da revista ao qual foi submetido, Revista Caatinga.

properties of a oxisols to which biochar was added, in the Amazon region, municipality of Manaus-AM. Biochar obtained from charcoal kilns was added to the soil at a rate of 80 t ha⁻¹; an area under secondary forest was evaluated as reference. Eight years of biochar application, the soils were analyzed at three depths (0-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m) for soil bulk density, porosity, penetration resistance and ability of water retention. It was concluded that, after a period of eight years of the biochar addition, no significant effects was observed at soil physical properties. The reference area, under secondary forest, presented better physical conditions for all soil physical attributes evaluated.

Key words: Soil structure. Soil bulk density. Soil porosity. Soil water retention. Soil penetration resistance.

2.1 INTRODUÇÃO

Os solos amazônicos em uso estão, na sua maioria fisicamente degradados, e esta forma de degradação é de difícil recuperação e possui um custo oneroso e demorado. Uma alternativa para melhorar as propriedades físicas dos solos degradados da Amazônia seria utilização de um condicionante, que ao ser incorporado ao solo promova ao longo do tempo benefícios para o a este, melhorando o crescimento radicular e proporcionando um ambiente mais favorável no solo. A utilização de biocarvão, material resultante da combustão incompleta de biomassa (origem vegetal ou animal), produzido sobre altas temperaturas e muito rico em carbono, quando incorporado ao solo promove melhoria das propriedades físicas do solo, aumentando crescimento das plantas por possibilitar maior profundidade do sistema radicular, disponibilidade de ar e água (DOWNIE et al., 2009).

O uso do biocarvão já é uma realidade em alguns Países do mundo, sendo amplamente comercializado no mercado por empresas especializadas. No Brasil ainda não há exploração comercial do biocarvão, pois o uso não está difundido, pesquisas precisam avançar mais. O biocarvão tem sido considerado um bom condicionante do solo, devido ao elevado teor de carbono (C) recalcitrante, o que torna um reservatório estável de C no solo (MADARI et al., 2009).

A utilização do biocarvão no solo promove o aumento da capacidade de retenção de água e do conteúdo de água disponível no solo (ABEL et al., 2013; MUKHERJEE et al., 2013; JONES et al., 2010), atua ainda sobre tamanho de poros e partículas do solo, maior profundidade de penetração das raízes e consistência do solo (VAN ZWIETEN et al., 2010). O efeito positivo do biocarvão como condicionador do se manifesta em pouco tempo, após um

período de incubação de 500 dias no solo, o biocarvão promove à diminuição da densidade (Ds), é o que demonstrou os estudos de Abel et al. (2013) e Jones et al. (2010).

Um dos grandes problemas dos solos de regiões tropicais como a Amazônia é o baixo teor de C orgânico e mesmo sistemas agrícolas que levem a produção de quantidade de biomassa, o aumento no teor de C é dificultado, devido ao clima que favorece a mineralização. Nesse sentido, utilizar o biocarvão, que apresenta elevado teor de C orgânico recalcitrante, ou seja, de difícil decomposição, pode se constituir em alternativa importante para a sustentabilidade agrícola na região, proporcionando um solo mais fértil e com propriedades físicas favoráveis a crescimento das plantas.

Diante disso, a hipótese testada é que a adição do biocarvão em um solo da região amazônica pode promover a melhoria as propriedades físicas e hídricas do solo. Nesse sentido, objetivou-se caracterizar as propriedades físicas e hídrica de um Latossolo Amarelo após oito anos da adição do biocarvão e compará-las com uma área de vegetação remanescente.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na estação experimental do INPA (Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia), no município de Manaus, Estado do Amazonas, região norte do Brasil (02° 35' 55,5''S e 60° 02' 14,8'' W). O clima da região é do tipo Af de acordo com a classificação de Köppen, com temperatura média de 26 °C (máxima 39 °C e mínima de 19 °C, com precipitação média anual de cerca de 2.000 mm, sendo a estação chuvosa de dezembro a maio e a seca de junho a novembro. O solo da área é um Latossolo Amarelo (SANTOS et al., 2013) essencialmente argilo arenoso na camada de 0–0,10 m (458, 105 e 436 g kg⁻¹ de areia, silte e argila) e argiloso nas camadas de 0,10–0,20 m (347; 118 e 535 g kg⁻¹ de areia, silte e argila) e 0,20–0,30 m (314; 182 e 504 g kg⁻¹ de areia, silte e argila).

O experimento constou de uma área experimental de três parcelas de 5 x 5 m (25 m²), cultivada com milho (*Zea mays*) e caupi (*Vigna unguiculata*) e outra semelhante com vegetação remanescente em área adjacente. O experimento foi implantado em março de 2006 e consistiu da adição de 80 Mg ha⁻¹ de biocarvão, segundo Chan et al. (2007) doses entre 50 e 100 Mg ha⁻¹ são as que promovem alterações mais significativas ao solo. O biocarvão foi proveniente das carvoarias da região e composto por diferentes espécies florestais. A cobertura vegetal da área experimental era floresta secundária de aproximadamente 30 anos, sendo que na área de cultivo a vegetação foi cortada e os resíduos da parte aérea removidos. O biocarvão foi incorporado ao solo manualmente com auxílio de enxadas a uma profundidade de aproximadamente 0,20 m.

Três meses após a adição do biocarvão, as parcelas foram cultivadas seguindo a sucessão feijão caupi/milho com revolvimento superficial com uso de enxada manual e plantios de milho e caupi realizados manualmente. Assim, ao longo do trabalho as áreas avaliadas serão designadas de área com adição de biocarvão (BIO) e a área de referência, aqui denominada de controle (CONT).

As amostras de solo foram coletadas no mês de outubro de 2014, usando anéis volumétricos de 0,05 m de diâmetro e altura. Foram coletadas 54 amostras indeformadas em cada parcela nas profundidades de 0–0,10; 0,10–20 e 0,20–0,30 m, sendo 18 amostras por profundidade. Amostras deformadas também foram coletadas nas mesmas profundidades para determinação da distribuição do tamanho das partículas pelo método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986).

Para a determinação da curva de retenção de água do solo (CRAS) as amostras indeformadas foram primeiramente saturadas, pela elevação gradual de lâminas de água, por um período de 24 h, pesadas (peso saturado), separadas em grupos de três amostras e submetidas à drenagem nos potenciais mátricos (ψ): -0,003; -0,006; -0,03; -0,1; -0,3 e -1,5 MPa em painéis de pressão com placas porosas (KLUTE, 1986). Após a drenagem em cada ψ as amostras foram pesadas para determinar o conteúdo de água e, em seguida foi mensurada a resistência do solo à penetração (RP), utilizando um penetrômetro de bancada (Texture Analyzer, Brookfield CT3), com diâmetro da base do cone de 3,85 mm e velocidade de inserção de 2 mm s⁻¹. Foram realizadas duas medições em cada amostra. Por fim, as amostras foram secas em estufa à 105 °C por 24 h para obtenção do peso seco e determinação da umidade gravimétrica (θ_g) e densidade do solo (BLAKE; HARTGE, 1986).

Os dados de resistência a penetração (RP) em função da umidade do solo (θ_g) foram ajustados pelo modelo não linear proposto por Busscher et al. (1997):

$$RP = a \theta_g^b \quad (1)$$

onde RP é dado em MPa, θ_g em kg kg⁻¹ e os coeficientes a e b são os parâmetros do modelo.

As CRAS foram ajustadas pela equação de van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[(1 + \alpha \psi)^n]^m} \quad (2)$$

onde θ é a umidade do solo; θ_r a umidade residual e θ_s a umidade na saturação, todas em kg kg⁻¹; ψ o potencial mátrico (MPa) e α , m , n são os parâmetros empíricos do modelo

A capacidade de água disponível (CAD) foi calculada pela diferença do conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{cc}), no potencial de -0,03 MPa e no ponto de murcha permanente

(θ_{PMP}) à -1,5 MPa. O conteúdo de água prontamente disponível (CAPD) foi calculado pela diferença do conteúdo de água em -0,03 e -0,1 MPa (HERATH et al., 013).

O carbono orgânico (CO) do solo foi determinado pelo método de Walkley-Black, que realiza a oxidação da matéria orgânica via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico, e a partir dos teores de CO calculou-se a MO, multiplicando o conteúdo de CO pela constante de 1,724 (EMBRAPA, 2011).

A porosidade total do solo (PT) foi determinada a partir dos dados de densidade das partículas (D_p) do solo, obtida em picnômetro de gás hélio (Modelo AccuPyc 1340, Micromeritics Instrument) e D_s , calculada pela equação $PT (m^3 m^{-3}) = 1 - D_s/D_p$. A microporosidade correspondeu ao conteúdo de água no solo no potencial de 0,006 MPa e a macroporosidade pela diferença entre a PT e a microporosidade.

Os dados foram avaliados pela análise de variância (ANOVA) e, sempre que a ANOVA revelou efeito significativo entre as áreas, os dados foram comparados pelo teste Tukey a 5%. As médias foram comparadas considerando a mesma profundidade entre as duas áreas, não houve comparação entre as profundidades. Todas as análises foram efetuadas usando o programa estatístico R (R Core Team, 2013), para o ajuste da CRAS foi utilizado o pacote "soilphysics".

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conteúdo de MO do solo foi menor em profundidade nas duas áreas (Tabela 1). Esta tendência é comum e observada na maioria dos trabalhos que avaliam o conteúdo de MO no solo e, se deve a menor quantidade de resíduos orgânicos e atividade biológica nas camadas abaixo de 0,10–0,15 m. Após oito anos da aplicação do biocarvão (2006-2014) no solo o conteúdo de MO atingiu nível equivalente ao da área de vegetação remanescente na camada superficial, enquanto que nas camadas subsuperficiais ainda foi menor (Tabela 1). O maior teor de MO nas camadas subsuperficiais da área com vegetação de floresta secundária, se deve ao maior aporte de resíduos de diferentes espécies, que possuem sistemas radiculares também distintos.

Com relação a densidade do solo (D_s) não houve diferença entre BIO e CONT para nenhuma profundidade, mas para ambas a D_s é menor na camada de 0–0,10 m, o que se deve ao maior conteúdo de MO nesta camada nas duas áreas.

Tabela 1. Matéria orgânica solo (MO), densidade do solo (Ds) e das partículas (Dp) de solo com (BIO) e sem (CONT) adição de biocarvão em três profundidades.

Prof. m	Trat.	MO g kg ⁻¹	Ds		Dp Mg m ⁻³
0-0,10	BIO	40,0a	1,17a		2,47a
	CONT	42,1a	1,16a		2,64b
0,10-0,20	BIO	28,7a	1,36a		2,61a
	CONT	33,3b	1,37a		2,66b
0,20-0,30	BIO	16,5a	1,41a		2,62a
	CONT	27,8b	1,42a		2,69b

Médias seguidas de letras distintas entre as parcelas experimentais diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Esse maior acúmulo de MO em superfície resultou em uma redução da Ds embora haja predominância da fração areia na camada de 0–0,10 m, o que se deve a uma maior agregação entre as partículas minerais e orgânicas, resultando em uma maior porosidade total e, por conseguinte, em menor Ds. Mukherjee et al. (2013) relata que as alterações na camada superior do solo com adição biocarvão pode diminuir Ds, no entanto, há poucos estudos disponíveis para entender se este efeito é significativo em profundidade, os autores também destacaram que a Ds pode não mudar e a porcentagem de agregação do solo pode diminuir com a adição de biocarvão, até mesmo porque a Ds depende do tipo de solo, conteúdo de MO, manejo e das doses de bicarvão adicionados ao solo (CURAQUEO et al., 2014).

Apesar do biocarvão não ter promovido aumento da MO e Ds entre as áreas, o tratamento BIO apresentou menor densidade de partículas (Dp) em consequência da influência direta das partículas de biocarvão que apresentam baixíssima densidade em torno de 0,30 – 0,40 Mg m⁻³ (PASTOR-VILLEGAS et al., 2006).

Com relação a proporção de poros maiores (macroporos) e menores (microporos) foi observada uma grande heterogeneidade entre BIO e CONT, particularmente para o volume de macroporos que foi consideravelmente maior nas três profundidades para o CONT (Tabela 2). Mais uma vez, a reduzida macroporosidade na área BIO provavelmente é em virtude do histórico de cultivos sucessivos com feijão e milho e as operações de manejo envolvidas. Os macroporos são responsáveis pela livre drenagem da água e aeração do solo (BRADY; WEILL, 2008) e, na camada de 0–0,10 m foram superiores a 10% nas duas áreas, portanto acima do

valor considerado crítico para o desenvolvimento de plantas (GRABLE; SIEMER, 1968). Desta forma, nesta camada, as áreas BIO e CONT não apresentam condições limitantes de aeração e difusão de oxigênio para o sistema radicular das plantas. No tratamento BIO a reduzida macroporosidade nas camadas abaixo de 0,10 m pode ser impeditiva à livre drenagem da água e a difusão do oxigênio pode ser prejudicada, levando à redução do crescimento das plantas (DREWRY et al., 1999); a área CONT também apresentou diminuição no volume de macroporos em profundidade, porém em proporção pequena e não atingiu o valor crítico de 10%.

Tabela 2. Volume de macro e microporos, porosidade total do solo (PT), capacidade de água disponível (CAD) e prontamente disponível (CAPD) de solo com (BIO) e sem (CONT) adição de biocarvão em três profundidades.

Prof. m	Trat.	Macro	Micro	PT	θ_{CC}	θ_{PMP}	CAD	CAPD
		m ³ m ⁻³						
0-0,10	BIO	0,17a	0,34a	0,51a	0,37a	0,24a	0,13a	0,05a
	CONT	0,24a	0,37a	0,61a	0,37a	0,23a	0,14a	0,08a
0,10-0,20	BIO	0,03a	0,37a	0,40a	0,36a	0,31a	0,05a	0,00a
	CONT	0,20b	0,33a	0,53b	0,38a	0,25a	0,13a	0,06a
0,20-0,30	BIO	0,04a	0,41a	0,45a	0,39a	0,31a	0,08a	0,00a
	CONT	0,16a	0,36a	0,52a	0,40a	0,25a	0,15a	0,05a

Macro e microporos: poros com diâmetro > 0,05 mm e < 0,05 mm, respectivamente. CAD: conteúdo de água disponível (0,03-1,5 MPa); CAPD: conteúdo de água prontamente disponível (0,03-0,1 Mpa). Médias seguidas de letras distintas entre as parcelas experimentais diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

O volume de microporos também não diferiu entre BIO e CONT, se mantendo praticamente constante no CONT enquanto que no BIO verificou-se um aumento na camada de 0,20–0,30 m. A porosidade total (PT) também foi maior na área CONT em cerca de 10% em cada profundidade em relação ao tratamento com biocarvão (BIO), apesar de haver diferença significativa somente na camada de 0,10–0,20 m. Esses resultados divergem daqueles observados por Curaqueo et al. (2014) que constataram acréscimo na porosidade em solo com adição de biocarvão. Nas duas áreas houve uma redução no volume total de poros em profundidade, condição que está relacionada com a redução da MO e atividade biológica e de

raízes, reduzindo a agregação e conseqüentemente o volume de poros nas camadas subsuperficiais, além do efeito do peso das camadas superiores sobre as inferiores.

A disponibilidade de água avaliada pelo conteúdo de água disponível (CAD) e pelo conteúdo de água prontamente disponível (CAPD) não foi diferente entre as duas áreas (Tabela 2). Também Ojeda et al. (2015) em seus resultados indicaram que a influência do biocarvão na retenção de água no solo foi irrelevante para vários tipos de biocarvão aplicados, assim como a água disponível para as plantas (entre CC e PMP) não foi influenciada. Outros autores como Jeffrey et al. (2015) avaliando o efeito da aplicação de biocarvão no solo a uma dosagem de 50 Mg ha⁻¹, também observaram que o biocarvão não atuou significativamente sobre a retenção de água no solo, assim como no conteúdo de água nos potenciais matriciais aplicados.

Semelhante à macroporosidade, a área com o tratamento BIO apresentou redução bastante pronunciada da CAD em profundidade enquanto a área CONT se manteve praticamente constante. O conteúdo de água retido no solo, tanto para a CAD quanto para a CAPD, é influenciado principalmente pela micro e mesoporosidade, sendo estes últimos mais atuantes na CAPD. Assim, conclui-se que o volume de mesoporos na área BIO é muito pequeno resultando em baixa capacidade de retenção de água no solo. Em discordância aos resultados aqui apresentados, muitos trabalhos com a aplicação de biocarvão no solo têm resultado em comprovados efeitos na CAD e na capacidade de retenção de água no solo na capacidade de campo (CHAN et al., 2007; GLASER et al., 2002; TRYON, 1948; HERAHT et al., 2013). As camadas de 0,10–0,20 e 0,20–0,30 m possuem textura mais argilosa e, alguns autores relataram que a adição de biocarvão em solos com alto teor de argila não promove aumento da retenção de água, devido à hidrofobicidade do carvão (ABEL et al., 2013; TRYON, 1948), no entanto, este efeito não foi avaliado neste estudo. A área CONT claramente apresentou uma maior capacidade de retenção de água do que a BIO apesar da diferença não ser significativa.

A curva de retenção de água no solo e os seus respectivos parâmetros de ajuste estão apresentados nas Figura 1 e Tabela 3, respectivamente. O provável predomínio de poros de tamanho muito reduzidos, principalmente na camada de 0,20–0,30 m no tratamento BIO é verificado pela alta retenção de água no solo até potenciais mais elevados em relação as camadas subjacentes (Figura 1), e pelo alto conteúdo de água residual (Tabela 3). A retenção de água no solo apresentou comportamento bastante diferenciado entre as três camadas na área BIO enquanto que na área CONT a camada superficial (0–0,10 m) reteve maior umidade do que as outras duas até o potencial de 0,1 MPa, apresentando formato similar a partir de então; as camadas de 0,10–0,20 e 0,20–0,30 m mantiveram praticamente o mesmo conteúdo de água no solo ao longo de toda a curva.

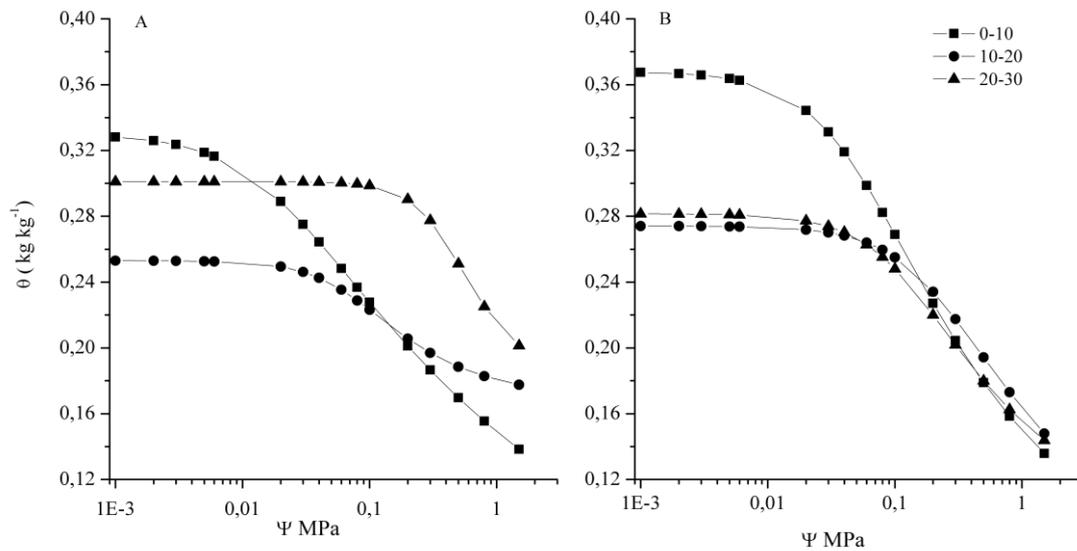


Figura 1. Curva de retenção de água no solo para as parcelas experimentais com adição de biocarvão e controle, em três profundidades ajustadas pela equação de van Genuchten (1980).

Tabela 3. Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água (CRA) das parcelas experimentais com adição de biocarvão e controle, em três profundidades.

Prof. m	Trat.	θ_{sat} θ_{res}		α	n	m	R^2
		kg kg ⁻¹					
0-0,10	BIO	0,330	0,015	0,060	1,209	0,172	93
	CONT	0,367	0,046	0,222	1,364	0,266	99
0,10-0,20	BIO	0,253	0,168	0,014	1,740	0,425	99
	CONT	0,274	0,062	0,004	1,444	0,307	86
0,20-0,30	BIO	0,301	0,181	0,002	2,366	0,577	77
	CONT	0,281	0,090	0,008	1,498	0,333	99

Os altos valores de umidade residual (θ_{res}) nas camadas abaixo de 0,10 m, principalmente no BIO, fundamenta a baixa CAD dessa área, visto que, apesar de reter mais água no solo à potenciais mais elevados, o conteúdo de água disponível para as plantas será menor, pois a água está fortemente retida em potenciais mais elevados.

A variação dos valores de resistência à penetração (RP) em função da umidade do solo foi bastante heterogênea entre as áreas (BIO e CONT) e entre as profundidades (Figura 2). No BIO a RP do solo ficou acima de 2 MPa, valor considerado na literatura como restritivo ao crescimento das raízes (TAYLOR et al.,1966), em toda a faixa de umidade avaliada. O aumento

da RP com a adição de biocarvão no solo também foi relatada por Busscher et. al. (2011) que, utilizando biocarvão de casca de arroz, mensuraram maior RP no solo após 44 dias da adição, no entanto, após 96 dias foi observada redução da RP, desta forma os autores destacaram que a compactação do solo pode não ser reduzida pela adição de biocarvão a curto prazo, mas pode ser alterada ao longo do tempo devido à mudanças nas propriedades do solo resultantes da degradação do biocarvão. Porém, até a época de avaliação deste estudo a RP do solo não foi reduzida pela adição de biocarvão.

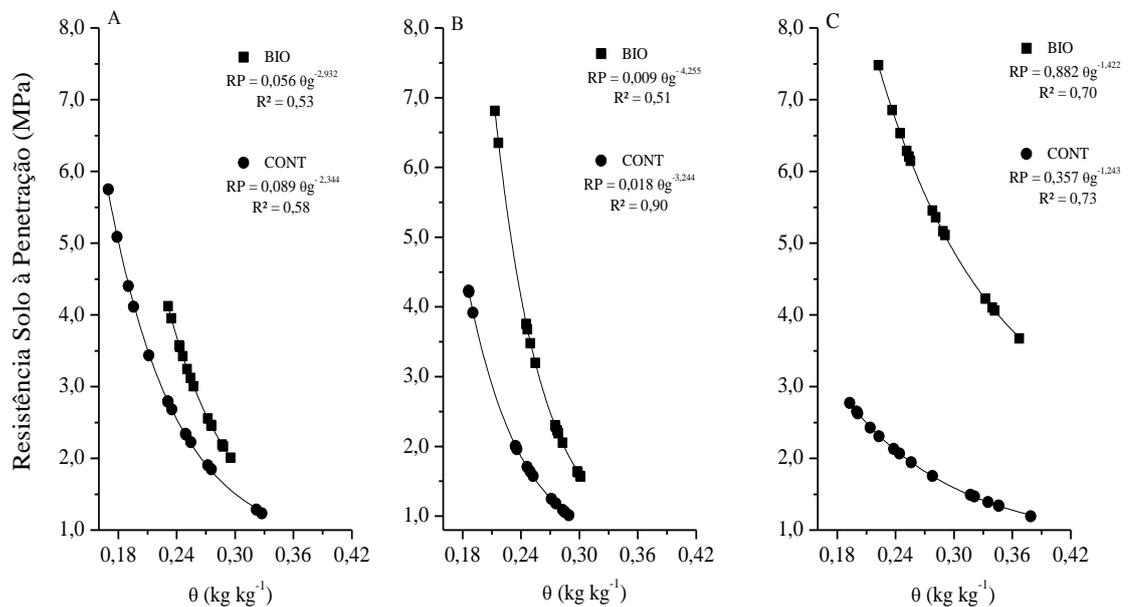


Figura 2. Resistência do solo a penetração em função da umidade para as parcelas experimentais com adição de biocarvão e controle, em três profundidades.

Além do arranjo mais adensado da área BIO em comparação ao CONT, verificado pela menor porosidade total (Tabela 2), os maiores valores de RP também são devido ao efeito direto de fragmentos maiores de biocarvão no interior das amostras indeformadas. A inserção da haste do penetrômetro sobre estes materiais resultou em médias mais elevadas de RP. Esse comportamento se comprova pelos maiores valores de RP na camada de 0–0,10 m no BIO para toda a amplitude de umidade. Para a área controle o valor limitante de 2 MPa foi atingido nas umidades de 0,25; 0,27 e 0,23 kg kg⁻¹ para as camadas de 0–0,10; 0,10–0,20 e 0,20–0,30 m, respectivamente, para Cotching e Belbin (2007) o manejo da água no solo é importante no controle da RP e, em solos com estrutura degradada, a taxa de aumento da RP com o secamento do solo é maior do que em solos bem estruturados.

Os resultados apresentados neste trabalho não estão em consonância com muitos outros que relatam os efeitos benéficos da adição do biocarvão sobre as propriedades físicas do solo. No entanto, muitos fatores podem influenciar na resposta deste condicionante quando aplicado ao solo, pois, mesmo produzido a partir de um mesmo material, o biocarvão apresenta alta heterogeneidade em suas características com pequenas mudanças nas variáveis de produção como taxa de aquecimento, temperatura máxima de pirólise e tempo de residência à temperatura máxima (CROMBIE et al., 2013) e, investigar todos os efeitos ambientais de cada biocarvão diferente é inviável.

No entanto, os solos da região Norte do Brasil, principalmente aqueles utilizados para fins agrícolas, pela complexidade de aquisição de insumos, carecem de alternativas sustentáveis para melhoria das propriedades físicas e químicas, e estudos como este devem ser encorajados e avançados. Neste estudo a área com aplicação de biocarvão (BIO) foi comparada com uma área sob mata secundária (CONT) com o objetivo de avaliar a eficiência do biocarvão na resiliência do solo para condições naturais. Porém, estudos posteriores devem ser realizados comparando o efeito da aplicação do biocarvão em solos em áreas manejadas igualmente.

2.4 CONCLUSÃO

Após um período de oito anos, a adição de biocarvão no solo a uma dosagem de 80 Mg ha⁻¹ foi constatada não ter efeitos significativos sobre as propriedades físicas do solo, tais como densidade do solo, porosidade, retenção de água e resistência do solo à penetração. A área de referência, sob floresta secundária, apresentou melhores condições físicas para todos os atributos físicos avaliados.

REFERÊNCIAS

ABEL, S. et. al. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 202, p.183-191, 2013.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 14. ed. Pearson-Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ cap. 05, p. 173- 217, 2008.

BUSSCHER, W. J. et al. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 205-217, 1997.

BUSSCHER, W. J. et al. Influence of Pecan Biochar on Physical Properties of a Norfolk Loamy Sand, **Soil Science**, Philadelphia, v. 175, n. 1, p.10-14, 2010.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. Part 1: Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: ASA-SSSA, cap.13, p. 363- 375, 1986.

CHAN K.Y. et al. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.45, p. 629-634, 2007.

COTCHING, W.E.; BELBIN, K.C. Assessment of the influence of soil structure on soil strength/soil wetness relationships on Red Ferrosols in North-West Tasmania. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.45, p.147-152, 2007.

CROMBIE, K. The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods. **Global Change Biology Bioenergy**, Illinois, v. 5, p. 122–131, 2013.

CURAQUEO, G. et al. Use of biochar on two volcanic soils: Effects on soil properties and barley yield. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Nova York, v.14, p. 911–924, 2014.

DOWNIE, A.; CROSKY A.; MUNROE, P. Physical properties of biochar. Chapter 2. In: Lehmann J. and Joseph S. **Biochar for environmental management science and technology**, London, pp 13–32, 2009.

DREWRY, J.J.; LOWE, J.A.H.; PATTON, R.J. Effect of sheep stocking intensity on soil physical properties and dry matter production on a Pallic Soil in Southland. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Thorndon, v.42, p.493-499, 1999.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solos. 2. ed. 210 p. 2011.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. Part 1: Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: ASA-SSSA, cap. 15, p. 383- 409, 1986.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal Proceedings**, Philadelphia, v.32, p.180-186,1986.

HERATH, H.M.S.K.; CAMPS-ARBSTAIN, M.; HEDLEY, M. Effect of biochar o soil physical properties in two contrasting soil: An Alfisol and Andisol. **Geoderma**, Amsterdam, v.209, p.188-197, 2013.

JEFREY et al. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil, **Geoderma**, Amsterdam, v. 251, p. 47–54, 2015.

JONES, B. E.H; HAYNES, R.J; PHILLIPS, I.R. Effect of amendment of bauxite processing sand with organic materials on its chemical, physical and microbial properties. **Journal of Environmental Management**, Londres, v. 91, p. 2281-2288, 2010.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. Part 1: Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: ASA-SSSA,1986. cap. 26, p. 635-660.

LAIRD, D.A. et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, Amsterdam, v.158, p.443-449, 2010.

MADARI, B. E et al. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (terra preta de índio). Suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009 p. 172-188.

MUKHERJEE, A.; ZIMMERMAN, A. R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. **Geoderma**, Amsterdam, v.193-194, p. 122–130, 2013.

OJEDA, G. et al. Are soil–water functions affected by biochar application? **Geoderma**, Amsterdam, v. 249, p.1–11, 2015.

PASTOR–VILLEGAS et al. Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbon adsorbents. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v.76, n.1/2, p.103-108, 2006.

R CORE Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>, 2016.

SANTOS, H.G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 3. ed. Brasília, Embrapa, 2013, 353 p.

SUN, F.; LU, S. Biochar improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. **Journal Plant Nutrition Soil Science**, Nova York v. 177, p. 26 - 33, 2014.

TAYLOR, H. M.; BURNETT, E. Influence of soil strength on root growth habits of plants. **Soil Science**, Philadelphia, v. 98, p. 174-180, 1964.

TRYON, E.H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils. **Ecological Monographs**, Lawrence, v. 18, n.1, p. 81–115, 1948.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892- 898, 1980.

VAN ZWITEN, L. et. al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 327, p.235–246, 2010.

VERHEIJEN, F. et al. Biochar Application to Soils: A critical scientific review of effects of soil properties, processes and functions, **JRC Scientific and Technical Reports**, Luxemburg, 2010.

3. EFEITO DO BIOCÁRVÃO SOBRE A AGREGAÇÃO E ESTOQUE DE CARBONO EM UM LATOSSOLO AMARELO

RESUMO

A estrutura e agregação do solo tem fundamental importância nas diferentes propriedades do solo. Neste aspecto o conteúdo de carbono orgânico do solo é primordial, pois, funciona como um agente cimentante promovendo um melhor arranjo das partículas minerais e orgânicas do solo. O biocárvão é um condicionante do solo que possui alto teor de carbono e proporciona o estoque deste no solo além de promover uma maior estabilidade dos agregados. O presente estudo teve por objetivo quantificar a estabilidade dos agregados e o estoque de carbono em um Latossolo Amarelo com adição de biocárvão (BIO) na região amazônica, no município de Manaus. Amostras de solo com estrutura deformada e indeformada foram coletadas oito anos após a adição do biocárvão numa dosagem de 80 Mg ha^{-1} , nas profundidades de 0–10; 10–20 e 20–30 cm. Uma área de mata secundária também foi amostrada e utilizada como referência (CONT). Foram determinados a densidade do solo (D_s), densidade das partículas, classes de tamanho de agregados, macroagregados ($> 0,25 \text{ mm}$), microagregados ($< 0,25 \text{ mm}$), os índices de agregação diâmetro médio ponderado (DMP) e geométrico (DMG) e carbono orgânico do solo (CO). Nas duas áreas prevaleceu a classe de agregados de maior tamanho (4 mm), principalmente no BIO em que 90 % dos agregados compreendeu a classe dos macroagregados enquanto os microagregados corresponderam a 10 % dos agregados para a área BIO e cerca de 20 % para a área CONT, no entanto, está último apresentou uma melhor distribuição das diferentes classes de agregados. Conclui-se que a aplicação de biocárvão no solo foi eficiente em aumentar a DMP e DMG do solo, e os valores de CO e estoque de C do BIO foi semelhante ao do solo sob floresta secundária.

Palavras-chave: Estrutura Solo. Matéria Orgânica. Biochar. Agregados.

ABSTRACT

The soil structure and aggregation have fundamental importance in the different properties of the soil. In this aspect, the organic carbon content of the soil is primordial because it acts as a cementing agent promoting a better arrangement of the mineral and organic particles of the soil. Biochar is a soil conditioner that has high carbon content and enables the carbon stock in the soil besides promoting increase of the soil aggregates stability. The objective of this study was

to quantify the soil aggregate stability and the carbon stock in a Yellow Latosol with addition of biochar (BIO) in the Amazon region, municipality of Manaus. Soil samples with disturbed and undisturbed structure were collected eight years after the addition of the biochar at a rate of 80 Mg ha⁻¹, in the depths of 0–10; 10–20 and 20–30 cm. An area under secondary forest was also sampled and used as a reference (CONT). Soil bulk density (Bd), particles density, aggregate size classes, macroaggregates (> 0.25 mm), microaggregates (<0.25 mm) and the index of soil aggregation: weighted and geometric mean diameter (WMD, GMD). In both areas, the aggregates class of larger size (4 mm) prevailed, mainly in the BIO, where 90% of the aggregates comprised the class of macroaggregates while the microaggregates corresponded to 10% of the aggregates for the BIO area and about 20% for the CONT area, however, the latter presented a better distribution of the different classes of aggregates. It was concluded that the application of biochar in the soil was efficient in increasing soil WMD and GMD, and the values of OC and carbon stock of the BIO were similar to those of soil under secondary forest.

Key words: Soil structure. Organic Mater. Biochar. Aggregate.

3.1 INTRODUÇÃO

Em regiões de clima tropical, as condições climáticas favorecem a rápida decomposição da matéria orgânica do solo e, conseqüentemente menos carbono é estocado, em relação às regiões de clima temperado. O estoque de carbono (EC) no solo corresponde de 12 a 20% dos reservatórios de carbono existente na terra (FENNESSY, 2014) e, as mudanças que ocorrem nos ecossistemas naturais tropicais podem causar reduções do conteúdo de carbono, sendo essa diminuição dependente do tipo de uso e manejo do solo (SILVA JUNIOR et al., 2009).

No ambiente amazônico a agricultura é praticada sob condições de altas precipitações e altas temperaturas, que favorecem a rápida mineralização da matéria orgânica (MO) dificultando sua manutenção no solo (LOPES et al., 2015). Para Corazza et al. (1999) o conhecimento do EC e de sua dinâmica no solo em sistemas naturais e agroecossistemas é importante no desenvolvimento de tecnologias para realizar manejos sustentáveis, bem como para analisar o papel do solo como fonte ou depósito de CO₂ para a atmosfera.

Alguns sistemas de uso e manejo do solo em diferentes biomas do Brasil podem alterar consideravelmente os E C do solo (CARVALHO et al., 2010) e, promover no solo o aumento de C e EC, pode auxiliar na melhoria da estrutura do solo pelo processo de agregação das suas partículas minerais e orgânicas. Este processo envolve um conjunto de elementos como argila,

ferro, alumínio e matéria orgânica que atuam como agentes cimentantes unindo as partículas do solo (CORREA et al., 2009). Essa cimentação é mediada pelo conteúdo de C, sendo este ao mesmo tempo, agente ligante e núcleo de formação dos agregados (BRONICK e LAL, 2005).

O conteúdo de matéria orgânica no solo é variável, seja em profundidade do perfil do solo ou horizontalmente, pois, vários fatores atuam nessa disponibilidade como o tipo de solo, relevo, cobertura do solo e condições climáticas (MADARI et al., 2009). Assim, solos com diferentes conteúdos de matéria orgânica apresentam comportamento distintos quanto à agregação e estabilidade dos seus agregados, associado ainda, ao tipo de manejo recebido.

A utilização de resíduos orgânicos no solo com o objetivo de aumentar o conteúdo de matéria orgânica e EC, pode ser uma alternativa viável para auxiliar na melhoria e manutenção da qualidade física dos solos amazônicos e, o biocarvão é uma das alternativas. O biocarvão é um resíduo oriundo da pirólise de materiais orgânicos que passam pelo processo de combustão sem ou com presença muito limitada de oxigênio. O material produzido é rico em carbono e possui potencial de melhoria de diversas propriedades do solo (MADARI et al., 2009). O biocarvão apresenta ainda estrutura interna inerte, semelhante ao grafite, que permite sequestrar o carbono no solo por centenas e até milhares de anos, e sua estrutura periférica e reativa pode atuar como a matéria orgânica natural do ambiente (REZENDE, 2011).

Ao ser adicionado ao solo o biocarvão atua como um condicionante, podendo melhorar a estrutura, densidade, tamanho de poros e agregados do solo (van ZWIETEN et al., 2010), sendo estes últimos, geralmente, mais estáveis o que aumenta significativamente a proporção dos macroagregados do solo e, conseqüentemente, o diâmetro médio ponderado dos agregado (HERATH et al., 2013; SUN e LU 2014; MA et al., 2016). Esses efeitos benéficos do biocarvão sobre os agregados do solo é devido as interações com a matéria orgânica, partículas minerais e microorganismos presentes no sistema (VERHEIJEN et al., 2010).

Buscando aumentar o conteúdo de carbono, assim como melhorar a estrutura dos solos da região Amazônica, levantou-se a hipótese de que a adição do biocarvão ao solo atua sobre a estabilidade dos agregados e do estoque de carbono. Assim objetivou-se quantificar a estabilidade dos agregados e o estoque de carbono em um Latossolo Amarelo com adição de biocarvão em um solo da região amazônica.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de solos do estudo foram coletadas em uma estação experimental localizada no município de Manaus, Estado do Amazonas, região norte do Brasil. O clima da região é do

tipo Afi de acordo com a classificação de Köppen, com temperatura média de 26 °C (máxima 39 °C e mínima de 19 °C), com precipitação média anual de cerca de 2.000 mm, sendo a estação chuvosa de dezembro a maio e a seca de junho a novembro. O solo da área é um Latossolo Amarelo (SANTOS et al., 2013) essencialmente argilo arenoso na camada de 0–10 cm (458, 105 e 436 g kg⁻¹ de areia, silte e argila) e argiloso nas camadas de 10–20 cm (347; 118 e 535 g kg⁻¹ de areia, silte e argila) e 20–30 m (314; 182 e 504 g kg⁻¹ de areia, silte e argila).

Na área avaliada um experimento foi implantado em março de 2006 e consistiu da adição de biocarvão no solo nas dosagens de 0, 40, 80 e 120 Mg ha⁻¹, porém, neste estudo foi avaliada somente a dosagem de 80 Mg ha⁻¹, pois, segundo Chan et al. (2007) dosagens entre 50 e 100 Mg ha⁻¹ são as que promovem alterações mais significativas no solo. O biocarvão adicionado foi proveniente das carvoarias da região e composto por diferentes espécies florestais (SWAMI et al., 2009). Em três parcelas delimitadas de 5 m x 5 m (25 m²) a cobertura vegetal que era de floresta secundária de aproximadamente 30 anos, foi cortada e os resíduos da parte aérea removidos. O biocarvão foi incorporado ao solo manualmente com auxílio de enxada a uma profundidade de aproximadamente 20 cm.

Vale salientar que o objetivo primordial da implantação desse experimento foi avaliar a adição de diferentes dosagens de biocarvão nas propriedades químicas do solo e produtividade do feijão-caupi (*Vigna Ungiculata*) e milho (*Zea Mays*). Três meses após a adição do biocarvão, as parcelas foram cultivadas seguindo a sucessão feijão-caupi/milho com revolvimento superficial e plantios realizados manualmente. Periodicamente as propriedades químicas do solo e produtividade das culturas foram determinadas (dados ainda não publicados). Como o presente estudo teve por objetivo avaliar as propriedades físicas do solo, na tentativa de suprimir o efeito dos cultivos na parcela controle (dose zero) optamos por usar como área de referência uma área adjacente ao experimento, em pousio, com mesma classe de solo, com vegetação de floresta secundária de aproximadamente 30 anos (condição prévia da área do experimento) a fim de verificar o potencial da adição do biocarvão em manter as propriedades físicas do solo mais próximas das condições de uma área com manejo menos intenso. Ao longo do trabalho as áreas avaliadas serão designadas de área com adição de biocarvão (BIO) e a área de referência, aqui denominada de controle (CONT).

Nas duas áreas, em outubro de 2014, amostras de solo com estrutura indeformada foram coletadas em anéis metálicos (0,05 m de altura x 0,05 m de diâmetro) nas profundidades de 0–10; 10–20 e 20–30 cm, para caracterização da densidade do solo (BLAKE & HARTGE, 1986). Amostras com estrutura deformada também foram coletadas para determinação da distribuição

do tamanho das partículas do solo (GEE & BAUDER, 1986) e carbono orgânico (Walkley-Black, 1934).

Nas mesmas profundidades foram coletados blocos de solos para obtenção dos agregados e avaliação da estabilidade dos agregados, segundo a metodologia proposta por Kemper e Cheppil (1965) e adaptada por Embrapa (1997). No preparo das amostras os blocos foram manualmente e cuidadosamente destorroados a fim de não destruir os agregados que foram passados em peneira de 9 mm e retidos em peneira de 4 mm, sendo excluídos fragmentos de plantas, pedras, cascalhos ou outros materiais irrelevantes, retidos na peneira. A separação dos agregados em classes de tamanhos foi feita por peneiramento via seco utilizando um conjunto de peneiras arranjadas verticalmente e com malhas e aberturas de 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125 e <0,125 mm. Estas sete classes de tamanho foram, posteriormente, classificadas em macroagregados (> 0,25 mm) e microagregados (< 0,25 mm).

A massa de agregados retida em cada peneira foi usada para calcular os índices de agregação: diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG), de acordo com Kemper e Cheppil (1965), pelas equações:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (xi \cdot wi) \quad (1)$$

sendo xi o diâmetro médio das classes de agregados (mm) e wi a proporção de cada classe em relação ao total.

$$DMG = \left(\exp \sum_{i=1}^n (wp \cdot \log xi) \right) / \left(\sum_{i=1}^n wi \right) \quad (2)$$

onde wp é peso dos agregados de cada classe (g); xi o diâmetro médio das classes e wi a proporção de cada classe em relação ao total.

A partir dos dados de densidade do solo e carbono orgânico foi calculado o estoque de carbono do solo na profundidade de 0–30 cm pela equação:

$$EC = \frac{COT \times Ds \times e}{10} \quad (3)$$

em que EC é o estoque de carbono na camada estudada ($Mg \text{ ha}^{-1}$); COT o carbono orgânico total ($g \text{ kg}^{-1}$); Ds a densidade do solo da camada estudada ($Mg \text{ m}^{-3}$); e a espessura da camada considerada (m). O cálculo do estoque de carbono nas respectivas profundidades e parcelas foi estimado pelo método da camada (BAYER et al., 2000), este método leva em

consideração a espessura da camada amostrada e a densidade do solo determinada na camada amostrada.

Foi utilizada a análise de variância (ANOVA de um fator) para avaliar os efeitos da aplicação do biocarvão na distribuição e estabilidade do tamanho do agregado do solo, conteúdo de CO e estoque de carbono, com separação das médias pelo teste Tukey. Todos os resultados foram considerados significativamente diferentes a $P = 0,05$, salvo indicações contrárias. A relação entre os atributos físicos, para cada área, foi analisada pela correlação de Pearson. Todas as análises foram realizadas no programa estatístico R (R CORE TEAM, 2013).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tanto na área com aplicação de biocarvão (BIO) quanto na área de referência (CONT) o conteúdo de carbono orgânico foi maior na camada de 0-10 cm (Tabela 1) não havendo diferença entre as áreas para esta profundidade; já nas camadas subsequentes, foi verificada uma redução nas duas áreas sendo o conteúdo de CO na área CONT significativamente maior que a BIO. Como foi historiado, a área de referência, citada como controle, consiste de uma área de pousio, com vegetação de floresta secundária, portanto, com aporte de resíduos de diferentes espécies que possuem sistemas radiculares também distintos e, possivelmente por esta razão o conteúdo de CO na área CONT foi relativamente superior nas três profundidades.

O carbono orgânico atua na estrutura do solo promovendo melhoria na agregação e aumentando a porosidade do solo (BRADY; WEIL, 2008). Assim, o maior conteúdo de CO na camada superficial, para as duas áreas, resultou em menor D_s nesta camada em relação às camadas consecutivas. No entanto, nas três profundidades a D_s não diferiu significativamente entre as áreas CONT e BIO; o mesmo não foi observado para os valores de D_p que foram inferiores no BIO nas três profundidades. A menor D_p na área BIO é resultado direto da presença das partículas de biocarvão que apresentam densidade muito baixa, de aproximadamente $0,42 \text{ Mg m}^{-3}$ (ALLAIRE et al., 2015).

Tabela 1 – Conteúdo de carbono orgânico (CO), densidade do solo (Ds) e das partículas (Dp) de um Latossolo Amarelo com aplicação de biocarvão (BIO) e área controle (CONT), no município de Manaus-AM.

Profundidade cm	Trat.	CO g kg ⁻¹	Ds		Dp Mg m ⁻³
0–10	BIO	23,22a	1,17a		2,47b
	CONT	24,44a	1,16a		2,64a
10–20	BIO	16,67a	1,36a		2,61b
	CONT	19,33b	1,37a		2,66a
20–30	BIO	9,56a	1,41a		2,62b
	CONT	16,11b	1,42a		2,69a

Fonte: Autora.

O fracionamento dos agregados em diferentes classes de tamanho pode ser observado na Figura 1, juntamente com a porcentagem de macro e microagregados com diâmetro maior e menor que 0,25 mm, respectivamente. Nas duas áreas prevaleceu a classe de agregados de maior tamanho (4 mm), principalmente no tratamento BIO, o que resultou em uma alta porcentagem de macroagregados para esta área nas três profundidades (> 90%). Apesar da área CONT ter apresentado menor proporção da classe de agregados de 4 mm, houve uma melhor distribuição das demais classes para essa área, enquanto para a área BIO as porcentagens das outras classes de tamanho foram pouco representativas. Para as duas áreas preponderou os macroagregados em relação aos microagregados, estes últimos representaram menos de 10 % dos agregados para a área BIO e cerca de 20 % para a área CONT.

Em concordância com os nossos resultados, Sun e Lu (2014) constataram que a adição de biocarvão, produzido a partir de palha e aparas de madeira, em um solo argiloso, melhorou significativamente a formação de macroagregados em relação ao solo sem adição e atribuiu esse efeito a provável formação de macroagregados maiores pela coalescência dos microagregados, visto que uma significativa redução dos microagregados foi observada. Com efeito, é presumido que as propriedades físicas e químicas do biocarvão possam exercer a função de unir as partículas do solo e/ou agregados menores criando uma associação mais resistente.

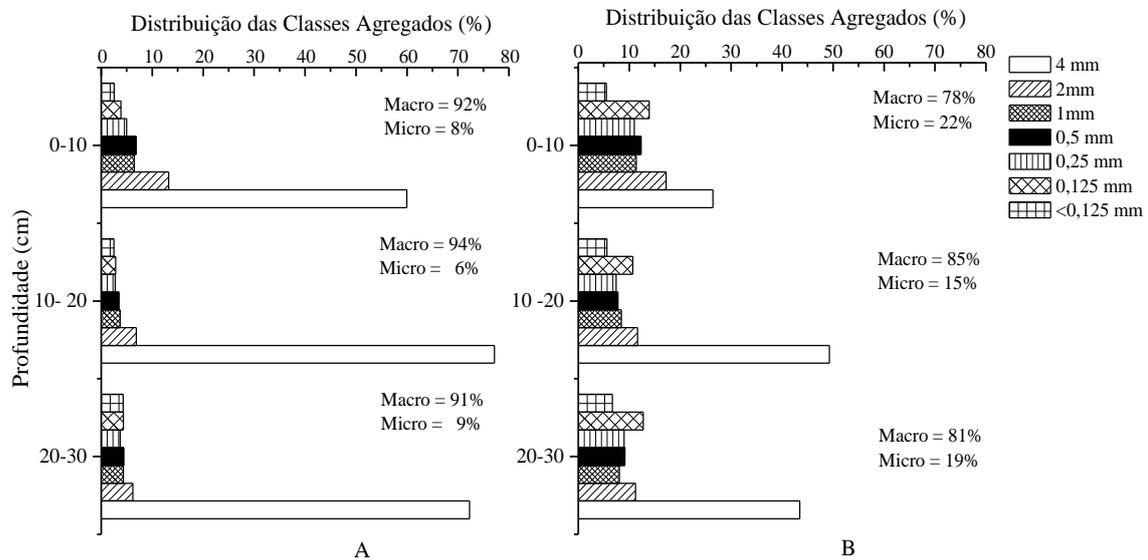
O efeito positivo do biocarvão na formação de macroagregados do solo é atribuído à sua interação com as partículas minerais do solo, incluindo uma intercalação com as argilas e interações com as superfícies hidrofóbicas-hidrofílicas (JOSEPH et al., 2010). Neste estudo, o efeito da adição do biocarvão no solo sobre a agregação foi observada somente na classe de

agregados de maior tamanho (4 mm). Este resultado indica que a efetividade da aplicação do biocarvão teve um papel mais importante sobre os agregados maiores e atuou menos intensamente em governar a estrutura hierárquica do solo em diferentes classes de tamanho, como foi observado na área CONT (Figura 1).

A agregação do solo é influenciada por uma série de fatores como a capacidade de floculação do solo e natureza dos cátions presentes, a mineralogia do solo, tipos de ácidos orgânicos, cátions polivalentes, matéria orgânica e atividade microbológica e os tipos de microrganismos envolvidos e, a matéria orgânica é um dos fatores mais relevantes para melhorar a agregação do solo (BRADY; WEIL, 2008). Assim, o maior conteúdo de CO na área CONT, associado a maior diversidade de plantas e, possivelmente, de microrganismos desta área, pelo seu histórico de anos de pousio, contribuiu para a formação e estabilidade de agregados de diferentes classes de tamanhos.

Nossa expectativa de que o biocarvão consistentemente aumentaria a formação de agregados foi parcialmente constatada, com predominância de agregados principalmente de uma classe de tamanho (4 mm). O fato é que as conclusões com relação aos impactos do biocarvão sobre os agregados do solo são ainda contraditórias. Zhang et al. (2015) avaliaram o efeito da aplicação de biocarvão após um ano sobre a distribuição do tamanho dos agregados e estabilidade estrutural e, seus resultados mostraram que nem a agregação do solo nem a estabilidade foram significativamente afetadas pelo biocarvão. As observações desses autores foram suportadas por outros estudos (BUSSCHER et al., 2010; PENG et al., 2011). Divergentemente, outros estudos de laboratório ou de campo mostraram uma resposta positiva do biocarvão na agregação do solo (GLASER et al., 2000; HERATH et al., 2013; OUYANG et al., 2013; SUN & LU, 2014).

Figura 1 – Classes de tamanho de agregados de um Latossolo Amarelo com aplicação de biocarvão (A) e área controle (B), no município de Manaus-AM. Macro e Micro se referem à porcentagem de agregados $>0,25$ mm e $<0,25$ mm, respectivamente.



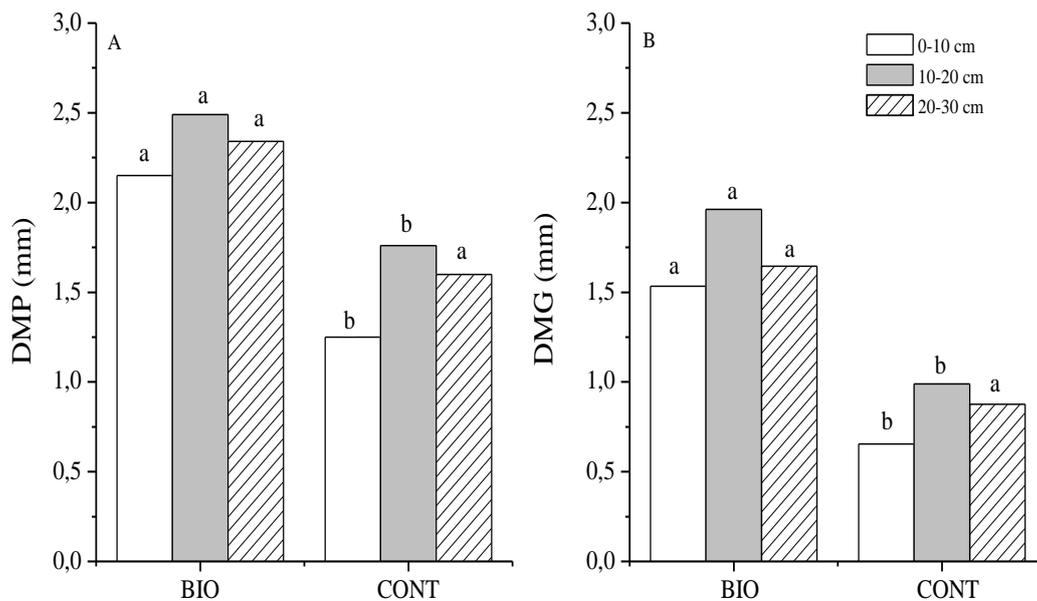
Fonte: Autora.

Os resultados desse estudo mostraram que o efeito mais ativo do biocarvão foi o seu papel em aumentar a proporção de macroagregados e, portanto, o diâmetro médio ponderado (DMP) foi significativamente superior no BIO em relação ao CONT nas camadas de 0–10 e 10–20 cm e, apesar de maior também na camada de 20–30 cm não houve diferença estatística com relação ao CONT (Figura 2A) para esta profundidade.

Os índices DMP e DMG são índices de agregação que avaliam as melhorias na estrutura do solo. O DMP aumenta à medida que a porcentagem de agregados maiores retidos nas peneiras aumenta, já o DMG representa uma estimativa da classe de agregados de maior ocorrência. Assim, quanto maior os valores de DMP e DMG, mais resistente ao rompimento são estes agregados. Desta forma, a aplicação de biocarvão no solo foi eficiente em aumentar a DMP e DMG (Figura 2). O DMP foi maior que 2,0 mm na área BIO nas três profundidades enquanto que para o CONT foi sempre inferior a este valor. O mesmo padrão da DMP foi observado com relação ao diâmetro médio geométrico (DMG), ou seja, maior na área BIO para as três profundidades, no entanto, sem diferença significativa na camada de 20–30 cm (Figura 2, B). Para um mesmo solo, o DMP varia de acordo com as práticas de manejo e conteúdo de matéria orgânica e é considerado um bom indicador para avaliar se as condições físicas do solo estão sendo melhoradas ou não.

Os efeitos do biocarvão sobre a agregação do solo, avaliado por estes índices, também são discordantes na literatura. Somente a aplicação do biocarvão não afetou a DMP do solo nos resultados apresentados por Ma et al. (2016), porém, combinado com adubo verde ou adubação mineral houve um aumento do DMP. Assim, esses autores concluíram que o biocarvão juntamente com a adubação mineral do solo foi mais efetiva em aumentar o conteúdo de CO, a proporção relativa de macroagregados e o DMP do que somente a adubação mineral. Mudanças não significativas no DMP e DMG também foram relatadas por Zhang et al. (2015), porém, esses autores utilizaram dosagens de aplicação bem inferiores ao do nosso estudo, de 4,5 e 9 Mg ha⁻¹. Fungo et al. (2017) argumentam que a indiferença no DMP somente com a aplicação de biocarvão pode estar relacionado com a quantidade e qualidade do biocarvão aplicada (textura, pH, CTC). De fato, os diversos estudos sobre o efeito do biocarvão nas propriedades químicas e físicas do solo divergem grandemente com relação ao tipo e quantidade de biocarvão utilizado. No geral, os múltiplos resultados apresentados sugerem que os mecanismos para melhorar a estabilidade dos agregados do solo pela adição de biocarvão ainda precisam ser melhor elucidados.

Figura 2 – Valores para diâmetro médio ponderado (DMP, A), diâmetro médio geométrico (DMG, B) para as parcelas experimentais BIO e CONT analisadas em três profundidades no município de Manaus.

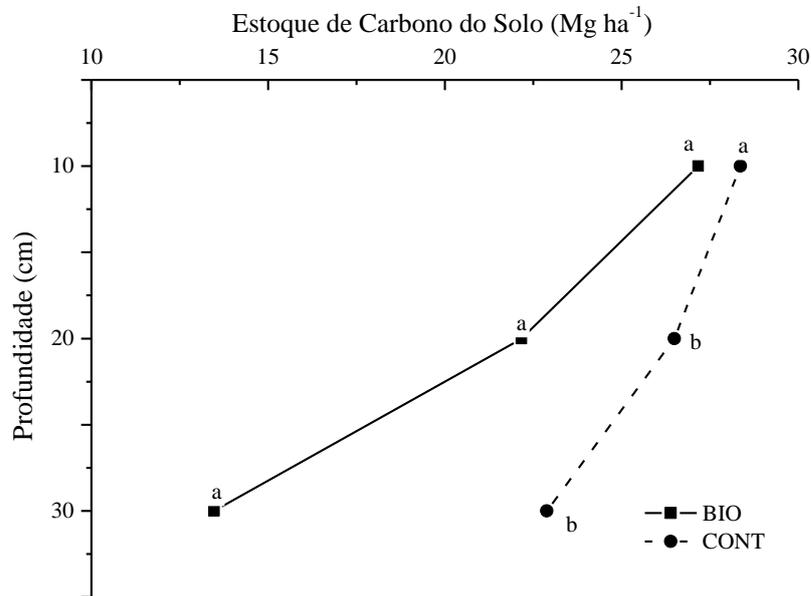


Fonte: Autora.

Com base no conteúdo de CO e Ds em cada profundidade, foi calculado o estoque de carbono (EC) no solo (Figura 3). O EC na camada superficial (0–10 cm) foi superior a 25 Mg ha⁻¹ nas duas áreas e não houve diferença entre elas. Esse incremento do EC na camada superficial do solo é em virtude deste ser mais sensível a variação do CO e estar sobre a ação direta dos microrganismos presentes na matéria orgânica (OLIVEIRA et al., 2008). A redução do EC observada nas camadas seguintes, para as duas áreas, foi menos acentuada na área CONT que apresentou uma redução de 28,4 para 26,5 e 22,9 Mg ha⁻¹ para as camadas de 0–10, 10–20 e 20–30 cm, respectivamente. Para a área BIO essa redução foi mais evidente passando de 27,2 para 22,2 e 13,5 Mg ha⁻¹ da superfície até a subsuperfície. Visto que, em geral, observa-se um decréscimo do conteúdo de CO em profundidade, concomitantemente também há uma redução no EC nas camadas mais profunda. Como discutido com relação ao CO, o maior EC na área controle se deve a maior diversidade de espécies vegetais, com sistemas radiculares diversos que atingem diferentes profundidades e, por conseguinte, contribuem para um maior aporte de resíduos orgânicos que, ao se decomporem são incorporados à matéria orgânica do solo em diferentes profundidades. De acordo com Araújo et al. (2011) esse comportamento é esperado pois em ecossistemas amazônicos a maior parte do carbono encontra-se contido na biomassa da vegetação.

Apenas em 0–10 cm os conteúdos de EC foram semelhantes entre as duas áreas. Jiang et al. (2016) encontraram resultados contrários, onde o biocarvão promoveu aumento de C na superfície e aumento do estoque no perfil do solo, porém, há muitas divergências quanto a relação do biocarvão e disponibilidade de C no solo, assim como em relação aos valores de EC em áreas de floresta como em áreas que o solo passa por diferentes sistemas de manejo. Alguns autores relatam o poder mitigador do biocarvão em fixar o carbono da atmosfera no solo e isso pode auxiliar na melhoria das propriedades do solo e redução nas emissões de CO₂ na atmosfera (PETER; MADARI, 2012).

Figura 3 – Estoque de carbono no solo para as três profundidades parcelas experimentais estudadas no Estado do Amazonas.



Fonte: Autora.

A correlação de Pearson foi usada para avaliar a correlação entre os atributos físico do solo e mostrou alta colinearidade ($r_s > |0,70|$) entre alguns dos atributos avaliados (Tabela 2) principalmente na área CONT. Tanto para a área CONT como para a BIO, evidentemente, os dados de DMP e DMG foram os que apresentaram maior correlação, em virtude de serem derivados dos mesmos dados. Na área CONT o conteúdo de argila foi positivamente correlacionado com a Ds enquanto o mesmo não foi observado para o tratamento com biocarvão (BIO). Para ambas as áreas o conteúdo de carbono orgânico (CO) foi negativamente correlacionado com a Ds, o que era esperado pois o CO atua na redução da Ds diretamente pelo baixo peso do CO, reduzindo desta forma, a massa de solo por unidade de volume e, indiretamente pelas mudanças na estrutura do solo, aumentando a porosidade e consequentemente, reduzindo o volume de sólidos por unidade de volume.

Além da correlação com o DMG, o DMP também foi positivamente e altamente correlacionado com o volume de macroagregados ($r_s = 0,924$) na área CONT, nesta área também foi observada alta correlação do DMG o volume tanto de macro quanto de microagregados do solo, sendo este último negativamente correlacionado com os macroagregados ($r_s = -0,877$), ou seja, a prevalência de um reduz a proporção do outro.

Curiosamente, estas relações entre os índices de estabilidade de agregados (DMP e DMG) e a proporção de macro e microagregados não foram observadas na área BIO.

Tabela 2 – Coeficientes (rs) de correlação de Pearson entre os atributos físicos do solo das áreas com biocarvão (BIO) e controle (CONT), no município de Manaus, AM (n = 27)

	Argila	CO	DMP	DMG	Ds	Macro	Micro
CONT							
Argila	1						
CO	-0,667	1					
DMP	0,590	-0,500	1				
DMG	0,510	-0,449	0,985	1			
Ds	0,873	-0,847	0,582	0,508	1		
Macro	0,410	-0,305	0,924	0,953	0,379	1	
Micro	-0,185	0,059	-0,814	-0,877	-0,106	-0,877	1
BIO							
Argila	1						
CO	-0,132	1					
DMP	0,455	-0,328	1				
DMG	0,440	-0,167	0,972	1			
Ds	0,347	-0,752	0,277	0,155	1		
Macro	0,349	0,129	0,223	0,371	0,009	1	
Micro	-0,127	-0,518	-0,456	-0,639	0,380	-0,485	1

Fonte: Autora. CO: carbono orgânico; DMP: diâmetro médio ponderado; DMG; diâmetro médio geométrico; Ds: densidade do solo; Macro: macroagregados (> 0,25 mm); micro: microagregados (< 0,25 mm)

3.4 CONCLUSÕES

Neste estudo foi mostrado que após um período de oito anos da aplicação de biocarvão como condicionante do solo, este apresentou conteúdo de CO semelhante ao do solo sob floresta secundária e uma distribuição de classes de tamanho de agregados com prevalência de agregados de maior tamanho (4 mm) e baixa percentagem de microagregados (< 0,25 mm). A alta estabilidade de agregados na área com BIO indica que este pode ser um condicionante

potencial para melhorar a estrutura de solos equivalentes ao deste estudo, Latossolo Amarelo de textura argilo-arenosa à argilosa.

REFERÊNCIAS

- ALLAIRE S.E. et al., (The Char Team) Report: Analyses of biochar properties. CRMR-2015-SA-5. **Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables**, Université Laval, Québec, Canadá, p.59, 2015.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. Part 1: Physical and mineralogical methods. **2. ed. Madison: ASA-SSSA**, 1986, cap.13, p. 363-375.
- BAYER, C. et al. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**. Amsterdam, v. 54, p. 101-109, 2000.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The Nature and Properties of Soil**. Revised 14th Edition. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, New Jersey:Pearson-Prentice Hall, 2008.Cap 5, p.173-217.
- BRONICK, C.J. & LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**,Amsterdam, v. 124, p.3-22, 2005.
- BUSSCHER, W.J. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand. **Soil Science**, Philadelphia, v. 175, p. 10–14, 2010.
- CARVALHO et al., Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p.277-289, 2010.
- CORRÊA, J. C. et al. Alteração de atributos físicas em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.263- 272, 2009.
- CORAZZA, E.J. et al. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 425-432, 1999.
- FUNGO, B. Aggregate size distribution in a biochar-amended tropical Ultisol under conventional hand-hoe tillage. **Soil and Tillage Research**, Amasterdam, v. 165, p. 190–197, 2017.
- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. Part 1: Physical and mineralogical methods. **2. ed. Madison: ASA-SSSA**, 1986, cap. 15, p. 383- 409.
- GLASER, B. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. **Org.Geochem**, v. 31, p. 669–678, 2000.

HERATH, H.M.S.K.; CAMPS-ARBSTAIN, M.; HEDLEY, M. Effect of biochar o soil physical properties in two contrasting soil: An Alfisol and Andisol. **Geoderma**, Amsterdam, p.188-197, 2013.

JIANG, X.; HADDIX, M. L.; COTRUFO, M. F. Interactions between biochar and soil organic carbon decomposition: Effects of nitrogen and low molecular weight carbon compound addition. **Soil Biology e Biochemistry**, v. 100, p.92-101, 2016.

JOSEPH, S.D. et al. An investigation into the reactions of biochar in soil. **Soil Research**, Amsterdam, v. 48, p. 501–515, 2010.

KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGE, L.E. & CLARK, F.E., eds. **Methods of soil analysis**. Madison, **American Society of Agronomy**, Madison, p.499-510, 1965.

LOPES, E.L.N et al. Soil attributes under different crop management systems in an Amazon Oxisols, **Bragantia**, Campinas, v.74,n.4 p.428435, 2015

MA, N. et al. Biochar improves soil aggregate stability and water availability in a mollisol after three years of field application. **Plos One**, v.5, p. 1-11, 2016.

MADARI, B. E et al. Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (terra preta de índio). Suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 172-188.

OLIVEIRA, J.T. et al. Características físicas e carbono orgânico de solos sob diferentes tipos de uso da terra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.1, p.132-138, 2008.

OUYANG, L., et al. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. **Journal Soil Science Plant Nutrition**, Nova York, v. 13, p. 991–1002, 2013.

PETER, F.A; MADARI, B.E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.7, p.761–768, 2012

PENG, X. et al. Temperature- and duration dependent rice straw-derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam ,v. 112, p. 159–166, 2011.

R CORE Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>, 2016.

REZENDE, E. I. P. et al. Biocarvão (Biochar) e Sequestro de Carbono, **Revista Virtual Química**, Rio de Janeiro, v.3, p. 426-433, 2011.

SUN, F.; LU, S. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayeysoil. **Journal Plant Nutrition Soil Science**, Nova York,v. 177, p. 26-33, 2014.

SWAMI, S.N. et al., Charcoal Making in the Brazilian Amazon: Economic Aspects of Production and Carbon Conversion Efficiencies of Kilns. WI Woods et al. (eds.), **Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision**, Springer Science Business Media B.V. 2009, p.411-422.

SILVA JUNIOR, M.L. et al. Carbon content in amazonian oxisols after forest conversion to pasture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p.1603-1611, 2009.

TSAI W. T. et al. Textural and chemical properties of swine-manure-derived biochar pertinent to its potential use as a soil amendment. **Chemosphere**, v. 89, p. 198–203, 2012.

Van ZWIETEN, L. et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 327, p.235-246, 2010.

VERHEIJEN F. et al. Biochar Application to Soils: A critical scientific review of effects of soil properties, processes and functions, **JRC Scientific and Technical Reports**, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2010.

ZHANG, Q. et al. A one-year short-term biochar application improved carbon accumulation in large macro-aggregate fractions. **Catena**, v.127, p. 26–31, 2015.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, Baltimore, v. 37, n. 1, p. 29-38, Jan./June 1934.