

MARIA MAIARA CAZOTTI TANURE

**PRODUÇÃO DE BIOCÁRVÕES PARA ESTUDOS DE RETENÇÃO DE
ÁGUA, CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E RESISTÊNCIA À
PENETRAÇÃO EM LATOSSOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

Tanure, Maria Maiara Cazotti, 1988-

T169p
2018

Produção de biocarvões para estudos de retenção de água,
condutividade hidráulica e resistência a penetração em latossolo /
Maria Maiara Cazotti Tanure. – Viçosa, MG, 2018.
vi, 72 f.: il. (algumas color.).

Orientador: Liovando Marciano da Costa.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2018.

Inclui bibliografia.

1. Física do solo. 2. Biocarvão. 3. Terra preta. 4. Solos -
Umidade. 5. Solos - Permeabilidade. 6. Solos - Compactação.
I. Costa, Liovando Marciano da. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em
Solos e Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.43

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto CRB6 2523

MARIA MAIARA CAZOTTI TANURE

**PRODUÇÃO DE BIOCÁRVÕES PARA ESTUDOS DE RETENÇÃO DE
ÁGUA, CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E RESISTÊNCIA À
PENETRAÇÃO EM LATOSSOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 07 de dezembro de 2018.

Diego Lang Burak

Paulo Roberto Cecon

Samuel Vanconcelos Valadares

Raphael Bragança Alves
Fernandes
(Coorientador)

Liovando Marciano da Costa
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar na busca dos meus objetivos e me tranquilizar nos momentos difíceis.

Aos meus pais que sempre me incentivaram a alcançar caminhos cada vez mais distantes.

Ao meu esposo Luís Paulo, pela compreensão e incentivo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao professor meu orientador Liovando Marciano da Costa, pela amizade, paciência, dedicação, crescimento profissional e por ser também um exemplo a ser seguido.

Ao professor Hugo Alberto Huiz, pelo incentivo, amizade, compreensão, dedicação e crescimento profissional.

Aos meus coorientadores, Raphael Bragança Alves Fernandes e Hugo Alberto Huiz e aos professores do DPS, pelos ensinamentos.

Ao professor Paulo Roberto Cecon, pela amizade e pelos ensinamentos.

À Universidade Federal do Espírito Santo e em especial ao professor Renato Ribeiro Passos pela contribuição na execução desta tese.

Aos estagiários Helinho, Junior, Pâmela e Priscila.

Aos laboratoristas do departamento, em especial aos da Geoquímica, Física e Fertilidade.

Ao Evandro, pela incansável disponibilidade de ajudar.

Aos amigos José Dias e Morgana, por todo o carinho recebido durante o período que estive na Universidade Federal do Espírito Santo.

Aos amigos da UFV e em especial Fernanda, Josiane, Rafaella, Vanessa, Steliane, Luiz Paulo, Cristiano, Leiliane, José Alexander, Aristides e a República Tipo Fiona, sem vocês não seria possível.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte deste trabalho, o meu muito obrigada.

BIOGRAFIA

MARIA MAIARA CAZOTTI TANURE, filha de Juarez Cazotti e Iva Dias Cazotti, nasceu dia 04 de março de 1988, no município de Castelo, Espírito Santo. Técnica em Mineração com Ênfase em Rochas Ornamentais, pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo em Cachoeiro de Itapemirim, em 2007, Espírito Santo. Graduada em Agronomia pela Universidade Federal do Espírito Santo, em 2013, no município de Alegre, Espírito Santo. Em abril de 2013, iniciou o Curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas na Universidade Federal de Viçosa, sob a orientação do professor Liovando Marciano da Costa, obtendo o título de mestre em 2015. Em março de 2015, iniciou o Curso de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas na Universidade Federal de Viçosa, sob a orientação do professor Liovando Marciano da Costa, submetendo-se à defesa de tese em 07 de dezembro de 2018.

SUMÁRIO

Resumo	v
Abstract	vi
1. Introdução Geral	1
2. Rerefências Bibliográficas	2
3. Artigo 1: A qualidade do biocarvão não é afetada pelo gás de arraste	4
4. Artigo 2: Retenção de água no solo, características fisiológicas e desenvolvimento de plantas de milho em resposta à aplicação de doses de biocarvão	27
5. Artigo 3: Qualidade física de um latossolo vermelho artificialmente compactado em resposta a aplicação de biocarvão	55
6. Conclusão Geral	72

RESUMO

TANURE, Maria Maiara Cazotti, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2018. **Produção de biocarvões para estudos de retenção de água, condutividade hidráulica e resistência à penetração em Latossolo.** Orientador: Liovando Marciano da Costa. Coorientadores: Raphael Bragança Alves Fernandes e Hugo Alberto Huiz.

O setor agrícola é responsável pela produção de alimentos, fibras e parcela da energia. Entretanto tem sido o setor responsável pelo maior consumo de água no planeta, 70% da demanda. Além de ser responsável por grande parcela de solos degradados, o que restringe cada vez mais os ganhos na produção agrícola e ameaça a segurança alimentar das populações. Os solos denominados Terra Preta de Índio têm sido estudados como diferenciados nos cenários de boa estruturação, condição físico-hídrica, além de elevada fertilidade. Apresentam como diferencial a origem da matéria orgânica humificada, resultado da transformação de resíduos em carvão vegetal pelos antigos povos dessas regiões. O material orgânico humificado, denominado biocarvão, tem sido proposto como excelente alternativa para a melhoria da qualidade química, física e biológica de sistemas agrícolas. Apesar das amplas pesquisas com efeitos positivos da aplicação de biocarvão, alguns aspectos ainda precisam ser mais bem elucidados, principalmente aqueles relacionados com as propriedades física e hídrica dos solos e da própria produção do biocarvão. O artigo 1 tem como objetivo entender as mudanças que a atmosfera de nitrogênio provoca em biocarvões produzidos em diferentes temperaturas. Artigo 2: Quantificar a condutividade hidráulica em meio saturado, porosidade e a resistência a penetração em resposta ao incremento artificial do índice de compactação de misturas contendo solo e biocarvão em diferentes doses. Artigo 3: Avaliar o efeito da aplicação de diferentes doses de um biocarvão com duas granulometrias, sobre as características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco arenosa e sobre o desenvolvimento e características fisiológicas de plantas de milho, em duas condições de umidade do solo em casa de vegetação.

ABSTRACT

TANURE, Maria Maiara Cazotti, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2018. **Biochar production for studies on water retention, water conductivity and root penetration in Latosol.** Advisor: Liovando Marciano da Costa. Co-advisors: Raphael Bragança Alves Fernandes and Hugo Alberto Huiz

The agricultural sector is responsible for the production of food, fiber, and energy. However, it has been responsible for the largest consumption of water on the planet, accounting for 70% of the demand. In addition, it is accountable for a large share of degraded soils, which more and more restricts gains in agricultural production and threatens the food security of populations. The soils denominated Amazonian Dark Earth have been studied as differentiated in the scenarios of adequate soil structure, physical and water conditions, as well as high fertility. They present as a differential the origin of the humified organic matter, which resulted from the transformation of residues into charcoal by the ancient peoples of these regions. Organic humified material, named biochar, has been proposed as an excellent alternative for improving the chemical, physical and biological quality of agricultural systems. Despite the wide studies with positive effects of the application of biochar, some aspects still need to be better elucidated, especially those related to the physical and water properties of the soils and the production of biochar itself. The objective of paper 1 was to understand the changes that the atmosphere of nitrogen causes in biochars produced at different temperatures. The objective of paper 2 was to evaluate the effect of the application of different doses of a biochar with two grain sizes on the physical and chemical characteristics of a sandy-loam Red-Yellow Latosol the development and physiological characteristics of corn plants under two conditions of soil moisture in a greenhouse. The objective of paper 3 was to quantify the hydraulic conductivity in saturated medium, porosity and penetration resistance in response to the artificial increase in the compaction index of mixtures containing soil and biochar at different doses.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A população mundial conta com 7 bilhões de pessoas na atualidade, com expectativa que se alcance em 2050 o patamar de 9 bilhões. Todo esse crescimento populacional vem acompanhado do aumento da demanda de água, energia, alimentos e fibras, o que impulsiona toda a cadeia produtiva a buscar soluções para o melhor uso e a produção mais racional dos recursos.

O setor agrícola é responsável pela produção de alimentos, fibras e parcela da energia. Entretanto, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), este tem sido o setor responsável pelo maior consumo de água no planeta, o que, em termos mundiais médios, representa cerca de 70% de toda a demanda. Este cenário de grande uso dos recursos hídricos é resultado das exigências hídricas da própria atividade, do aumento das áreas irrigadas e/ou do emprego de técnicas ineficientes de cultivo.

O setor agrícola também é o responsável por grande parcela de solos degradados, o que restringe cada vez mais os ganhos na produção agrícola e ameaça a segurança alimentar das populações. As estimativas da degradação dos solos, causado pela compactação, chegam a 68 milhões de hectares em todo mundo (Batey, 2009; Hamza e Anderson, 2005; Van den Akker e Canarache, 2001). A compactação tem causa principal o uso de máquinas agrícolas pesadas (Tracy et al. 2011), que resultam no aumento da densidade do solo e na diminuição da conectividade dos poros com redução da qualidade física do solo.

Os solos antropogênicos, denominados Terra Preta de Índio, na bacia amazônica têm sido estudados como diferenciados nos cenários de boa estruturação, condição físico-hídrica e elevada fertilidade. Nesses solos, grande parte da porção humificada da matéria orgânica tem origem na transformação de resíduos em carvão vegetal, pelos antigos povos dessas regiões (Glaser et al. 2011). O material orgânico humificado, denominado biocarvão, tem sido proposto como excelente alternativa para a melhoria da qualidade química, física e biológica de sistemas agrícolas.

O biocarvão é obtido pelo processo de pirólise, que também gera gases e bio-óleos. Todos os três produtos podem ser usados para gerar energia renovável, mas o biocarvão por ser recalcitrante pode ser aplicado no solo

(Lehmann, 2007). O processo de pirólise consiste na decomposição térmica do material orgânico em atmosfera com baixas concentrações de oxigênio e uso de um gás inerte para o arraste.

O biocarvão tem sido descrito como um possível meio para melhorar a fertilidade do solo, principalmente, por aumento do pH em solos ácidos e da capacidade de troca catiônica (Van Zwieten et al., 2010, Andrade et al., 2015); para sequestrar carbono e assim mitigar as mudanças climáticas (Lehmann, 2007); para a adsorção de metais pesados e redução de contaminantes na solução do solo (Beesley e Marmiroli, 2011, Chen et al., 2014); para aumentar e diversificar a população microbiana (O' Neill et al., 2009); para aumentar o conteúdo de água disponível no solo e reduzir a densidade do solo (Baronti et al., 2014).

Apesar das amplas pesquisas com efeitos positivos da aplicação de biocarvão, alguns aspectos ainda precisam ser mais bem elucidados, principalmente aqueles relacionados com as propriedades física e hídrica do solo e da própria produção do biocarvão.

O artigo 1: Entender as mudanças que a atmosfera de nitrogênio provoca em biocarvões produzidos em diferentes temperaturas.

Artigo 2: Quantificar a condutividade hidráulica em meio saturado, porosidade e a resistência a penetração em resposta ao incremento artificial do índice de compactação de misturas contendo solo e biocarvão em diferentes doses.

Artigo 3: Avaliar o efeito da aplicação de diferentes doses de um biocarvão com duas granulometrias, sobre as características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco arenosa e sobre o desenvolvimento e características fisiológicas de plantas de milho, em duas condições de umidade do solo em casa de vegetação.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

BARONTI, S. et al. Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.). **European Journal of Agronomy**, v. 53, p. 38-44, 2014.

BATEY, T. Soil compaction and soil management—a review. **Soil use and management**, v. 25, n. 4, p. 335-345, 2009.

BEESLEY, Luke; MARMIROLI, Marta. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. **Environmental pollution**, v. 159, n. 2, p. 474-480, 2011.

CHEN, Tan et al. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. **Bioresource technology**, v. 164, p. 47-54, 2014.

DE ANDRADE, Cristiano Alberto et al. Mineralização e efeitos de biocarvão de cama de frango sobre a capacidade de troca catiônica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 5, p. 407-416, 2015.

GLASER, Bruno et al. The Terra Preta phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, n. 1, p. 37-41, 2001.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and tillage research**, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005.

LEHMANN, Johannes. A handful of carbon. **Nature**, v. 447, n. 7141, p. 143, 2007.

LEHMANN, Johannes; GAUNT, John; RONDON, Marco. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. **Mitigation and adaptation strategies for global change**, v. 11, n. 2, p. 403-427, 2006.

O'NEILL, B. et al. Bacterial community composition in Brazilian anthrosols and adjacent soils characterized using culturing and molecular identification. **Microbial ecology**, v. 58, n. 1, p. 23-35, 2009.

TRACY, S. R. et al. Soil compaction: a review of past and present techniques for investigating effects on root growth. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 91, n. 9, p. 1528-1537, 2011.

VAN DEN AKKER, J. J. H.; CANARACHE, A. Two European concerted actions on subsoil compaction. **Landnutzung und Landentwicklung**, v. 42, n. 1, p. 15-22, 2001.

VAN ZWIETEN, L. et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and soil**, v. 327, n. 1-2, p. 235-246, 2010.

3. ARTIGO 1

A QUALIDADE DO BIOCARVÃO NÃO É AFETADA PELO GÁS DE ARRASTE

RESUMO: No processo de produção do biocarvão ocorre decomposição térmica do material orgânico, em uma atmosfera com baixas concentrações de oxigênio e uso de um gás inerte para o arraste. Otimizar o processo de produção do biocarvão torna-se primordial para sua aplicação em larga escala. Para entender as mudanças que a atmosfera de nitrogênio provoca em biocarvões produzidos em diferentes temperaturas, é necessário estudar a evolução das propriedades físicas e químicas dos biocarvões produzidos em condições normais de atmosfera. Foram produzidos biocarvões em três temperaturas 350, 450 e 550 °C e duas condições de atmosfera: com o uso de N₂ como gás de arraste (CG) e sem o uso de gás de arraste (SG) em seguida foram determinados: composição química, rendimento, pH, condutividade elétrica (C.E), capacidade de troca catiônica (CTC), conteúdo elementar (C, H, N), umidade, cinzas, material volátil, grupos funcionais, densidade e a hidrofobicidade. Entre as características avaliadas o gás de arraste alterou a composição elementar do biocarvão, com aumento C e redução do O em todas as temperaturas. Houve também aumento do carbono fixo e redução dos voláteis e cinzas nos tratamentos que receberam gás de arraste. Em outras características os resultados foram inconclusivos em relação ao uso do gás de arraste. A temperatura de pirólise foi o fator que mais influenciou as características avaliadas no biocarvão.

Palavras- chave: Carvão vegetal; gás de arraste; pirólise

ABSTRACT: In the production process of the biochar, thermal decomposition of the organic material occurs in an atmosphere with low oxygen concentrations and use of an inert gas for the trailing. The optimization of the biochar production process becomes paramount for its large-scale application. In order to understand the changes that the atmosphere of nitrogen causes in biochars produced at different temperatures, it is necessary to study the evolution of the

physical and chemical properties of the biochars produced under normal atmospheric conditions. Biochars were produced at three temperatures: 350, 450 and 550 °C and two atmospheric conditions: with the use of N₂ as trailing gas (TG) and without the use of trailing gas (WG). After that, it was determined the chemical composition, yield, pH, electrical conductivity (E.C.), cation exchange capacity (CEC), elemental content (C, H, N), moisture, ashes, volatile material, functional groups, density and hydrophobicity. Among the characteristics evaluated, the trailing gas altered the elemental composition of the biochar as C increased and O decreased at all temperatures. A rise also occurred in fixed carbon and a reduction in volatiles and ash in treatments that received trailing gas. In other characteristics, the results were inconclusive in relation to the use of the trailing gas. The pyrolysis temperature was the factor that mostly influenced the characteristics evaluated in the biochar.

Keywords: Biochar; pyrolysis; trailing gas.

INTRODUÇÃO

O biocarvão é um material carbonáceo e altamente aromático, produzido pela pirólise da biomassa em um ambiente com limitação de oxigênio (Ahmad et al., 2014; Cantrell et al., 2012). Durante a pirólise também são gerados gases e bio-óleos (Cantrell et al., 2012; Sohi et al., 2010). Todos os três produtos podem ser usados para gerar energia renovável, mas o biocarvão por ser recalcitrante pode ser aplicado no solo (Lehmann et al., 2006). Devido a sua maior estabilidade, muitos estudos apontam o biocarvão como um método viável para reduzir as emissões de gases do efeito estufa e sequestrar o excesso de carbono da atmosfera (Herath et al., 2015; Lehmann et al., 2006).

Além dos benefícios para o solo, os biocarvões oferecem ainda alternativa para a redução do volume de resíduos orgânicos e conservação da matéria orgânica nos solos tropicais. Nesses solos, a agricultura enfrenta o desafio de evitar a rápida decomposição de matéria orgânica e o biocarvão pode ser um forte aliado.

O processo de pirólise consiste na decomposição térmica do material orgânico em atmosfera com baixas concentrações de oxigênio e uso de um gás

inerte para o arraste. O processo pode ser classificado em pirólise rápida ou lenta. Quando o objetivo é a produção de gás e óleo utiliza-se a pirólise rápida, pois a taxa de aquecimento rápido favorece a perda de massa e a maior liberação de gases e vapores condensáveis. O contrário é observado na pirólise lenta, com menor taxa de aquecimento e maiores tempos de permanência, o que favorece a transformação do material em produto sólido (Dutta et al., 2012). Segundo Amonette e Joseph (2009), as etapas da pirólise são definidas como acontecimentos paralelos e não etapas definidas: a primeira etapa ocorre entre 120 e 300 °C com saída de moléculas voláteis, moléculas com pequenas massas moleculares, decomposição das hemiceluloses e liberação da água. Na etapa seguinte, entre 300 e 600 °C, ocorre formação de alcatrão, metano, compostos fenólicos e quebra da holocelulose. Acima de 600°C ocorre à liberação de muitos elementos como nitrogênio, hidrogênio e oxigênio e concentra-se o carbono.

Quimicamente o biocarvão é constituído em boa parte por estruturas aromáticas, caracterizadas pela ligação em forma de anel benzênico de átomos de C com O ou H (Lehmann e Joseph, 2015), que são usadas para medir o grau de aromaticidade dos compostos (Hammes et al., 2006). As estruturas podem ser hidrofílicas, hidrofóbicas, com maior ou menor reatividade em função da eletronegatividade de grupos funcionais que se ligam ao C das estruturas aromáticas, tais como OH, NH₂, OR, ou O (C=O)R (Lehmann e Joseph, 2015). As cinzas são formadas por elementos minerais oriundos da matéria-prima que originou o biocarvão.

Entre os fatores que mais exercem influência nas propriedades físicas e químicas do biocarvão obtido na pirólise, destaca-se a temperatura do processo (Lehmann e Joseph, 2015; Novak et al., 2009), que influencia propriedades como o rendimento, pH, recalcitrância, área superficial específica, teor de cinzas e material volátil. Angin e Sensoz (2014) e Chen et al. (2014) observaram aumento nos teores de cinzas, carbono, pH e maior superfície específica com o aumento da temperatura de pirólise, devido o desprendimento de materiais voláteis e, conseqüentemente, menor rendimento e menor quantidade de voláteis.

No processo de pirólise, o N₂, He e outros gases inertes ou o CO₂ são geralmente usados como gás de arraste (Zhu et al., 2018). Esses gases são

usados com o objetivo de arrastar o ar atmosférico, inicialmente contido no reator, além dos gases voláteis gerados durante a pirólise. Segundo Weber e Quicker (2018), os compostos voláteis podem formar gases permanentes (como CO₂, CO, CH₄ e H₂) ou compostos orgânicos condensáveis (por exemplo, metanol e ácido acético). Estudos mostram que atmosfera de CO₂ pode inibir a volatilização e a decomposição de estruturas contendo carbono, com aumento do C elementar dos biocarvões (Zhu et al., 2018; Cho et al., 2017).

Entretanto, ao considerar as doses elevadas de biocarvão geralmente aplicadas no solo, o uso desses gases de arraste poderia onerar o processo e como consequência o biocarvão. Uma alternativa, seria a produção de biocarvão sem o uso do gás de arraste, mas que poderia provocar mudanças nas características físicas e químicas do biocarvão, como rendimento, porosidade, material volátil, cinzas e o conteúdo elementar.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do gás de arraste e da temperatura sobre as características químicas e físicas de biocarvão produzido de cascas de *Eucalyptus* spp.

MATERIAL E MÉTODOS

Como matéria-prima foram utilizadas cascas de *Eucalyptus* spp., coletadas em uma empresa florestal do município de Alegre – ES. As cascas foram secas em estufa a 105 °C até massa constante. Os biocarvões foram produzidos pelo processo de pirólise lenta em reator de pirólise SPPT – V60, na Universidade Federal do Espírito Santo. Foram produzidos biocarvões em três temperaturas 350, 450 e 550 °C e duas condições de atmosfera: com o uso de N₂ como gás de arraste (CG) e sem o uso de gás de arraste (SG). Os tratamentos CG receberam N₂ no sistema com antecedência de 10 min antes do aquecimento e após 15 min de ter atingido o tempo de permanência, com fluxo de 200 mL min⁻¹. O procedimento de pirólise teve taxa média de aquecimento de 4 °C min⁻¹ até atingir a temperatura desejada. A temperatura desejada foi mantida constante por 60 min, quando então o reator foi desligado.

O biocarvão permaneceu no reator por aproximadamente 12 h, tempo necessário para o resfriamento, sendo então recolhido e pesado para

determinar o rendimento. O rendimento de biocarvão foi calculado como a razão entre a massa de biocarvão obtida e a massa de casca de eucalipto colocada no reator.

A caracterização do biocarvão foi realizada nos laboratórios do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. Todo o biocarvão foi moído por moinho tipo Willey até granulometria menor que 0,5 mm e os ensaios de caracterização foram realizados com 4 repetições.

A determinação da composição química dos biocarvões foi realizada seguindo Enders et al., 2012. Em resumo, 0,2 g de amostra foi adicionado em erlenmeyer de 125 mL e mantidos na mufla por 8 h a 500 °C. Posteriormente, 5,0 mL de HNO₃ foram colocadas em cada amostra e então realizado o aquecimento com auxílio de chapa até a temperatura de 120 °C, com o objetivo de secar a amostra. Após o secagem, as amostras foram retiradas da chapa e aguardado o tempo necessário para o esfriar até a temperatura ambiente, para então adicionar 1 mL de HNO₃ e 4,0 mL de solução de H₂O₂ 30%, novamente foi realizado o aquecimento, secagem e esfriamento, seguido da adição de 20 mL de solução de HNO₃ 5% em cada amostra. A leitura da concentração de Al, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P, S, Ti e Zn pela técnica da espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

Também foi determinado a composição química dos biocarvões usando água deionizada como extrator, de acordo com Prakongkep et al. (2015). Pesou-se 0,3 g de biocarvão em frasco plástico e adicionou-se 10 mL de água deionizada. A mistura foi agitada à 60 rpm por 12 h, quando foi filtrado em papel de filtragem lenta e determinada as concentrações de P, K, Mg, Ca, S e Na pela técnica da espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

O pH e a condutividade elétrica (C.E) foram determinadas segundo (Rajkovich et al., 2012). Pesou-se 1 g de biocarvão e adicionaram-se 20 mL de água deionizado. A mistura foi agitada em mesa horizontal à 60 rpm por 1,5 h para a determinação do pH. A determinação da C.E. ocorreu após 12 h de repouso da mistura.

A capacidade de troca catiônica dos biocarvões foi determinada pelo método de extração com NH₄OAC 1 mol L⁻¹ (Hendershot et al., 2008). Em um tubo centrífuga de 50 mL foram adicionados 0,5 g de biocarvão e 40 mL de

solução de NH_4OAC 1 mol L^{-1} , em seguida foi realizada a agitação a 60 rpm por 20 min. Posteriormente cada amostra foi filtrada em membrana de éster de celulose ($0,45 \mu\text{m}$) sob vácuo. O biocarvão retido na membrana foi lavado com duas porções de 20 mL de solução de NH_4OAC 1 mol L^{-1} e três porções de 30 mL de isopropanol. Uma outra lavagem foi realizada com quatro porções de 50 mL de solução de KCl 1 mol L^{-1} . A solução de KCl resultante da lavagem do biocarvão foi transferida para um balão volumétrico de 250 mL e completado o volume com água destilada, seguido da determinação de NH_4^+ por fotolorimetria.

Para a quantificação do conteúdo elementar C, N e H o biocarvão original após a pirólise foi previamente triturado em almofariz de ágata e passado em peneira de malha $0,149 \text{ mm}$, sendo seco em estufa à $60 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h, para a remoção da umidade residual. Na sequência, aproximadamente $0,0050 \text{ g}$ foi encaminhado ao analisador elementar Perkin Elmer II 2400 série CHNS e as porcentagens de C, N e H foram determinadas, a porcentagem. O teor de oxigênio foi determinado como a diferença entre todos os teores obtidos e 100%.

Na análise imediata foram determinados umidade, cinzas, material volátil e cinzas, segundo ASTM D1762. Aproximadamente 1 g de biocarvão foi adicionado à cadinhos de porcelana de massa conhecida, que foram conduzidos para a mufla previamente aquecida a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h. Em seguida as amostras foram inseridas no dessecador e posteriormente determinada em balança analítica a massa, e então determinada a umidade. Para a determinação dos voláteis, amostras de biocarvão foram colocadas na mufla pré-aquecida à $950 \text{ }^\circ\text{C}$ por 10 minutos, em seguida conduzidas para o dessecador e pesadas. Para a determinação das cinzas, as amostras após serem pesadas foram colocadas na mufla por um período de 6 h sob temperatura de $750 \text{ }^\circ\text{C}$. Com os teores dos voláteis, cinzas e umidade foi realizado o cálculo do carbono fixo segundo ASTM D3172.

Para a identificação dos grupos funcionais foi usado a análise espectroscópica através do espectrômetro de absorção molecular na região do infravermelho com transformada de Fourier, com acessório de reflectância total atenuada (FTIR/ATR). Utilizou-se um espectrofotômetro Jasco FTIR 4100. Os espectros foram obtidos na região de $4000 \text{ a } 400 \text{ cm}^{-1}$.

Na caracterização física dos biocarvões foram determinadas a densidade através da ASTM D2854; a umidade presente entre os potenciais -10 kPa e -1500 kPa (AD), inicialmente foi pulverizado álcool etílico 96 °GL em cada amostra e depois saturada com água por 24 h. Também foi realizada a classificação da hidrofobicidade (Bisdorn et al., 1993) em função do tempo de penetração da gota de água (WDPT), considerando o tempo médio de penetração de 5 a 15 gotas de água destilada (Doerr, 1998).

Os resultados foram submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, através do SISVAR® 51 (Ferreira, 1988).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os dados referentes a caracterização química dos biocarvões produzidos na presença e na ausência de gás de arraste e em diferentes temperaturas, usando HNO₃ como extrator. O uso do gás de arraste aumentou o teor de K na temperatura de 350 °C, de Mg e Mn na temperatura de 550 °C e de Zn na temperatura de 450 °C. Entretanto, o uso do gás de arraste reduziu os teores de Ca e S em todas as temperaturas; de Mg, Na, Mn na temperatura de 350 °C e de Fe na temperatura de 450 °C. Observa-se que os dados médios não apresentaram um padrão claro, que possa expressar a atuação na redução ou no aumento dos elementos estudados, em função do uso do gás de arraste.

Em relação ao aumento da temperatura de pirólise, os teores de P, K, Mg, Ca, S, Zn, Cu e Mn foram significativamente maiores. Os teores de Na e Fe, quando significativos, também apresentaram aumento nos teores com o aumento da temperatura. Resultados semelhantes foram encontrados por Enders et al., 2012 em trabalho com madeira de carvalho e pinheiro e Melo et al., 2013 com palha de cana-de-açúcar.

Na Tabela 2 são apresentados os dados referentes a caracterização química dos biocarvões produzidos na presença e na ausência de gás de arraste e em diferentes temperaturas, usando água como extrator. O uso do gás de arraste proporcionou aumento nos teores K; nos teores de P do biocarvão produzido em 350 °C; nos teores Mg do biocarvão produzido em 550

°C e nos teores Ca do biocarvão produzido em 450 °C. Porém, também é observado redução dos teores de P no biocarvão produzido em 550 °C e de Mg nos biocarvões produzidos nas temperaturas de 350 e 450 °C. Assim como mencionado anteriormente, o efeito do gás de arraste sobre as características químicas dos biocarvões não apresentaram um padrão claro.

Em relação ao efeito da temperatura (Tabela 2), observa-se que o aumento de temperatura de 350 °C para 450 °C proporcionou redução significativa nos teores de P e Mg. Enquanto o aumento da temperatura aumentou os teores de K e Na. Os teores de S e Ca são estatisticamente iguais nas três temperaturas avaliadas. A água conseguiu extrair apenas os elementos que estavam facilmente disponíveis, por não apresentarem função estrutural na planta, como o K. Entretanto, para os elementos que apresentam função estrutural na planta, o processo de pirólise pode ter criado uma barreira física entre o extrator e o elemento a ser extraído. Os resultados encontrados usando água como extrator, podem fazer uma alusão do comportamento que o biocarvão de cascas de *Eucalyptus* spp teria em contato com o solo, na disponibilidade de nutrientes. A água é considerada como um extrator universal, cuja composição do extrato é uma excelente indicação da presença de elementos altamente solúveis e prontamente disponíveis às plantas (Vale e Alcarde, 1999).

Tabela 1. Médias dos teores totais ou extraídos por HNO₃ de P, K, Mg, Ca, S, Na, Zn, Cu, Fe e Mn dos biocarvões produzidos em presença (CG) e ausência de gás (SG) de arraste e diferentes temperaturas

	P		K		Mg g kg ⁻¹		Ca		S	
	CG	SG	CG	SG	CG	SG	CG	SG	CG	SG
350 °C	1,14 Ac	1,13 Ac	4,68 Ac	3,79 Bc	4,64 Bc	4,92 Ac	24,15 Bc	26,10 Ac	0,75 Bc	0,83 Ac
450 °C	1,43 Ab	1,41 Ab	8,17 Ab	8,18 Ab	6,46 Ab	6,41 Ab	33,16 Bb	35,56 Ab	0,97 Bb	1,03 Ab
550 °C	1,54 Aa	1,54 Aa	9,85 Aa	9,61 Aa	7,22 Aa	6,94 Ba	39,14 Ba	41,37 Aa	1,11 Ba	1,22 Aa
	Na		Zn		Cu g kg ⁻¹		Fe		Mn	
	CG	SG	CG	SG	CG	SG	CG	SG	CG	SG
350 °C	6,33 Bb	7,04 Ab	0,013 Ab	0,013 Ab	0,0071 Ac	0,0068 Ac	1,05 Ab	0,88 Ab	0,73 Bc	0,88 Ac
450 °C	7,48 Aa	7,18 Ab	0,018 Aa	0,016 Bb	0,0087 Ab	0,0083 Ab	1,12 Bb	1,54 Aa	1,08 Ab	1,04 Ab
550 °C	7,58 Aa	7,68 Aa	0,02 Aa	0,02 Aa	0,0091 Aa	0,0093 Aa	1,58 Aa	1,58 Aa	1,29 Aa	1,18 Ba

Letras maiúsculas na horizontal comparam médias dos tratamentos com CG e SG e minúsculas na vertical comparam os tratamentos nas diferentes temperaturas. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Tabela 2. Médias dos teores extraídos por H₂O de P, K, Mg, Ca e Na dos biocarvões produzidos em presença (CG) e ausência de gás (SG) de arraste e diferentes temperaturas

	P		K g kg ⁻¹		Mg	
	CG	SG	CG	SG	CG	SG
350 °C	0,16 Aa	0,14 Ba	2,50 Ac	2,37 Bc	0,49 Ba	0,53 Aa
450 °C	0,024 Ab	0,020 Ab	3,08 Ab	2,87 Bb	0,27 Bb	0,28 Ab
550 °C	0,023 Bb	0,030 Ab	4,07 Aa	3,76 Ba	0,24 Ab	0,19 Bb
	Ca		S g kg ⁻¹		Na	
	CG	SG	CG	SG	CG	SG
350 °C	0,25 Aa	0,24 Aa	0,04 Aa	0,04 Aa	1,98 Ac	1,52 Ac
450 °C	0,25 Aa	0,21 Ba	0,05 Aa	0,05 Aa	2,26 Ab	2,28 Ab
550 °C	0,22 Aa	0,20 Aa	0,03 Aa	0,03 Aa	2,78 Aa	2,60 Aa

Letras maiúsculas na horizontal comparam médias dos tratamentos com CG e SG e minúsculas na vertical comparam os tratamentos nas diferentes temperaturas. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Na Figura 1 são apresentados os efeitos da presença e ausência de gás de arraste e da temperatura nas variáveis rendimento, pH, CTC e C.E dos biocarvões. O rendimento do biocarvão não apresentou diferença estatística com o uso do gás de arraste, contrários aos resultados encontrados por Zhu et al. (2018), que observaram que temperaturas abaixo de 300 °C, a atmosfera de arraste possui pouco efeito sobre o rendimento, entretanto na faixa de 300 – 600 °C o uso de N₂ como gás de arraste reduziria o rendimento quando comparado com o uso de CO₂. O rendimento dos biocarvões foi significativamente menor com o aumento da temperatura de pirólise. Com redução média de 16% do 350 °C para 450 °C e de 15% do 450 °C para o 550 °C. O rendimento do biocarvão diminui com o aumento da temperatura devido a decomposição térmica dos seus constituintes, como hemicelulose e celulose (Zhao et al., 2014; Chen et al., 2015; Suliman et al., 2016; Faloye et al., 2017).

Os valores de pH foram diferentes estatisticamente entre as diferentes temperaturas e em relação ao gás de arraste apenas na temperatura de 450 °C. Portanto, o pH dos biocarvões foi mais influenciado pela temperatura do que pelo uso do gás de arraste. A alcalinidade dos biocarvões deve-se a presença de grupos funcionais orgânicos de superfície, compostos orgânicos solúveis, carbonatos e outros alcalis inorgânicos como óxidos, hidróxidos, sulfatos, sulfetos e ortofosfatos (Fidel et al., 2017; Yang et al., 2018). A temperatura de pirólise é o fator que mais influencia no valor de pH dos biocarvões (Weber e Quicker, 2018), o aumento da temperatura, apesar de ser causa da perda de oxigênio, também é responsável pela formação de grupos oxigenados provenientes da degradação térmica da celulose (Lehmann e Joseph, 2015). Em relação ao pH, os biocarvões produzidos em maior temperatura poderiam mostrar-se mais vantajosos para serem aplicados no solo, quando comparado com produzido em menor temperatura (Li et al., 2018).

Os valores de CTC dos biocarvões não diferiram significativamente em relação a atmosfera saturada de N₂ apenas entre as diferentes temperaturas. A CTC pode ter sua origem no aumento da densidade de carga, na formação de grupos carboxila, nas estruturas porosa ou o efeito combinado dos três fatores (Liang et al., 2006). Os valores mais altos de CTC indicam maior capacidade

do biochar de conter nutrientes essenciais e quando aplicados no solo confere uma condição de maior resistência a acidificação (Mukherjee e Lal, 2013).

Os valores de C.E foram estatisticamente diferentes, em relação a atmosfera saturada de N₂, apenas na temperatura de 550 °C. Entretanto mostrou-se estatisticamente diferentes entre as diferentes temperaturas. O valor de C.E é dependente da quantidade de íons solúveis presentes nos biocarvões (Carrier et al., 2011). Observa-se na Tabela 2 que íons como K e Na concentraram com o aumento da temperatura. De fato, o biocarvão de madeira com o maior valor de C.E também contém o maior teor de K. A concentração de elementos com o aumento da temperatura, pode aumentar a C.E. (Vaughn et al., 2015). Resultados semelhantes foram observados em outros trabalhos (Song e Guo, 2012; Zhang et al., 2017).

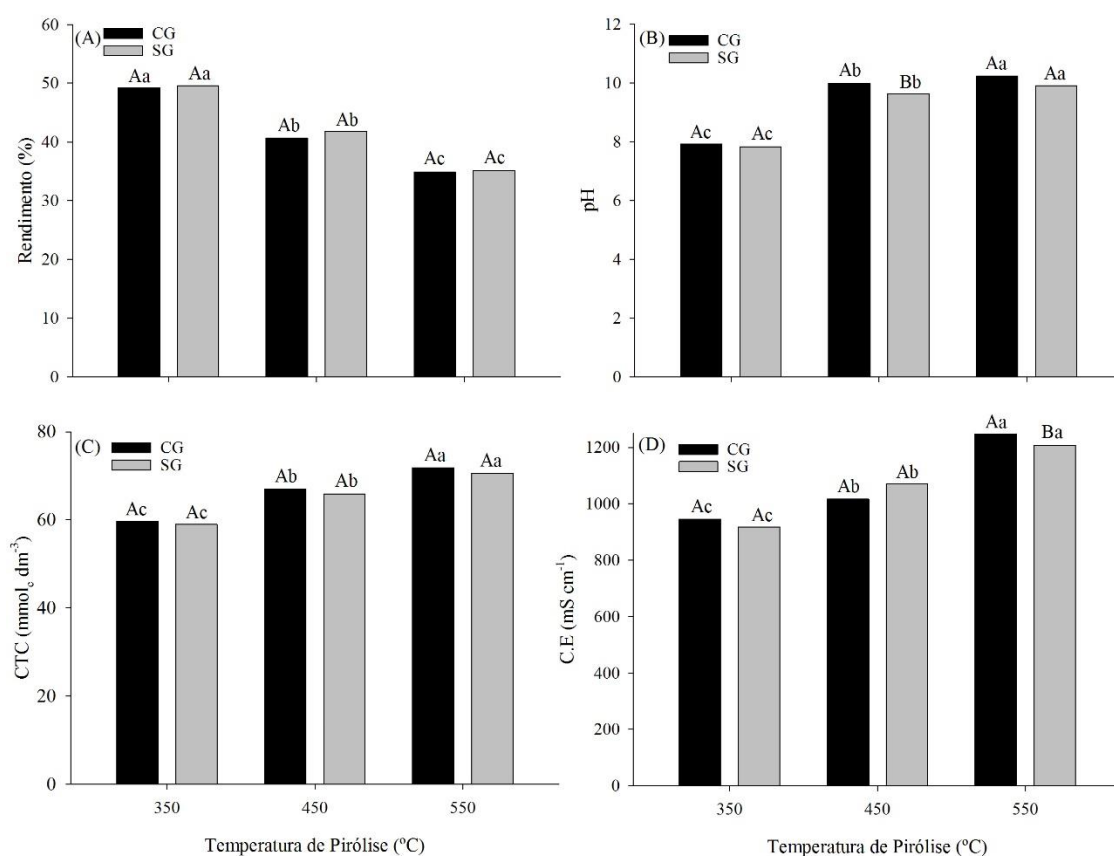


Figura 1. Médias do teor do rendimento, pH, CTC e C.E dos biocarvões produzidos em presença e ausência de gás de arraste e diferentes temperaturas. Barras com letra distintas diferem entre si ($p < 0,05$), as letras maiúsculas referem-se à comparação das médias entre a presença e ausência de gás de arraste; as letras minúsculas referem-se à comparação entre as diferentes temperaturas para cada tipo de gás de araste.

Na Figura 2 são apresentados o conteúdo elementar de C, N, H e O do biocarvão produzidos com gás de arraste e em diferentes temperaturas, além das relações C/N, H/C e O/C . Em relação ao uso do gás de arraste houve diferença estatística para o conteúdo de C e O nas três temperaturas estudadas, com aumento no conteúdo de C e redução do conteúdo O na presença de gás. Para o conteúdo de N houve diferença estatística apenas na temperatura de 550 °C, sendo maior na ausência de gás de arraste. Para as relações de C/N, a presença de gás de arraste provocou aumento da relação nas temperaturas de 350 e 450 °C, enquanto na relação H/C o aumento foi significativo apenas na temperatura de 350 °C. Na relação O/C o uso do gás de arraste provocou redução da relação nas três temperaturas avaliadas.

Em relação as diferentes temperaturas, o conteúdo de C e N aumentou e o de H e O diminuíram significativamente com o aumento da temperatura de pirólise. O aumento do conteúdo elementar de C pode ser atribuído ao aumento do grau de carbonização do biocarvão, enquanto a redução dos elementos O e H pode ser devido à quebra de ligações mais fracas nas estruturas do biocarvão (Zhu et al., 2018). À medida que temperatura de pirólise aumenta, além do aumento no teor de carbono elementar, a estrutura de carbono se transforma de anel amorfo a anel aromático, que são estruturas mais estáveis. A estabilidade do biocarvão é importante a partir do ponto em que ele é capaz de resistir a degradação física e microbiana, permitindo que ele persista no solo, resultando em um meio eficaz de sequestro de carbono.

Para as relações H/C e O/C foram significativamente menor com o aumento da temperatura. A relação H/C, uma aproximação da aromaticidade, diminuiu com o aumento da temperatura de pirólise (Kinney et al., 2012; Tag et al., 2016). As ligações entre C-O e C-H governam as estruturas aromáticas estáveis do biocarvão, sendo utilizadas para medir o grau de aromaticidade dos compostos (Braadbaat et al., 2004; Hammes et al., 2006).

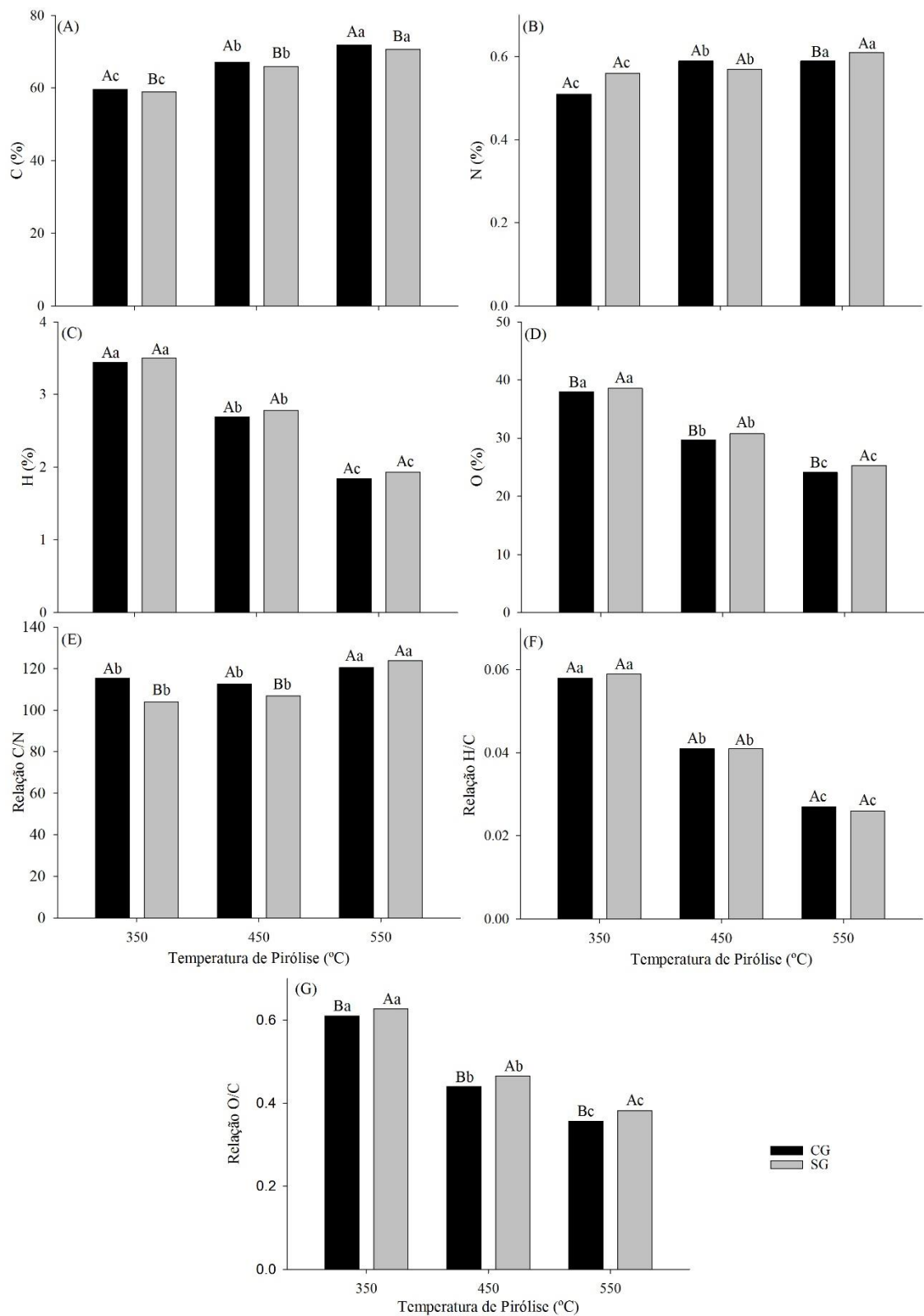


Figura 2. Médias do teor de C, N, H, O e das relações C/N, H/C e O/C dos biocarvões produzidos em presença e ausência de gás de arraste e diferentes temperaturas. Barras com letra distintas diferem entre si ($p < 0,05$), as letras maiúsculas referem-se à comparação das médias entre a presença e ausência

de gás de arraste; as letras minúsculas referem-se à comparação entre as diferentes temperaturas para cada tipo de gás de araste.

A Tabela 3 mostra as quantidades relativas de umidade, material volátil, teor de cinzas e carbono fixo, presentes nos diferentes tratamentos. Segundo Mitchell et al. (2013) através da análise imediata é possível separar componentes da biomassa como a umidade, material volátil, teor de cinzas e o carbono fixo formados durante o processo de transformação térmica. Acima de 120 °C os materiais sofrem modificações térmicas que envolvem a perda de umidade da estrutura do biocarvão Amonette e Joseph (2009). Em todos os tratamentos a umidade não atingiu valores superiores a 3,8% (Tabela 3).

O material volátil é a porção da matéria-prima que originou o biocarvão que é perdida durante o processo de pirólise, composta por matérias lábeis. Foi observado que na temperatura de 550 °C o uso do gás de arraste promoveu uma redução de 27,29% em relação ao tratamento que não foi usado o gás de arraste. O uso do gás de arraste favoreceu a retirada do material voláteis da estrutura do biocarvão. A medida em que a temperatura aumentou a proporção de material volátil também diminui, pois vão sendo facilmente liberados. A temperatura de pirólise nos tratamentos que receberam gás de arraste levaram a redução do material volátil de 43,20% de 350 °C para 450 e de 46,01% de 450 °C para 550 °C. No tratamento que não recebeu gás de arraste a redução foi estatisticamente diferente apenas na temperatura de 550 °C, as temperaturas de 350 °C e 450 °C mostraram uma redução média de 23,3% dos voláteis em relação a temperatura de 550 °C. Observa-se que o uso do gás de arraste condicionou a maior perda de voláteis em todas as temperaturas estudadas.

O teor de cinzas está relacionado com o conteúdo de nutrientes presentes na matéria-prima que originou o biocarvão. Essa parcela do material é determinada após a completa combustão do material, quando todos os elementos orgânicos foram volatilizados (Enders et al. 2012). O uso do gás de arraste reduziu significativamente o teor de cinzas nas temperaturas de 450 e 550 °C, redução de 28,72 e 6,73%, respectivamente. Em relação a temperatura de pirólise, nos tratamentos que receberam gás de arraste, a redução do teor de cinzas foi significativa em todas as temperaturas e nos tratamentos que não

receberam gás de arraste apenas na temperatura de 550 °C. Observa-se redução do teor de cinzas de 43,02% da temperatura de 350 °C para 450 °C e de 32,04% de 450 °C para a temperatura de 550 °C, nos biocarvões produzidos com gás de arraste. Nos biocarvões produzidos sem o uso de gás de arraste a redução do teor de cinzas no tratamento produzido em 350 °C em relação aos de 450 e 550 °C foi de 47,62%.

O C fixo é considerado a parte mais resistente do biocarvão que permaneceu após a pirólise, organizado em cadeias aromáticas que compõem os produtos da pirólise. A presença de gás de arraste nas temperaturas de 450 e 550 °C condicionaram um aumento significativo de 5,78 e 8,06% de C fixo em relação aos biocarvões produzidos sem o uso do gás de arraste. Em relação a temperatura, nos tratamentos com gás de arraste o incremento foi de 26,01% de 350 °C para 450 °C e de 10,13% de 450 °C para 550 °C enquanto os que foram produzidos na ausência do gás de arraste o aumento da temperatura aumentou o C fixo em 20,86% de 350 °C para 450 °C e de 8,74% de 450 °C para 550 °C. Observa-se que o gás de arraste promoveu um ganho maior de C fixo em todas as temperaturas.

Tabela 3: Médias da porcentagem de umidade, voláteis, cinzas e C fixo dos biocarvões produzidos em presença (CG) e ausência de gás (SG) de arraste e diferentes temperaturas

	Umidade		Material volátil	
	%			
	CG	SG	CG	SG
350 °C	3,77Aa	3,61Aa	38,26Aa	38,52Aa
450 °C	3,46Aa	3,63Aa	21,73Ab	21,02Ab
550 °C	3,03Aa	3,42Aa	11,72Bc	16,12Ac
	Cinzas		C Fixo	
	%			
	CG	SG	CG	SG
350 °C	7,34Ac	7,73Ab	50,61Aa	50,12Aa
450 °C	10,52Bb	14,76Aa	64,27Ab	60,58Bb
550 °C	13,58Ba	14,56Aa	71,66Ac	65,88Bc

Letras maiúsculas comparam médias na horizontal e minúsculas comparam médias na vertical. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

A evolução dos espectros de FT-IR de biocarvão em função do gás de arraste e da temperatura são apresentados na Figura 3. Nenhuma mudança química detectável ocorreu em função da presença de gás de arraste, portanto

foram apresentados apenas dados dos espectros de FT-IR referente ao tratamento com o uso do gás de arraste. Observa-se uma redução nas características espectrais do biocarvão com o aumento da temperatura, resultados semelhantes foram observados por Mandal et al. (2018). O aumento da temperatura de pirólise de 350 °C para 550 °C provocou o alongamento das vibrações (4000 – 3000 cm^{-1}) devido a desidratação durante o processo de pirólise. Esse intervalo é atribuído ao H de grupos OH da água, alcoóis, fenóis ou aminas, bem como H dos ácidos carboxílicos.

A vibração do alongamento C=C (1500 – 1600 cm^{-1}), foram observadas nos biocarvões produzidos na temperatura de 350 °C e 450 °C. Indicam a formação componentes aromáticos, corroborando com os trabalhos de (Li e Chen, 2018; Lee et al., 2010; Keiluweit et al., 2009). Esta vibração de alongamento desaparece nos biocarvões produzidos a 550 °C. Segundo Li e Chen (2018), a alta temperatura de pirólise é capaz de fornecer energia para romper as ligações duplas C=C, como observado nos biocarvões produzidos em 550°C. Os valores menores (1000 – 1400 cm^{-1}) indicam a presença de grupos funcionais oxigenados, associados a celulose, hemicelulose e lignina. Observa-se diminuição da intensidade das bandas (1300 e 1030 cm^{-1}), referentes estiramentos (C-O e C-O-C). Segundo Xu et al. (2013) a celulose e a hemicelulose podem ser identificadas pelo estiramento assimétrico C-O-C de grupos éteres próximos a 1100 cm^{-1} além da vibração de ligação C-H, e OH ambos próximos a 1335 cm^{-1} . Enquanto as bandas de 1400 cm^{-1} (C=O estiramento de carbonila), são comumente encontrados em grupos cetona, aldeído e éster proveniente da hemicelulose.

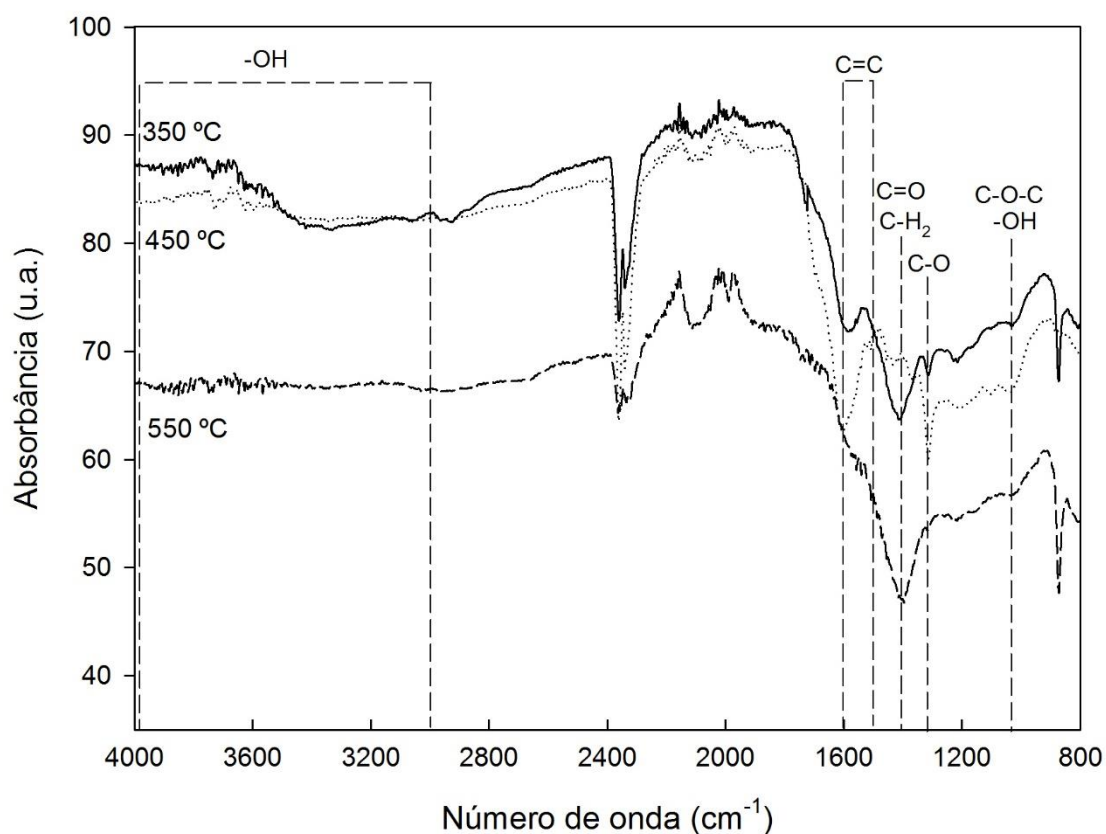


Figura 3. Espectro de FTIR dos biocarvões em função das diferentes temperaturas de pirólise.

Na Tabela 4 são apresentados os dados referentes a densidade aparente (D_a), capacidade de água disponível (CAD), tempo de penetração de gota de água (WDPT) e hidrofobicidade dos diferentes biocarvões. A D_a não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, conforme Tabela 5. Geralmente ocorre a diminuição da densidade, com o aumento da temperatura de pirólise até aproximadamente 1000 °C, quando a transformação térmica causa a coalescência da estrutura do biocarvão (Brown et al., 2006), e faz com que a densidade aumente em virtude da diminuição da porosidade do biocarvão. O uso do gás de arraste também poderia atuar no aumento da porosidade e em consequência diminuir a densidade, pois facilitaria o arraste dos compostos voláteis.

A capacidade de retenção de água dos biocarvões não apresentou diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 4). Esperava-se o aumento da CAD com o uso do gás de arraste e com aumento da temperatura, pois a capacidade de retenção de água depende da porosidade e da continuidade dos

poros. Podendo ser confirmado nos trabalhos de (Gray et al., 2013; Zhang e You, 2013).

O WDPT reduziu com o aumento da temperatura e a hidrofobicidade passou de severamente nas temperaturas de 350 e 450 °C para fortemente na temperatura de 550 °C, independente do uso do gás de arraste (Tabela 4). A hidrofobicidade dos biocarvões está associada a grupos funcionais alifáticos remanescentes. Estes são inativados a temperaturas entre 400 ° C e 500 ° C (Kinney et al., 2012). Isso explica porque o processo conhecido como torrefação (tipicamente até 300 ° C) converte uma biomassa hidrofílica em um carvão hidrofóbico, mas o aumento na temperatura superior a 500 ° C pode resultar na diminuição da hidrofobicidade. Porém o aumento da temperatura não é responsável pela formação de grupos polares, apenas inativa alguns grupos apolares, deixando o biocarvão menos hidrofóbico (Weber e Quicker, 2018).

Possivelmente nas condições do estudo, o uso do gás de arraste e a aumento da temperatura não foram o suficiente para criar mudanças na porosidade do biocarvão ao ponto de interferir nas características que estão relacionadas com a porosidade.

Tabela 4. Valores médios de densidade aparente (Da), capacidade de água disponível (CAD), tempo de penetração de gota de água (WDPT) e hidrofobicidade dos biocarvões produzidos em presença (CG) e ausência de gás (SG) de arraste e diferentes temperaturas.

	CG	SG	CG	SG
	Da (g cm ⁻³)		CAD (m ³ m ⁻³)	
350 °C	0,31 Aa	0,31 Aa	0,38 Aa	0,38 Aa
450 °C	0,31 Aa	0,32 Aa	0,41 Aa	0,39 Aa
550 °C	0,30 Aa	0,30 Aa	0,38 Aa	0,37 Aa
	CG	SG	CG	SG
	WDPT		Hidrofobicidade	
350 °C	900 s	900 s	Severamente hidrofóbico	Severamente hidrofóbico
450 °C	660 s	660 s	Severamente hidrofóbico	Severamente hidrofóbico
550 °C	180 s	180 s	Fortemente hidrofóbico	Fortemente hidrofóbico

Cada valor de Ds e CAD é a média de 3 repetições, enquanto que o WDPT é uma média de 5 - 15 gotas de água destilada. Letras maiúsculas na horizontal comparam médias dos tratamentos com CG e SG na e minúsculas na vertical comparam os tratamentos nas diferentes temperaturas. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

CONCLUSÕES

O gás de arraste alterou a composição elementar do biocarvão, voláteis, carbono fixo e cinzas, porém não foi o suficiente para proporcionar mudanças conclusivas em outras características avaliadas.

A temperatura de pirólise foi o fator que mais influenciou as características avaliadas no biocarvão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

AHMAD, Mahtab et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19-33, 2014.

AMONETTE, James E.; JOSEPH, Stephen. Characteristics of biochar: microchemical properties. **Biochar for environmental management: Science and technology**, v. 33, 2009.

ANGIN, Dilek; ŞENSÖZ, Sevgi. Effect of pyrolysis temperature on chemical and surface properties of biochar of rapeseed (*Brassica napus* L.). **International Journal of phytoremediation**, v. 16, n. 7-8, p. 684-693, 2014.

ASTM D1762 - 13. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. [Online] Available at: www.astm.org [Accessed 20 August 2016]

ASTM D3172, 13 - 2013. Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. [Online] Available at: www.astm.org [Accessed 20 August 2016]

ASTM D2854 - 09. Standard test method for apparent density of activated carbon [Online] Available at: www.astm.org [Accessed 20 August 2016]

BALDOCK, Jeffrey A.; SMERNIK, Ronald J. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. **Organic Geochemistry**, v. 33, n. 9, p. 1093-1109, 2002.

BISDOM, E. B. A.; DEKKER, L. W.; SCHOUTE, JF Th. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. In: Workshop on Methods of Research on Soil Structure/Soil Biota Interrelationships. **Geoderma**, p. 105-118, 1993

BRAADBAART, Freek et al. Laboratory simulations of the transformation of

peas as a result of heat treatment: changes of the physical and chemical properties. **Journal of Archaeological Science**, v. 31, n. 6, p. 821-833, 2004.

BROWN, Roberta A. et al. Production and characterization of synthetic wood chars for use as surrogates for natural sorbents. **Organic Geochemistry**, v. 37, n. 3, p. 321-333, 2006.

CANTRELL, Keri B. et al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. **Bioresource technology**, v. 107, p. 419-428, 2012.

CARRIER, Marion et al. Comparison of slow and vacuum pyrolysis of sugar cane bagasse. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 90, n. 1, p. 18-26, 2011.

CHEN, Dengyu et al. Bamboo pyrolysis using TG–FTIR and a lab-scale reactor: Analysis of pyrolysis behavior, product properties, and carbon and energy yields. **Fuel**, v. 148, p. 79-86, 2015.

CHEN, Tan et al. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. **Bioresource technology**, v. 164, p. 47-54, 2014.

CHO, Dong-Wan et al. Simultaneous production of syngas and magnetic biochar via pyrolysis of paper mill sludge using CO₂ as reaction medium. **Energy conversion and management**, v. 145, p. 1-9, 2017.

DOERR, Stefan H. On standardizing the ‘water drop penetration time’ and the ‘molarity of an ethanol droplet’ techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils. **Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group**, v. 23, n. 7, p. 663-668, 1998.

DUTTA, B.; RAGHAVAN, G. S. V.; NGADI, M. Surface characterization and classification of slow and fast pyrolyzed biochar using novel methods of pycnometry and hyperspectral imaging. **Journal of wood chemistry and technology**, v. 32, n. 2, p. 105-120, 2012.

ENDERS, Akio et al. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. **Bioresource technology**, v. 114, p. 644-653, 2012.

FERREIRA, D. F. Sisvar - sistema de análise de variância para dados balanceados. Lavras: UFLA, 1998. 19 p.

FALOYE, O. T. et al. Synergistic effects of biochar and inorganic fertiliser on

maize (*zea mays*) yield in an alfisol under drip irrigation. **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 214-220, 2017.

FIDEL, Rivka B. et al. Characterization and quantification of biochar alkalinity. **Chemosphere**, v. 167, p. 367-373, 2017.

GRAY, Myles et al. Water uptake in biochars: the roles of porosity and hydrophobicity. **Biomass and Bioenergy**, v. 61, p. 196-205, 2014.

HENDERSHOT WH, Lalande H, Duquette M. Ion exchange and exchangeable cations, in: M.R. Carter, E.G. Gregorich (Eds.), **Soil Sampling and Methods of Analysis**, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2008, pp. 197–206

HAMMES, Karen et al. Synthesis and characterisation of laboratory-charred grass straw (*Oryza sativa*) and chestnut wood (*Castanea sativa*) as reference materials for black carbon quantification. **Organic Geochemistry**, v. 37, n. 11, p. 1629-1633, 2006.

HERATH, H. M. S. K. et al. Experimental evidence for sequestering C with biochar by avoidance of CO₂ emissions from original feedstock and protection of native soil organic matter. **Gcb Bioenergy**, v. 7, n. 3, p. 512-526, 2015

KEILUWEIT, Marco et al. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). **Environmental science & technology**, v. 44, n. 4, p. 1247-1253, 2010.

KINNEY, T. J. et al. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. **Biomass and Bioenergy**, v. 41, p. 34-43, 2012.

LEE, James W. et al. Characterization of biochars produced from cornstovers for soil amendment. **Environmental science & technology**, v. 44, n. 20, p. 7970-7974, 2010.

LEHMANN, Johannes; GAUNT, John; RONDON, Marco. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. **Mitigation and adaptation strategies for global change**, v. 11, n. 2, p. 403-427, 2006.

LEHMANN, Johannes; JOSEPH, Stephen (Ed.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. Routledge, 2015.

LI, Simeng et al. Nitrogen retention of biochar derived from different feedstocks at variable pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 133, p. 136-146, 2018.

LI, Simeng; CHEN, Gang. Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis

temperatures. **Waste Management**, v. 78, p. 198-207, 2018.

LIANG, B. et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1719-1730, 2006.

MANDAL, Sanchita et al. The effect of biochar feedstock, pyrolysis temperature, and application rate on the reduction of ammonia volatilisation from biochar-amended soil. **Science of The Total Environment**, v. 627, p. 942-950, 2018.

MELO, Leônidas CA et al. Influence of pyrolysis temperature on cadmium and zinc sorption capacity of sugar cane straw-derived biochar. **BioResources**, v. 8, n. 4, p. 4992-5004, 2013.

MITCHELL, Perry J.; DALLEY, Travis SL; HELLEUR, Robert J. Preliminary laboratory production and characterization of biochars from lignocellulosic municipal waste. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 99, p. 71-78, 2013.

MUKHERJEE, Atanu; LAL, Rattan. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. **Agronomy**, v. 3, n. 2, p. 313-339, 2013.

NOVAK, Jeffrey M. et al. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. **Annals of Environmental Science**, 2009.

PRAKONGKEP, Nattaporn; GILKES, Robert John; WIRIYAKITNATEEKUL, Wanpen. Forms and solubility of plant nutrient elements in tropical plant waste biochars. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 178, n. 5, p. 732-740, 2015.

RAJKOVICH, Shelby et al. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 48, n. 3, p. 271-284, 2012.

SOHI, S. P[†] et al. A review of biochar and its use and function in soil. In: **Advances in agronomy**. Academic Press, 2010. p. 47-82.

SONG, Weiping; GUO, Mingxin. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 94, p. 138-145, 2012.

SULIMAN, Waled et al. Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. **Biomass and Bioenergy**, v. 84, p. 37-48, 2016.

TAG, Asli Toptas et al. Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 120, p. 200-206, 2016.

VALE, F.; ALCARDE, J. C. Solubilidade e disponibilidade dos micronutrientes em fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, 1999.

VAUGHN, Steven F. et al. Physical and chemical characterization of biochars produced from coppiced wood of thirteen tree species for use in horticultural substrates. **Industrial crops and products**, v. 66, p. 44-51, 2015.

XU, Feng et al. Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: a mini-review. **Applied Energy**, v. 104, p. 801-809, 2013.

WEBER, Kathrin; QUICKER, Peter. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240-261, 2018.

YANG, Yan et al. Effect of minerals on the stability of biochar. **Chemosphere**, v. 204, p. 310-317, 2018.

ZHAO, Mary Yiyue; ENDERS, Akio; LEHMANN, Johannes. Short-and long-term flammability of biochars. **Biomass and Bioenergy**, v. 69, p. 183-191, 2014.

ZHANG, Hanzhi et al. Effect of feedstock and pyrolysis temperature on properties of biochar governing end use efficacy. **Biomass and Bioenergy**, v. 105, p. 136-146, 2017.

ZHANG, Jun; YOU, Changfu. Water holding capacity and absorption properties of wood chars. **Energy & Fuels**, v. 27, n. 5, p. 2643-2648, 2013.

ZHU, Xiefei et al. Comparative study on the evolution of physicochemical characteristics of biochar produced from bio-oil distillation residue under different induction atmosphere. **Energy Conversion and Management**, v. 157, p. 288-293, 2018.

4. ARTIGO 2

RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO, CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS E DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS DE MILHO EM RESPOSTA À APLICAÇÃO DE DOSES DE BIOCARVÃO

RESUMO: Os estudos com a aplicação do biocarvão na agricultura são amplos, mas os efeitos são variáveis e dependem do tipo de planta, propriedades do biocarvão, dose de aplicação além das características do solo e condições ambientais. O presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação de diferentes doses de um biocarvão com duas granulometrias, sobre as características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa e sobre o desenvolvimento e as características fisiológicas de plantas de milho, em duas condições de umidade do solo. O ensaio foi conduzido em casa de vegetação, com duas granulometrias de biocarvão (2-0,5 e < 0,5 mm), seis doses de biocarvão (0, 5, 10, 20, 40 e 60 g kg⁻¹) e duas condições hídricas (com e sem restrição de água). Foram avaliados: altura, diâmetro do colmo, área foliar, matéria fresca e seca da parte aérea e seca da raiz das plantas, além do seu estado nutricional. Em condição de restrição hídrica, foram avaliados o teor relativo de água na folha, fotossíntese e a condutância estomática. No solo, foram avaliados: densidade, porosidade, curva de retenção, hidrofobicidade, além caracterização química. Estatisticamente não foram observadas diferenças entre as duas granulometrias do biocarvão, exceto densidade e a microporosidade do solo. A aplicação de biocarvão, proporcionou aumento em todas variáveis que relacionam crescimento e desenvolvimento da planta. Além de melhor condição nutricional das plantas. Nas condições hídricas adequadas, as plantas que receberam biocarvão apresentaram aumento na fotossíntese, condutância estomática e teor relativo de água na folha. No entanto, em condição de restrição hídrica, os tratamentos que não receberam biocarvão apresentaram acréscimo na fotossíntese, aumento da condutância estomática e teor relativo

de água na folha. No solo, o biocarvão aumentou a retenção de água e a relação microporos/macroporos e diminuiu a densidade, além da melhoria da fertilidade. Efeitos de granulometria foram presentes apenas quando o tamanho das partículas do biocarvão exerceu papel direto na variável avaliada, como é o caso da densidade do solo em granulometrias maiores e, da microporosidade em menores granulometrias. O incremento de doses crescentes de biocarvão melhorou as condições de fertilidade do solo e proporcionou melhor estado nutricional e desenvolvimento de plantas. Os ganhos de retenção de água promovidos pelo biocarvão não foram o suficientes para enfrentar problemas de restrição hídrica no solo.

Palavras-chave: biocarvão no solo, carvão vegetal, água no solo.

ABSTRACT: Studies using the application of biochar in agriculture are broad, but the effects are variable and depend on the type of plant, on the properties of the biochar, application rate in addition to soil characteristics and environmental conditions. The objective of this study was to evaluate the effect of the application of different doses of a biochar with two particle sizes on the physical and chemical characteristics of a sandy-loam Red-Yellow Latosol and on the development and physiological characteristics of corn plants, in two soil moisture conditions. The trial was conducted in a greenhouse, with two particle sizes of biochar (2-0.5 and <0.5 mm), six doses of biochar (0, 5, 10, 20, 40 and 60 g kg⁻¹) and two water conditions (with and without water restriction). Height, diameter of the stem, leaf area, fresh and dry matter of the aerial part and dry matter of the root of the plants, besides their nutritional status, were evaluated. In the water restriction condition, the relative leaf water content, photosynthesis and stomatal conductance were evaluated. In the soil, the following were evaluated: density, porosity, retention curve, hydrophobicity, and chemical characterization. Statistically, no differences were observed between the two particle sizes of the biochar, except density and soil microporosity. The application of biochar, provided an increase in all variables related to plant growth and development. In addition to better nutritional condition of plants. Under suitable water conditions, the plants that received biochar showed an increase in photosynthesis, stomatal conductance and relative water content in

the leaf. However, under water restriction conditions, the treatments that did not receive biochar showed an increase in photosynthesis, in the stomatal conductance and in the relative water content in the leaf. In the soil, biochar increased water retention and micropore/macropore ratio and decreased density, besides improving fertility. Effects of the particle size were present only when the particle size of the biochar had a direct role in the evaluated variable, such as soil density in larger particle sizes and microporosity in smaller particle sizes. The increment in the increasing doses of biochar improved the soil fertility conditions and provided better nutritional status and development for the plants. The water retention gains promoted by biochar were not enough to deal with issues of soil water restriction.

Keywords: Biochar in the soil, biochar, water in the soil.

INTRODUÇÃO

O biocarvão é obtido pelo processo de pirólise, que consiste na decomposição térmica da biomassa em atmosfera com baixas concentrações de oxigênio. Como resultado é gerado um composto de carbono orgânico predominantemente estável e recalcitrante (Lehmann, 2007; Borchard et al., 2014), características que tornam o biocarvão o centro de discussões acerca de sua potencialidade de servir como meio de sequestrar carbono no solo e reduzir as emissões de CO₂ para a atmosfera (Lehmann, 2007; Gaunt e Lehmann, 2008).

Resultados positivos da aplicação do biocarvão têm sido observados nas propriedades químicas do solo e no desenvolvimento das plantas (Jeffery et al., 2011; Biederman et al., 2013).

O biocarvão é composto principalmente por carbono organizado em anéis aromáticos condensados (Lehmann, 2007), o produto apresenta grande superfície por unidade de massa e grande densidade de carga (Liang et al., 2006). Quando aplicado em solos, atua como condicionador, melhorando as propriedades físicas e a eficiência do uso de nutrientes, com potencial de apresentar maior crescimento das plantas (Githinji, 2014).

A aplicação de carbono pirogênico no solo não é um conceito novo e tem sido usado para explicar a formação dos solos antropogênicos, como os denominados de Terra Preta de Índio, na bacia amazônica (Glaser et al., 2011). Os mesmos autores indicam que, nesses solos, grande parte da porção humificada da matéria orgânica tem origem na transformação de resíduos em carvão vegetal pelos antigos povos dessas regiões e que, por isto, a Terra Preta de Índio apresenta alta disponibilidade de nutrientes, maiores valores de pH e maior capacidade de retenção de água, quando comparados com os solos adjacentes.

As propriedades do biocarvão são altamente heterogêneas e dependem principalmente do tipo de matéria-prima e condições de pirólise, como temperatura e tempo de permanência (Lehmann e Joseph, 2015). A relação C/N do produto pode ser amplamente diferente, dependendo da matéria-prima utilizada (Major et al., 2010). Por sua vez, biocarvões produzidos sob maiores temperaturas de pirólise apresentam menor rendimento, maior área superficial específica, porosidade, pH e conteúdo de cinzas (Angin e Sensoz, 2014; Chen et al., 2014).

Além dos benefícios para o solo, os biocarvões oferecem ainda alternativa para a redução do volume de resíduos orgânicos e conservação da matéria orgânica nos solos tropicais. Nesses solos, a agricultura enfrenta o desafio de evitar a rápida decomposição de matéria orgânica e o biocarvão pode ser um forte aliado.

Limitação de disponibilidade de recursos hídricos e ocorrência de períodos de seca, acentuadas pelas mudanças climáticas, também são um desafio da agricultura moderna e que pode ser enfrentados ou minimizados com o uso do biocarvão. Nesse contexto, o biocarvão pode atuar na melhoria da aeração, retenção de água e condutividade hidráulica; redução da densidade do solo e ainda no incremento da disponibilidade de nutrientes, melhorando o potencial de crescimento das plantas (Glaser et al., 2002; Novak et al., 2009; Atkinson et al., 2010; Peake et al., 2014).

Por outro lado, estudos mostram que os benefícios da aplicação do biocarvão variam com a taxa de aplicação. Segundo Baronti et al. (2014) em condições de campo observaram aumento no teor de água disponível e no potencial de água na folha para plantas de uva em 3,3 e 45%, e em 24 e 37 %,

respectivamente, para a aplicação de 22 e 44 t ha⁻¹ de biocarvão. Os resultados também variam de acordo com a granulometria do biocarvão. Liu et al. (2016) avaliaram o efeito do biocarvão em misturas com areia e observaram que partículas de biocarvão menores do que as de areia promoveram maior redução na condutividade hidráulica saturada do que partículas maiores ou semelhante.

Efeitos da aplicação de biocarvão no desenvolvimento vegetal são variáveis e dependentes do tipo de planta, propriedades do biocarvão, processo de pirólise, taxa de aplicação, características do solo e condições ambientais, resultando em respostas principalmente positivas (Jeffery et al., 2011). Resultados positivos com a aplicação de biocarvão sobre o desenvolvimento de plantas foram obtidas por Faloye et al., 2017; Oram et al., 2014; Zheng et al., 2017. Entretanto, Borchard et al., 2014 observam redução da biomassa vegetal de plantas de milho, provavelmente como resultado de desequilíbrios nutricionais e imobilização de N provocado pela aplicação de biocarvão.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação de diferentes doses de um biocarvão com duas granulometrias, sobre as características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco arenosa e sobre o desenvolvimento e características fisiológicas de plantas de milho, em duas condições de umidade do solo em casa de vegetação.

MATERIAL E MÉTODOS

Produção do biocarvão

O biocarvão utilizado no ensaio foi produzido pelo processo de pirólise lenta a 350 °C, utilizando-se cascas de *Eucalyptus* spp. como matéria-prima. As cascas foram inicialmente secas em estufa a 105 °C até massa constante e, em seguida foram dispostas em reator de pirólise SPPT - V60. O procedimento de pirólise iniciou com taxa de aquecimento média de 5 °C min⁻¹ nos primeiros 40 min, seguido de leves incrementos de temperatura durante aproximadamente 50 min até atingir 350 °C. Essa temperatura foi mantida

constante por mais 60 min, quando então o reator foi desligado. O biocarvão permaneceu no reator por aproximadamente 12 h, tempo necessário para o resfriamento, sendo então recolhido e passado por moinho tipo Willey. O material moído foi passado por peneiras e separado em duas granulometrias: 2,0 - 0,5 mm e menor do que 0,5 mm.

Caracterização do biocarvão de duas granulometrias

Para a quantificação dos teores totais de C e N, o biocarvão original após a pirólise foi previamente triturado em almofariz de ágata e passado em peneira de malha 0,149 mm, sendo seco em estufa à 60 °C por 24 h, para a remoção da umidade residual. Na sequência, aproximadamente 0,0050 g foi encaminhado ao analisador elementar Perkin Elmer II 2400 série CHNS/O e as porcentagens de C e N foram determinadas.

Para as demais análises, amostras de biocarvão das duas granulometrias foram secas em estufa à 60 °C por 24 h, para a remoção da umidade residual.

O pH foi determinado por potenciometria na relação biocarvão-água de 1:5 após 12 h de agitação (Prakongkep et al., 2015) á 60 rpm.

A determinação da composição química dos biocarvões foi realizada segundo Enders et al., (2012). Em resumo, 0,2 g de amostra foi adicionado em erlenmeyer de 125 ml e mantidos na mufla por 8 h a 500 °C. Posteriormente, 5,0 mL de HNO₃ foram colocadas em cada amostra e então realizado o aquecimento com auxílio de chapa até a temperatura de 120 °C, com o objetivo de secar a amostra. Após a secagem, as amostras foram retiradas da chapa e aguardou-se o tempo necessário para o esfriamento até a temperatura ambiente, para então adicionar 1 mL de HNO₃ e 4,0 mL de solução de H₂O₂ 30% v/v, novamente foi realizado o aquecimento, secagem e esfriamento, seguido da adição de 20 ml de solução de HNO₃ 5% v/v em cada amostra. A leitura da concentração de Al, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P, S, Ti e Zn pela técnica da espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

A capacidade de troca catiônica dos biocarvões foi determinada pelo método de extração com NH_4OAC 1 mol L^{-1} (Herdershot et al., 2008). Em um tubo centrífuga de 50 ml foram adicionados 0,5 g de biocarvão e 40 mL de solução de NH_4OAC 1 mol L^{-1} , em seguida foi realizada a agitação a 60 rpm por 20 min. Posteriormente, cada amostra foi filtrada em membrana de éster de celulose ($0,45 \mu\text{m}$), sob vácuo. O biocarvão retido na membrana foi lavado com duas porções de 20 mL de solução de NH_4OAC 1 mol L^{-1} e três porções de 30 ml de isopropanol. Uma outra lavagem foi realizada com quatro porções de 50 ml de solução de KCl 1 mol L^{-1} . A solução de KCl resultado da lavagem do biocarvão foi transferida para um balão volumétrico de 250 mL e completado o volume com água destilada, seguido da determinação de NH_4^+ por fotolorimetria.

Na caracterização física dos biocarvões foram determinadas a densidade pelo método da proveta (Embrapa, 2011); a umidade presente entre os potenciais -10 kPa e - 1500 kPa (AD) após saturação das amostras por 24 h e a classificação da hidrofobicidade (Bisdorn et al. 1993) em função do tempo de penetração da gota de água (WDPT), considerando o tempo médio de penetração de 5 a 15 gotas de água destilada (Doerr, 1998).

Todas as análises foram realizadas em triplicata e os resultados da caracterização do biocarvão são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Caracterização química e física de biocarvão de casca de eucalipto utilizados no presente estudo. Cada valor representa a média de três repetições e estão seguidos do desvio padrão

	Biocarvão 2,0 – 0,5 mm	Biocarvão < 0,5 mm
C (%)	59,62 ± 0,05	
N (%)	0,52 ± 0,01	
C/N (%)	115,42 ± 1,28	
pH	7,35 ± 0,01	7,83 ± 0,27
Al (g kg^{-1})	1,68 ± 0,22	1,82 ± 0,127
Ca (g kg^{-1})	23,89 ± 1,08	26,10 ± 0,71
Cu (g kg^{-1})	0,01 ± 0,001	0,01 ± 0,001
Mn (g kg^{-1})	0,78 ± 0,05	0,88 ± 0,02
P (g kg^{-1})	1,05 ± 0,07	1,13 ± 0,02
S (g kg^{-1})	0,77 ± 0,04	0,83 ± 0,03
Zn (g kg^{-1})	0,08 ± 0,001	0,13 ± 0,001

Fe (g kg ⁻¹)	1,56 ± 0,10	0,88 ± 0,08
K (g kg ⁻¹)	3,79 ± 0,38	3,79 ± 0,38
Mg (g kg ⁻¹)	4,49 ± 0,14	4,93 ± 0,11
CTC (mmol _c kg ⁻¹)	281,80 ± 2,88	156,50 ± 1,08
D (g dm ⁻³)	0,29 ± 0,001	0,40 ± 0,01
AD (g g ⁻¹)	0,55 ± 0,01	0,40 ± 0,02
WDPT	Severamente hidrofóbico	Severamente hidrofóbico

CTC = capacidade de troca catiônica; D = densidade; AD = umidade em base gravimétrica entre -10 kPa e -1500 kPa e WDPT = classificação da hidrofobicidade.

Preparo das misturas de solo e biocarvão

Na condução do ensaio foram usadas amostras de horizonte B de Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco-arenosa, com 22% de areia grossa, 57% de areia fina, 2% de silte e 19% de argila. O solo foi inicialmente passado em peneira de 4 mm de malha e separado em sacos plásticos contendo 6,4 dm³ de solo cada. As misturas foram então preparadas a partir da adição de duas granulometrias (2,0 - 0,5 e < 0,5 mm) aplicadas em seis doses de biocarvão (0, 5, 10, 20, 40 e 60 g kg⁻¹). A caracterização química foi realizada pelo Laboratório de Rotina de Fertilidade do Solo do Departamento de Solos (Quadro 2).

Quadro 2. Caracterização química do solo antes do plantio, considerando a granulometria e doses de biocarvão aplicadas

Dose g kg ⁻¹	pH	P mg dm ⁻³	K mg dm ⁻³	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Al ³⁺ cmol _c dm ⁻³	H + Al cmol _c dm ⁻³	COrg ^{2/} dag kg ⁻¹
Biocarvão 2,0 – 0,5 mm								
0	5,24	ND ^{1/}	18	0,35	0,06	0	3,60	0,15
5	5,21	ND	16	0,34	0,06	0	2,60	0,23
10	5,23	0,30	55	0,44	0,09	0	1,80	0,23
20	5,02	1,60	81	0,48	0,12	0	3,50	0,38
40	5,24	2,40	132	0,78	0,26	0	3,00	0,38
60	5,56	7,10	223	1,17	0,44	0	3,80	1,13
Biocarvão < 0,5 mm								
0	5,24	0	18	0,35	0,06	0	3,60	0,23
5	5,21	0,30	38	0,66	0,09	0	2,80	0,30
10	5,92	1,10	91	1,02	0,18	0	2,80	0,38
20	6,03	2,90	139	1,14	0,27	0	2,60	0,75
40	6,35	5,50	213	1,23	0,53	0	2,50	1,05
60	6,47	10,90	263	1,28	0,67	0	2,30	1,80

ND^{1/}: valor não detectado; COrg^{2/}: carbono orgânico. pH em água relação 1:2,5; P, K extrator Mehlich-1; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ extrator KCl 1 mol/L; H + Al extrator acetato de cálcio 0,5 mol/L; - pH 7,0; COrg Walkley-Black.

Montagem do ensaio

O ensaio foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG (20° 45' 14" S, 42° 52' 55" W), município com temperatura média anual de 23,6 °C. Em janeiro de 2017 o ensaio foi montado e conduzido por 67 dias. A planta teste foi o híbrido simples de milho LG 6033 PRO2. Cada unidade experimental foi composta por um vaso plástico de 7 dm³ preenchido com as misturas solo + biocarvão, dispostos em esquema fatorial 2 x 6 x 2, sendo duas granulometrias de biocarvão (2-0,5 e < 0,5 mm), seis doses de biocarvão (0, 5, 10, 20, 40 e 60 g kg⁻¹) e duas condições hídricas (com e sem restrição de água), no delineamento em blocos casualizados com três repetições, totalizando 72 unidades experimentais.

Quatro sementes foram semeadas por vaso na profundidade média de 4 cm. O desbaste foi efetuado 8 d após a emergência, deixando-se duas plantas por vaso. A fertilização via solução nutritiva consistiu do fornecimento de N, K, P, S, B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn, nas doses de: 100; 150; 200; 50; 1; 1,33; 1,55; 3,66; 0,15 e 4 mg dm⁻³, respectivamente, utilizando-se como fontes ureia/sulfato de amônio, cloreto de potássio, fosfato monoamônico, sulfato de amônio, ácido bórico, sulfato de cobre (II), cloreto de ferro (II), cloreto de manganês (II), molibdato de amônio e sulfato de zinco. A adubação com N foi parcelada em 20, 30 e 50% da dose total no plantio e aos 10 e 35 d após a emergência, respectivamente. O K também foi parcelado em três vezes, sendo 1/3 da dose total aplicado aos 15, 23 e 30 d após a emergência. Os micronutrientes juntamente com o P e S foram aplicados em dose única, 15 d após a emergência.

O controle da irrigação foi diário. Um mini-tensiômetro Infield 7C colocado em cada vaso a uma profundidade de 10 cm, fornecia a leitura do potencial da água no solo, que era utilizado para o cálculo da quantidade de água necessária para se atingir -10 kPa, com base na curva de retenção. Essa umidade foi mantida até 48 d após a emergência, quando metade das plantas foram submetidas à restrição hídrica por 4 d. A restrição hídrica consistiu da suspensão total da irrigação e o tempo foi suficiente para a observação de intenso murchamento de folhas.

Variáveis avaliadas na cultura do milho

No 52º dia após a emergência, coincidente com o final da restrição hídrica imposta, entre as 6:00 e 6:30 h da manhã, foi determinado o teor relativo de água na folha (TRA), por meio da coleta de 10 discos no centro do limbo foliar da antepenúltima folha, evitando-se as nervuras. Os discos foram imediatamente pesados em balança de precisão, obtendo-se a massa da matéria fresca (MF) e, em seguida, foram acomodados em placa de Petri e submersos por 24 h em água destilada para atingirem saturação hídrica. Posteriormente, os discos foram retirados da placa, eliminando-se o excesso de água com papel absorvente e pesados imediatamente para a determinação da massa túrgida (MT). Na sequência, os discos foram dispostos em sacos de papel e levados para estufa (65 °C) até massa constante, para a obtenção da massa seca (MS). O TRA foi calculado pela equação: $TRA = [(MF - MS) / (MT - MS)] \times 100$, segundo (Barrs et al. 1962).

No dia final da restrição hídrica, entre 8:00 e 11:00 h, também foram avaliadas as trocas gasosas das plantas de milho. A folha analisada foi a penúltima totalmente expandida utilizando-se um analisador de gases infravermelho portátil (IRGA), modelo LI 6400 (LI-COR, USA), com irradiância de 1200 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. As variáveis avaliadas foram: fotossíntese ($\mu\text{mol} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e condutância estomática ($\text{mmol} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

O desenvolvimento da cultura do milho ao final dos 52 d também foi avaliado por meio de aferições da altura e diâmetro do colmo das plantas. A altura foi determinada com régua graduada, medindo-se a distância entre a superfície do solo e a inserção da folha bandeira e, o diâmetro, com paquímetro digital na região da inserção da primeira folha.

Finalizadas as avaliações do 52º dia, o experimento foi colhido para a análise da massa de matéria fresca e seca da parte aérea, massa de matéria seca da raiz e área foliar. A massa de matéria fresca da parte aérea considerou a pesagem de folhas e colmo logo após a colheita. A massa de matéria seca de parte aérea e raiz foram obtidas depois de secagem em estufa (65 °C) até massa constante. A área foliar foi medida em um integrador de área foliar LI-COR (modelo LI 3000).

O estado nutricional das plantas de milho foi avaliado após digestão nitro-perclórica, sendo determinadas as concentrações de K, P, S, Ca e Mg nos extratos obtidos por espectrometria de absorção atômica. A determinação do N na parte aérea foi realizada pelo método Kjeldahl. Todas as análises de tecidos vegetais foram realizadas segundo (Embrapa, 2009).

Variáveis avaliadas no solo

Após a colheita das plantas, amostras de solo indeformadas e deformadas foram coletadas. As amostras indeformadas coletadas com anel volumétrico foram utilizadas na determinação da porosidade (Embrapa, 2011). Com as amostras deformadas foram obtidas a TFSA e nela determinadas a densidade do solo (Embrapa, 2011) a curva de água do solo, água disponível (AD), classificação da hidrofobicidade (Bisdorn et al., 1993) de acordo com o tempo de penetração da gota de água (WDPT) (Doerr, 1988). Também nessas amostras foi promovida a caracterização química do solo conforme Embrapa (2011).

Análises estatísticas

Os dados foram analisados por meio de análise de variância e regressão. Para o fator qualitativo granulometria do biochar, foi aplicado o teste Tukey ($p < 0,05$). Para o fator quantitativo dose de biocarvão foram ajustadas regressões e os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste “t” ($p < 0,05$), no coeficiente de determinação ($R^2 = \text{S.Q. Regressão} / \text{S.Q. Tratamento}$) e no comportamento do fenômeno em estudo.

Independente da interação de maior grau ser ou não significativa, optou-se pelo desdobramento da mesma, devido ao interesse em estudo. Para algumas das variáveis avaliadas com grande variabilidade optou-se pela análise estatística descritiva. Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software SAEG 9.1 (UFV, 2007).

RESULTADOS

Efeitos fisiológicos nas plantas de milho

Na avaliação de trocas gasosas das plantas de milho efetuada aos 52 d, que envolveu a determinação da fotossíntese e a condutância estomática, não foram observadas diferenças entre as duas granulometrias de biocarvão avaliadas ($p>0,05$) nas duas condições de umidade do solo.

Em condições hídricas mantidas adequadas, as plantas que receberam biocarvão apresentaram aumento na taxa de fotossíntese (A) (Figura 1A) e da condutância estomática (gs) (Figura 1B), o que pode ser relacionado à melhor condição nutricional das plantas que receberam o condicionador, pois o fator água foi igualado em todos os tratamentos. Quando as plantas foram submetidas à restrição hídrica, a adição de doses de biocarvão levou à redução da fotossíntese e condutância estomática (Figura 1A e 1B).

Para o teor relativo de água (TRA) na folha não se verificou diferenças entre as duas granulometrias de biocarvão ($p>0,05$), mas foi afetado pela restrição hídrica (Figura 1C). A imposição da restrição hídrica quando acompanhada da adição de doses de biocarvão acarretou na redução de TRA nas folhas. Em situação de teor de água não restritivo, as doses de biocarvão mantiveram ou aumentaram o valor da mesma variável. Os resultados de TRA foram coerentes com a observação *in loco* das plantas. Após o período de restrição hídrica, as folhas das plantas que não receberam biocarvão ainda se encontravam levemente túrgida enquanto as que receberam exibiram alguma murcha (Figura 2).

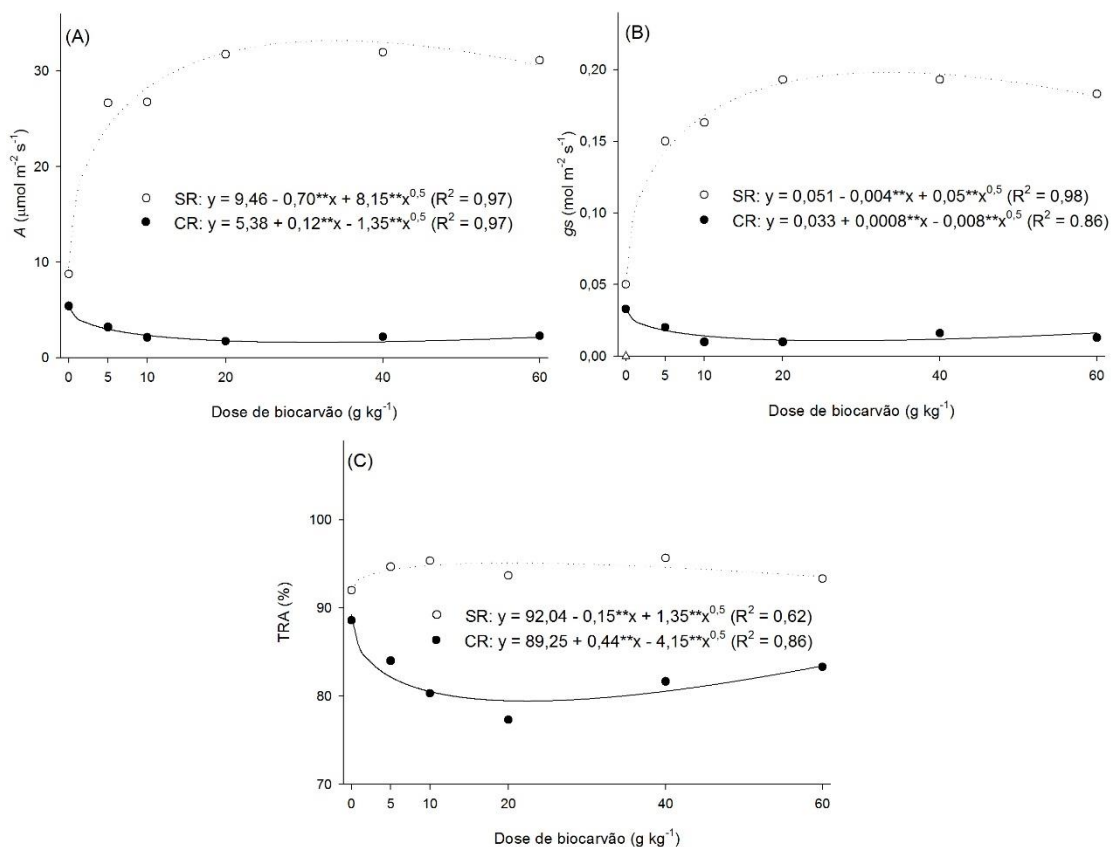


Figura 1: Valores de taxa de fotossíntese (A), condutância estomática (*gs*) e teor relativo de água na folha (TRA) medidas aos 52 d em plantas de milho cultivadas com (CR) e sem restrição hídrica (SR) nas diferentes doses de biocarvão (** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”).



Figura 2: Desenvolvimento de plantas de milho após 52 dias de emergência nas diferentes doses de biocarvão aplicadas e sob restrição de umidade.

Efeitos no desenvolvimento das plantas de milho

Não se verificou efeito de granulometria dos biocarvões sobre as variáveis associadas ao desenvolvimento das plantas de milho. Efeito de doses foi verificado quando se contrastou a presença e ausência do biocarvão, ou seja, as quantidades adicionadas do condicionador não diferiram entre si, mas apenas da testemunha.

Observa-se ganho de altura e diâmetro do colmo das plantas das doses aplicadas de biocarvão em relação ao tratamento de dose zero (Figura 3A). Após 52 d da emergência, a aplicação das doses de biocarvão nas duas granulometrias proporcionou altura média de 69 cm, enquanto que as plantas que não receberam o condicionador ficaram com 52 cm de altura (Figuras 3A e 4).

O diâmetro de colmo seguiu tendência semelhante à altura. No final do experimento, o tratamento que não recebeu biocarvão apresentou diâmetro de colmo de 11 cm, enquanto que os que receberam biocarvão nas diferentes doses apresentaram diâmetro médio de 15 cm (Figura 3B).

A adição de doses de biocarvão incrementou a área foliar, a produção de matéria fresca e seca da parte aérea e seca da raiz das plantas de milho (Figuras 3C, 3D, 3E e 3F). Os resultados são coerentes com o maior desenvolvimento da cultura, uma vez que essas variáveis normalmente correlacionam-se com a altura e diâmetro de colmo. Em relação à testemunha que não recebeu o condicionador, a aplicação das doses de biocarvão incrementou, em média, a área foliar em 1494 cm²; a matéria fresca e seca da parte aérea em 105 g e 16 g, respectivamente; e a matéria seca das raízes em 4 g.

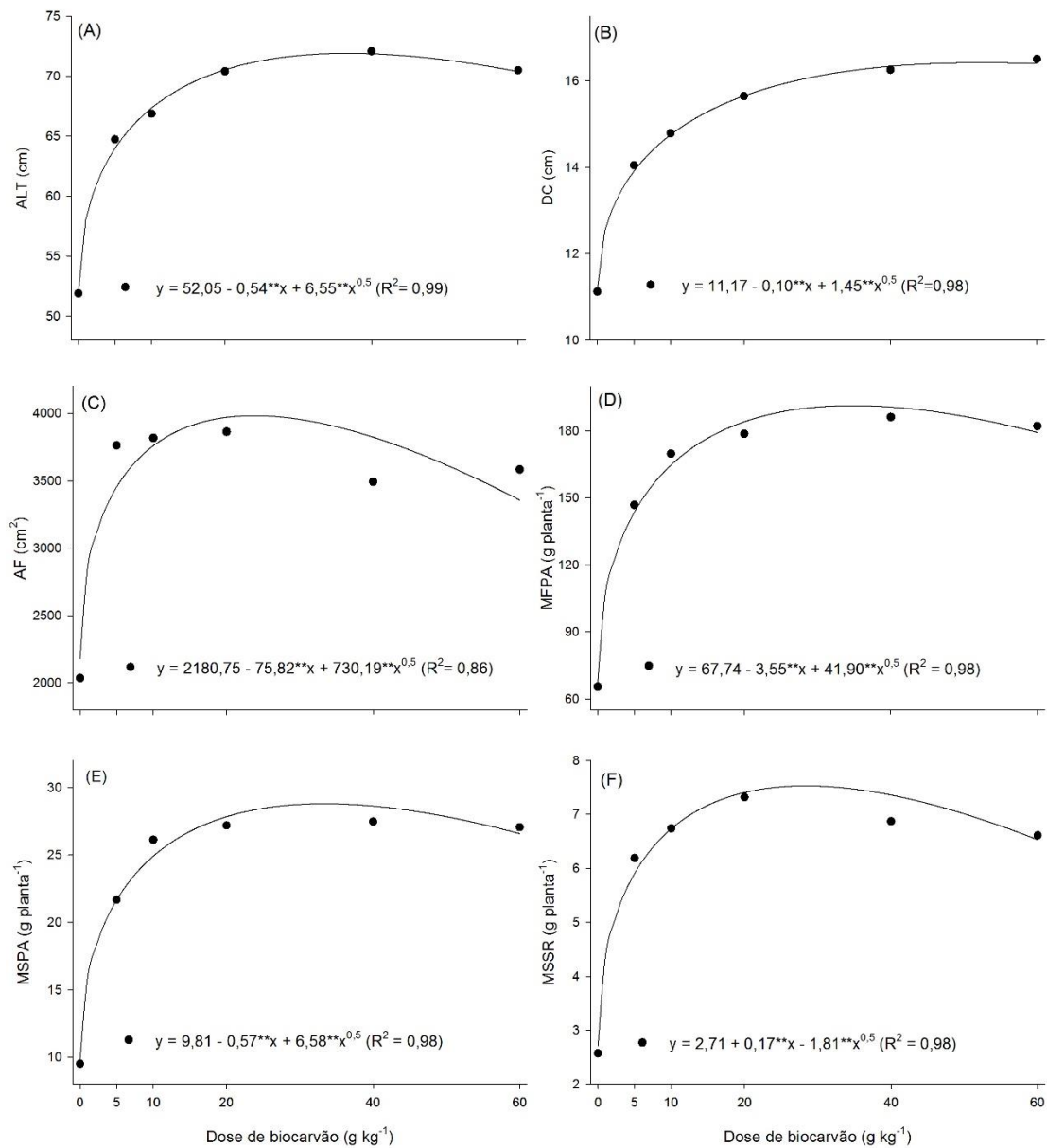


Figura 3: Altura (ALT), diâmetro do colmo (DC), Área foliar (AF), matéria fresca da parte aérea (MFPA), matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca do sistema radicular (MSSR), considerando as doses de biocarvão aplicadas. (** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”).

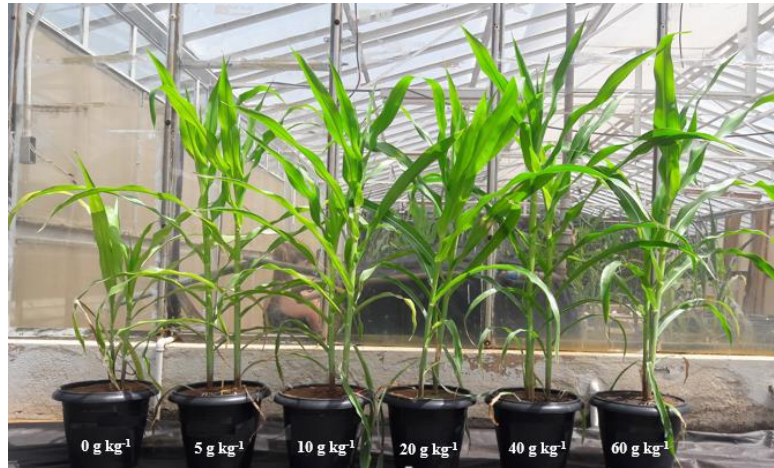


Figura 4: Desenvolvimento de plantas de milho após 52 dias de emergência nas diferentes doses de biocarvão aplicadas em condições ideais de umidade.

Efeito nutricional nas plantas de milho

Em relação ao aspecto nutricional das plantas de milho ao final do experimento, foram observados em resposta à aplicação de doses crescentes de biocarvão incrementos nos conteúdos (g planta^{-1}) de todos os macronutrientes e nos teores (g kg^{-1}) de P, K, Mg e Ca, assim como redução dos teores de N e S na parte aérea (Quadro 3).

Quadro 3. Médias e desvios padrão do teor e conteúdo de macronutrientes na parte aérea do milho, considerando a granulometria e doses de biocarvão aplicadas.

Dose	N	P	K	Mg	Ca	S
Biocarvão 2,0 - 0,5 mm						
g kg^{-1}	g planta^{-1}					
0	$0,04 \pm 0,001$	$0,02 \pm 0,001$	$0,22 \pm 0,001$	$0,004 \pm 0,001$	$0,01 \pm 0,001$	$0,04 \pm 0,01$
5	$0,07 \pm 0,01$	$0,05 \pm 0,01$	$0,53 \pm 0,08$	$0,01 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$
10	$0,08 \pm 0,001$	$0,07 \pm 0,01$	$0,80 \pm 0,19$	$0,02 \pm 0,001$	$0,05 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,01$
20	$0,08 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,02$	$0,90 \pm 0,12$	$0,03 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,001$	$0,08 \pm 0,01$
40	$0,07 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$	$0,78 \pm 0,06$	$0,04 \pm 0,001$	$0,07 \pm 0,001$	$0,07 \pm 0,01$
60	$0,06 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,001$	$0,85 \pm 0,08$	$0,04 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,01$
	g kg^{-1}					
0	$3,96 \pm 0,31$	$2,08 \pm 0,28$	$23,90 \pm 0,14$	$0,45 \pm 0,08$	$1,27 \pm 0,14$	$4,53 \pm 0,61$
5	$3,19 \pm 0,26$	$2,52 \pm 0,09$	$25,11 \pm 1,00$	$0,69 \pm 0,05$	$1,47 \pm 0,10$	$3,65 \pm 0,49$
10	$2,81 \pm 0,28$	$2,59 \pm 0,05$	$28,98 \pm 3,86$	$0,89 \pm 0,17$	$1,70 \pm 0,17$	$3,21 \pm 0,54$
20	$2,64 \pm 0,32$	$2,71 \pm 0,37$	$30,83 \pm 4,02$	$1,10 \pm 0,07$	$2,09 \pm 0,10$	$2,99 \pm 0,36$
40	$2,53 \pm 0,38$	$2,80 \pm 0,46$	$28,28 \pm 1,84$	$1,35 \pm 0,07$	$2,49 \pm 0,16$	$2,57 \pm 0,17$
60	$2,38 \pm 0,28$	$2,56 \pm 0,10$	$31,55 \pm 1,89$	$1,44 \pm 0,14$	$2,85 \pm 0,21$	$2,20 \pm 0,06$
Biocarvão < 0,5 mm						
	g planta^{-1}					
0	$0,04 \pm 0,001$	$0,02 \pm 0,001$	$0,21 \pm 0,03$	$0,004 \pm 0,001$	$0,01 \pm 0,001$	$0,05 \pm 0,001$
5	$0,06 \pm 0,001$	$0,06 \pm 0,01$	$0,61 \pm 0,04$	$0,01 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,001$	$0,08 \pm 0,03$
10	$0,07 \pm 0,001$	$0,07 \pm 0,01$	$0,77 \pm 0,08$	$0,02 \pm 0,001$	$0,06 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,001$
20	$0,06 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,001$	$0,83 \pm 0,04$	$0,03 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$
40	$0,07 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$	$0,86 \pm 0,08$	$0,04 \pm 0,001$	$0,09 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,02$
60	$0,07 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,01$	$0,94 \pm 0,09$	$0,04 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,02$	$0,07 \pm 0,01$
	g kg^{-1}					
0	$3,86 \pm 0,31$	$2,04 \pm 0,31$	$21,59 \pm 1,99$	$0,46 \pm 0,01$	$1,32 \pm 0,20$	$4,69 \pm 0,12$
5	$2,97 \pm 0,37$	$2,82 \pm 0,26$	$27,69 \pm 3,07$	$0,63 \pm 0,21$	$1,69 \pm 0,20$	$3,75 \pm 1,17$
10	$2,66 \pm 0,44$	$2,88 \pm 0,14$	$30,65 \pm 0,46$	$0,96 \pm 0,13$	$2,46 \pm 0,28$	$3,54 \pm 0,27$
20	$2,50 \pm 0,32$	$2,97 \pm 0,39$	$32,99 \pm 1,96$	$1,22 \pm 0,16$	$3,10 \pm 0,04$	$3,33 \pm 0,20$
40	$2,49 \pm 0,22$	$2,96 \pm 0,21$	$31,34 \pm 0,84$	$1,41 \pm 0,05$	$3,35 \pm 0,06$	$2,90 \pm 0,43$
60	$2,41 \pm 0,26$	$2,59 \pm 0,22$	$34,77 \pm 1,35$	$1,43 \pm 0,11$	$3,64 \pm 0,37$	$2,59 \pm 0,10$

Efeitos físicos da adição de doses de biocarvão no solo

A densidade do solo diminuiu com a adição das maiores doses de biocarvão nas duas granulometrias avaliadas. Na comparação entre granulometrias, a Ds foi menor nas doses de 20, 40 e 60 g kg^{-1} na maior

granulometria (2,0 – 0,5 mm) (Figura 5A). O incremento das doses de biocarvão proporcionou o aumento da microporosidade nas duas granulometrias, com diferenças entre granulometrias somente verificada na maior dose (60 g kg⁻¹) (Figura 5B). Nesta dose a menor granulometria (< 0,5 mm) acarretou maior incremento da microporosidade. O aumento da microporosidade foi acompanhado de respectiva redução da macroporosidade com o incremento das doses de biocarvão, entretanto sem que se verificasse diferenças entre as duas granulometrias (Figura 6A). Este mesmo efeito ocorreu para a porosidade total (Figura 6B).

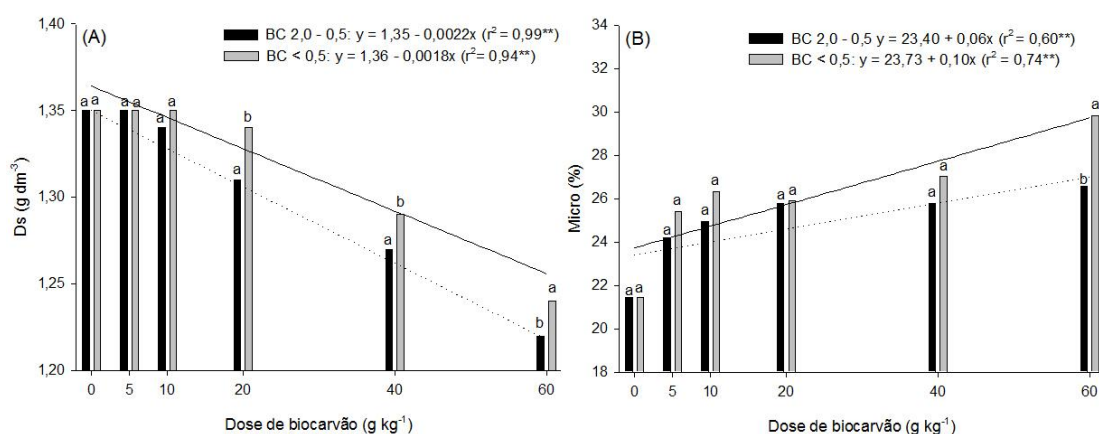


Figura 5. Densidade do solo (Ds) e microporosidade (Micro) considerando a granulometria e doses de biocarvão aplicadas. (** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”). Tratamentos estatisticamente diferentes são indicados por letras diferentes acima das colunas (p < 0,05 pelo teste de Tukey).

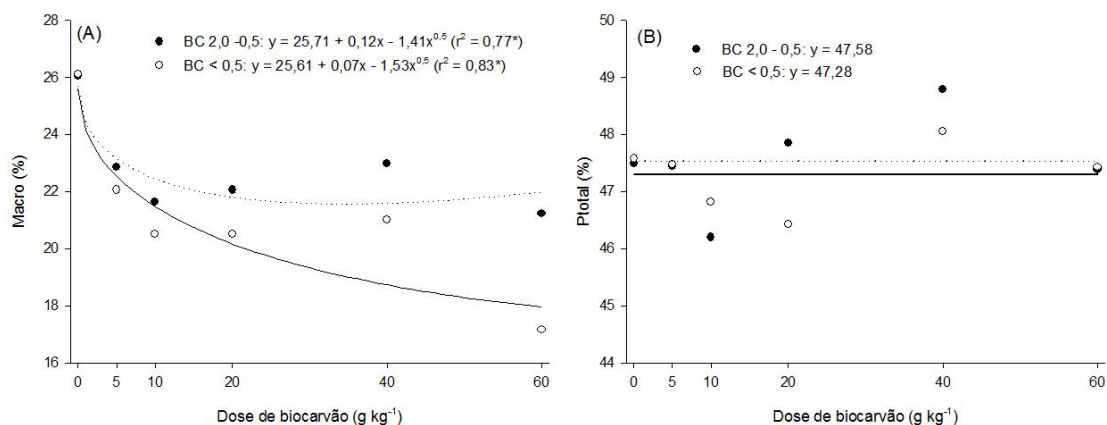


Figura 6. Macroposidade do solo (Macro) e porosidade total (Ptotal) considerando a granulometria e doses de biocarvão aplicadas. (*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste “t”).

Os resultados do teste da classificação da hidrofobicidade – WDPT [26] indicam que todas as misturas solo:biocarvão são hidrofílicas, à exceção quando se adicionou doses de 40 e 60 g kg⁻¹ do biocarvão na granulometria < 0,5 mm, cujas amostras foram classificadas como levemente hidrofóbicas. Nas misturas hidrofílicas, o tempo médio de penetração das gotas de água foi inferior a 5 s, enquanto que nas levemente hidrofóbicas, o tempo ficou entre 5 e 60 s.

A retenção de água das misturas solo:biocarvão e do biocarvão puro são apresentadas no Figura 7. A capacidade de retenção de água do biocarvão puro é grande, ao ponto de no potencial de -6 KPa, o material reter massa de água maior do que sua própria massa (1,03 e 1,40 kg kg⁻¹). O incremento das doses aumentou a umidade retida nos diferentes potenciais em comparação ao solo puro (dose de biocarvão 0 g kg⁻¹).

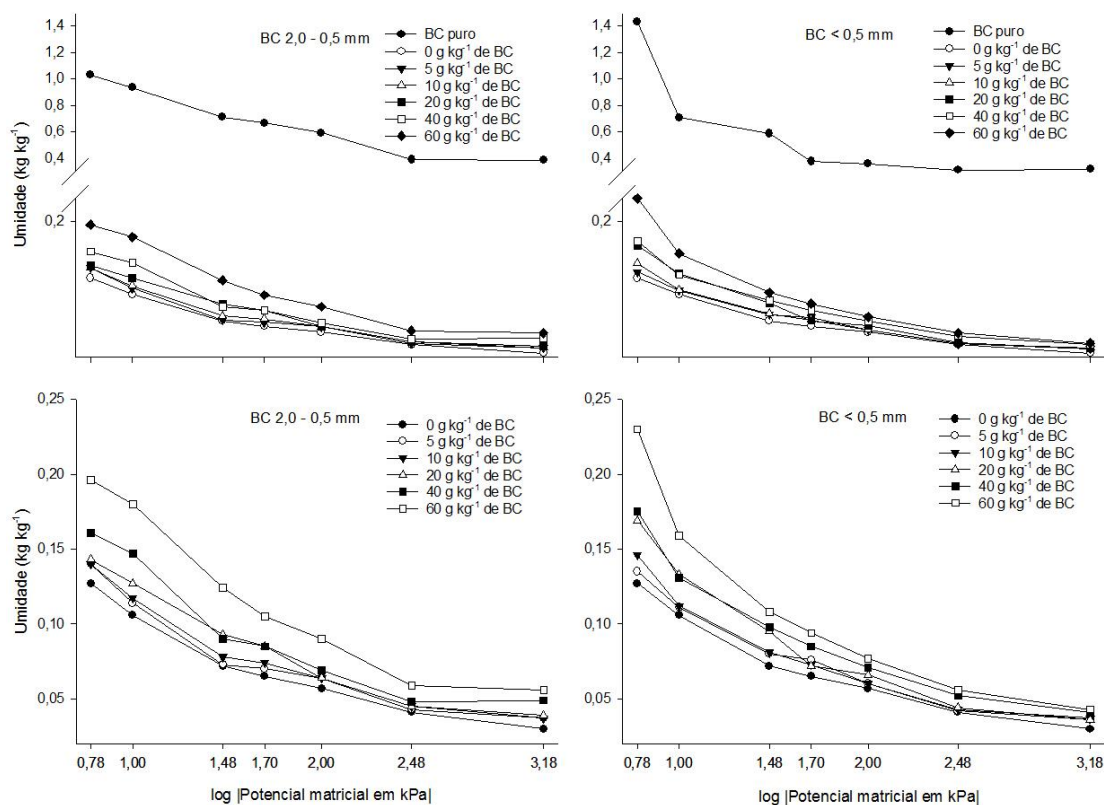


Figura 7. Curva de retenção de água para o biocarvão puro nas diferentes granulometrias e misturas biocarvão:solo.

Os resultados de água disponível reforçam a observação da maior retenção de água com a adição do condicionador, pois verifica-se aumento linear dessa característica em resposta ao aumento das doses de biocarvão (Figura 8).

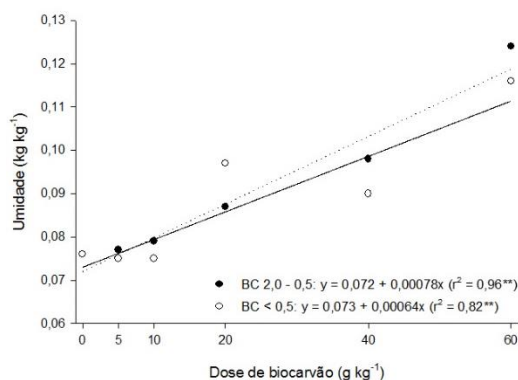


Figura 8: Água disponível no solo, considerando a granulometria e doses de biocarvão aplicadas. (** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”).

Efeitos químicos da adição de doses de biocarvão no solo

Na avaliação dos efeitos químicos da aplicação de biocarvão no solo, não foram observadas diferenças entre as duas granulometrias de biocarvão avaliadas ($p > 0,05$). O aumento das doses de biocarvão das duas granulometrias aumentou os valores de pH e dos teores de P, K, Ca²⁺, Mg²⁺ e carbono orgânico (Figuras 9A, 9B, 9C, 9D, 9E e 9F) e reduziu a acidez potencial (Figura 9G). Esses ganhos em termos nutricionais impactaram também positivamente os valores dos indicadores da fertilidade do solo, como saturação por bases, CTC e a soma de bases (dados não apresentados).

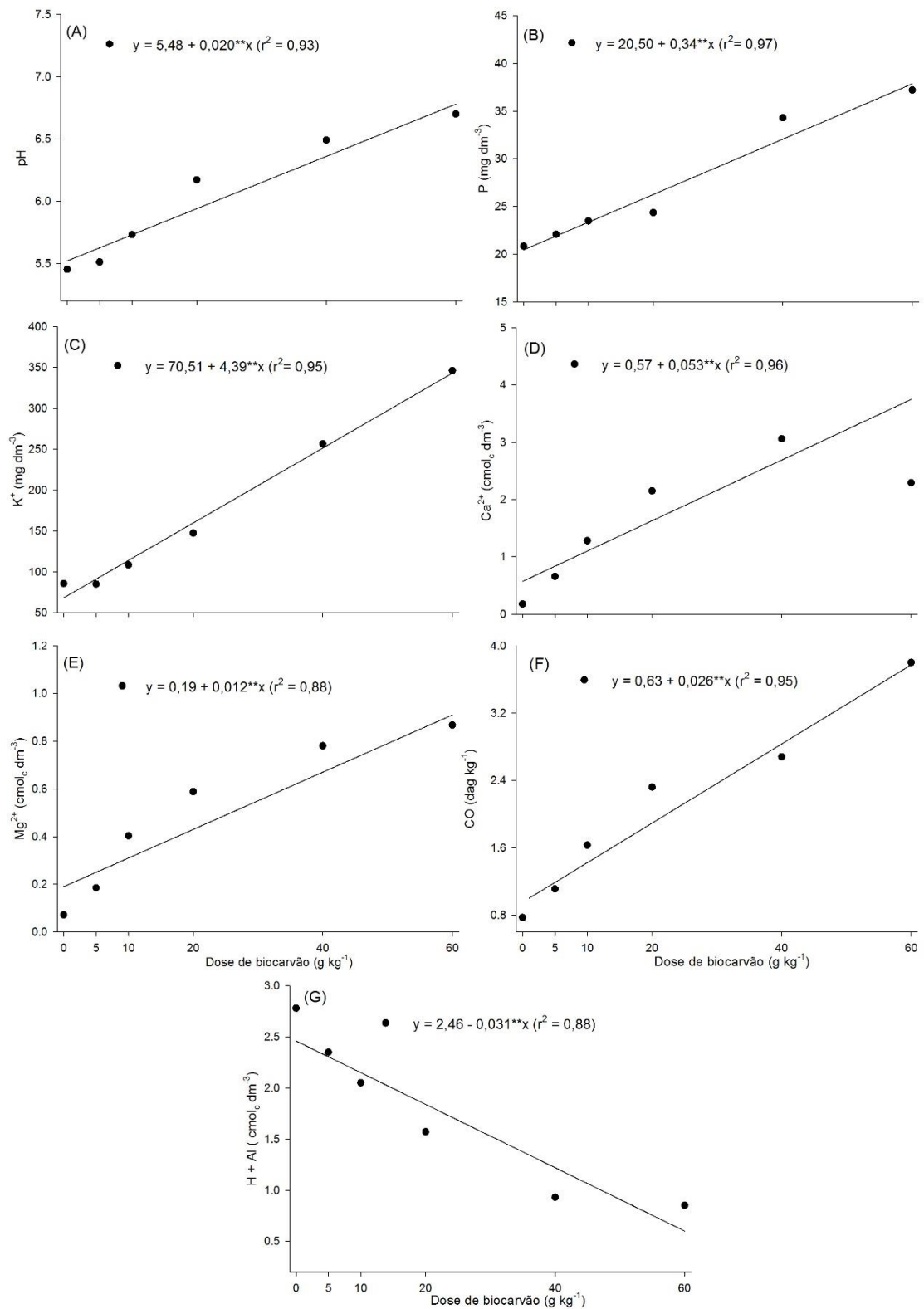


Figura 9: Valores de pH, P, K, Ca, Mg, carbono orgânico (CO) e acidez potencial (H + Al) no solo considerando a granulometria e doses de biocarvão aplicadas. (** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”).

DISCUSSÃO

As maiores taxas de fotossíntese e de condutância estomática das plantas nos tratamentos que receberam biocarvão e que foram mantidos na condição hídrica adequada indicam o efeito sinérgico desses dois componentes na condição nutricional das plantas. Os índices fisiológicos são afetados por fatores ambientais, como luz, temperatura, concentração de CO₂ e disponibilidade de água e nutrientes (Taiz e Zeiger, 2009). Entretanto, quando as plantas foram submetidas a um período de restrição hídrica, a aplicação do biocarvão provocou leve redução da fotossíntese, condutância estomática e teor relativo de água na folha. Resultados semelhantes foram verificados por Paneque et al. (2016), que observaram que a aplicação de biocarvão provocou a diminuição da condutância estomática em plantas de girassol submetidas a estresse hídrico. Por outro lado, Liu et al. (2016) observaram que a aplicação de biocarvão aumentou a disponibilidade de água para as plantas em campo no período mais seco do verão, com impactos positivos na relação entre planta e água.

A redução da disponibilidade de água no solo com o biocarvão pode ser associada também com a própria capacidade de retenção do condicionador, o que pode, sob determinadas condições, induzir à uma deficiência hídrica para as plantas (Abel et al., 2013). Por conseguinte, nesses casos pode haver impacto direto na redução da fotossíntese, condutância estomática e no teor relativo de água na folha. Adicionalmente, o fato de os tratamentos que receberam biocarvão apresentarem plantas com maior produção biomassa seguramente aumentou a demanda hídrica desses vegetais.

Diante dos fatos levantados, mesmo tendo os tratamentos que receberam biocarvão apresentado maiores valores de água disponível e de retenção de água, isto não foi suficiente para suprir a demanda de água das plantas de milho no período de restrição hídrica imposto.

Nesse estudo as melhores condições de fertilidade do solo determinaram o melhor desenvolvimento das plantas. Desta forma, a melhoria dos níveis de fertilidade com a adição de doses de biocarvão proporcionou plantas com maior acúmulo de nutrientes, como indicado pelos maiores conteúdos de N, P, K, Ca, Mg e S parte aérea das plantas. Em consequência, indicadores de

desenvolvimento da planta como altura, diâmetro de colmo, área foliar, produção de parte aérea e raiz, responderam mesmo na menor dose de biocarvão. Respostas positivas de desenvolvimento vegetal com a aplicação de biocarvão também foram encontradas em outros estudos (Schulz e Glaser, 2012; Dao et al., 2013).

Apesar de não ser possível isolar o efeito do biocarvão sobre o desenvolvimento das plantas, o tratamento somente com solo (dose 0 g kg⁻¹ de biocarvão) e que recebeu apenas a adubação (NPK + micronutrientes), teve o desenvolvimento e a absorção de nutrientes prejudicadas. Isto sugere que a aplicação do biocarvão juntamente com a adubação inorgânica provoca efeito sinérgico (Faloye et al., 2017) com aumento do rendimento das culturas (Oram et al., 2014). Esse maior desenvolvimento das plantas com a adição de biocarvão pode ser atribuído à melhoria das condições de fertilidade do solo, eficiência do uso de nutrientes, melhoria na estrutura do solo e na capacidade de retenção de água (Oguntunde et al., 2004; Asai et al., 2009; Ajayi et al., 2016).

A diminuição do teor dos macronutrientes N e S nas plantas de milho com o aumento das doses pode ser associada ao aumento de produção de matéria seca no solo tratado com biocarvão, caracterizando um efeito de diluição. Smider e Singh (2014) observaram comportamento semelhante para o conteúdo de K, S, Zn, Cu e Fe na cultura do milho. O efeito de diluição ocorre quando a taxa de crescimento relativo de matéria seca é superior à taxa de absorção relativa do nutriente (Maia et al., 2005).

A aplicação de doses crescente de biocarvão alterou de forma positiva a maioria das variáveis físicas e químicas do solo, diante de uma perspectiva de produção agrícola para o desenvolvimento de culturas. Nas propriedades físicas avaliadas, o incremento das doses de biocarvão foi responsável pela diminuição da densidade do solo, juntamente com o aumento da relação microporos/macroporos, resultados semelhantes aos descritos em outros estudos (Githinji, 2014; Mukherjee e Lal, 2013; Laird et al., 2010). Características do biocarvão como a baixa densidade e alta porosidade contribuem para os resultados obtidos. Outra característica que pode ter contribuído para o aumento da relação microporos/macroporos são as granulometrias usadas no experimento, que podem ter ocasionado o melhor

rearranjo e proximidade das partículas, diminuindo os macroporos e aumentando os microporos. O fato de o biocarvão da granulometria 2,0 - 0,5 mm apresentar menor densidade, contribuiu para uma menor densidade no solo nas maiores doses aplicadas desse condicionador. Por outro lado, o biocarvão < 0,5 mm condicionou o melhor rearranjo das partículas, proporcionando um aumento significativo na microporosidade na maior dose aplicada.

Em relação às propriedades físico-hídricas do solo, o incremento das doses de biocarvão aumentou a retenção de água no solo e também a água disponível, corroborando também outros estudos com este material (Laird et al., 2010; Busscher et al., 2010; Abel et al., 2013). Características como elevada área superficial específica e alta porosidade podem ser responsáveis por aumentar a retenção de água de solos tratados com biocarvão (Obia et al., 2016; Mukherjee e Lal, 2013). As granulometrias de 2,0 – 0,5 mm e < 0,5 mm não apresentaram diferenças quanto à água disponível, concordando com os resultados Obia et al. (2016), que avaliaram características físico-hídricas de biocarvão de diferentes granulometrias ($\leq 0,5$ mm; 0,5 -1,0 mm e $> 1,0$ mm) e concluíram não haver diferenças do tamanho das partículas nos efeitos positivos do condicionador.

Em relação à hidrofobicidade, apesar de os biocarvões nas duas granulometrias serem classificados como severamente hidrofóbicos (Quadro 1), quando foram misturados ao solo tiveram, no geral, comportamento hidrofílico, chegando a levemente hidrofóbico nas maiores doses da menor granulometria. Os biocarvões apresentam na superfície grupos funcionais com comportamento hidrofílico como carboxi, hidroxil e metoxil, e grupos com comportamento hidrofóbico como os alifáticos e aromáticos (Baccile et al., 2009; Sharma et al., 2004). Kinney et al. (2012) observaram comportamento semelhante aos verificados neste estudo para misturas de biocarvão com solo argiloso e arenoso. Os valores de WDPT podem variar em função da posição que a gota de água cai sobre a superfície, variando conforme se a gota atinge partículas do biocarvão ou da matriz do solo. A alta hidrofobicidade do solo favorece a formação de fluxos preferenciais (Ritsema e Dekker, 2000) além de aumentar o escoamento superficial (Shakesby e Doerr, 2006), que potencializam a erosão do solo.

Na caracterização química, verificou-se incremento da alcalinidade com o aumento da dose de biocarvão. Os biocarvões apresentam na superfície grupos fenólicos, carboxílicos e hidroxilas carregados negativamente (Chintala et al., 2014; Lehmann e Joseph, 2015) que se ligam aos íons H^+ , reduzindo assim a sua concentração na solução do solo e aumentando o valor do pH do solo. Além disso, os óxidos e hidróxidos de metais alcalinos, presente nas cinzas, por serem facilmente dissolvidos e reagirem rapidamente com o solo, contribuem também para o aumento do pH do solo (Steenari et al., 1999)

A aplicação de diferentes doses de biocarvão também foi responsável pelo aumento linear dos teores de P e de cátions como K, Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo, resultados semelhantes aos encontrados por Laird et al. (2010). Tal fato decorre principalmente pela presença de nutrientes no biocarvão, nas cinzas e pelo próprio aumento do pH. As cinzas são formadas por elementos minerais oriundos da matéria-prima que originou o biocarvão e, neste material, bases como K, Ca e Mg são facilmente liberados para a solução do solo (Glaser et al., 2002). O aumento do pH contribui para o aumento da capacidade de troca catiônica, por meio da liberação de cargas dependentes de pH (Mukherjee e Lal, 2013), que estão presentes na superfície das caulinitas, dos óxidos de Fe e Al, e compostos orgânicos, com potencial de reduzirem a lixiviação de cátions. O pH também interfere na disponibilidade de P, pois com o aumento do pH ocorre a solubilização dos fosfatos de ferro e alumínio além da redução da adsorção do ânion fosfato a fase sólida do solo.

Além do pH e o dos nutrientes, as doses crescentes de biocarvão aumentaram o carbono orgânico, um dos indicadores chave da qualidade de um solo (Andrews et al., 2004). Vale ressaltar que o carbono incorporado no solo via biocarvão é muito estável (Glaser et al., 2002; Lehmann e Joseph, 2009) quando comparado com resíduos frescos de vegetal ou animal. Assim, a transformação da biomassa em formas estáveis de carbono juntamente com sua aplicação no solo é um sistema que efetivamente remove o CO_2 da atmosfera pela fotossíntese e o sequestra nos solos (Laird et al., 2010).

CONCLUSÕES

Efeitos na qualidade do solo não dependem da granulometria do biocarvão.

Os ganhos de retenção de água promovidos pelo biocarvão não são suficientes para enfrentar problemas de restrição hídrica no solo.

Incremento de doses crescentes de biocarvão melhoram a qualidade do solo e o desenvolvimento de plantas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abel S, Peters A, Trinks S, Schonsky H, Facklam M, Wessolek G. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*. 2013; 202–203: 183-191.

Ajayi AE, Holthusen D, Horn R. Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils. *Soil Till Res*. 2016; 155: 166-175.

Andrews SS, Karlen DL, Cambardella CA. The Soil Management Assessment Framework. *Soil Sci Soc Am J*. 2004; 68(6): 1945–1962.

Angin D, Sensoz S. Effect of Pyrolysis Temperature on Chemical and Surface Properties of Biochar of Rapeseed (*Brassica napus* L.). *Int J Phyto remediation*. 2014; 16(7-8): 684-693.

Asai H, Samson BK, Stephan HM, Songyikhangsuthor K, Homma K, Kiyono Y., ... Horie T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Res*. 2009; 111(1-2): 81-84

Atkinson CJ, Fitzgerald JD, Hips NA. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant Soil*. 2010; 337(1), 1-18.

Baccile N, Laurent G, Babonneau F, Fayon F, Titirici M M, Antonietti M. Structural Characterization of Hydrothermal Carbon Spheres by Advanced Solid-State MAS13C NMR Investigations. *J. Phys. Chem. C*. 2009; 113(22): 9644-9654.

Baronti S, Vaccari FP, Miglietta F, Calzolari C, Lugato E, Orlandini S., ...
 Genesio, L. Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.). *Eur J Agron* 2014; 53: 38-44.

Barrs HD, Weatherley PE. A Re-Examination of the Relative Turgidity Technique for Estimating Water Deficits in Leaves. *Aust J Biol Sci.* 1962; 15(3): 413-428.

Biederman LA, Stanley Harpole W. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. *GCB Bioenergy.* 2013: 5(2); 202-214.

Bisdorn EBA, Dekker LW, Schoute JFT. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma.* 1993: 56(1-4); 105-118.

Borchard N, Siemens J, Ladd B, Möller A, Amelung W. Application of biochars to sandy and silty soil failed to increase maize yield under common agricultural practice. *Soil Till Res.* 2014: 144; 184-194.

Busscher WJ, Novak JM, Evans DE, Watts DW, Niandou MS, Ahmedna M. Influence of Pecan Biochar on Physical Properties of a Norfolk Loamy Sand. *Soil Sci.* 2010: 175(1); 10-14.

Chen T, Zhang Y, Wang H, Lu W, Zhou Z, Zhang Y, Ren L. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. *Bioresour. Technol.* 2014: 164; 47-54.

Chintala R, Mollinedo J, Schumacher TE, Malo DD, Julson JL. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2014: 60; 393-404.

Dao TT, Canh T, Trach NX, Preston TR. Effect of different sources of biochar on growth of maize in sandy and feralite soils. *Livest. Res. Rural. Dev.* 2013: 24;5-8.

Doerr SH. Short communication on standardizing the 'Water Drop Penetration Time' and the 'molarity of an ethanol droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils. *Earth Surf. Process. Landf.* 1988: 23; 663-668.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo 2.ed. Rio de Janeiro, 2011. 230p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Rio de Janeiro, 2009. 627p.

Enders A, Hanley K, Whitman T, Joseph S, Lehmann J. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresour. Technol.* 2012: 114; 644-653.

Faloye OT, Alatise MO, Ajayi AE, Ewulo BS. Synergistic effects of biochar and inorganic fertiliser on maize (*zea mays*) yield in an alfisol under drip irrigation. *Soil Till Res.* 2017: 174; 214-220.

Gaunt JL, Lehmann J. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production. *Environ. Sci. Technol.* 2008: 42(11); 4152-4158.

Githinji L. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2014: 60(4); 457-470.

Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, Zech W. The “Terra Preta” phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften.* 2011: 88(1); 37-41.

Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - A review. *Biol. Fertil. Soils.* 2002: 35(4); 219-230.

Hendershot WH, Lalonde H, Duquette M. Ion exchange and exchangeable cations, in: M.R. Carter, E.G. Gregorich (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2008, pp. 197–206.

Jeffery S, Verheijen FGA, van der Velde M, Bastos AC. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2011: 144(1); 175-187.

Kinney TJ, Masiello CA, Dugan B, Hockaday WC, Dean MR, Zygourakis K, Barnes, RT. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass Bioenergy.* 2012: 41; 34-43.

Laird DA, Fleming P, Davis DD, Horton R, Wang B, Karlen DL. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma.* 2010: 158(3-4); 443-449.

Lehmann J, Joseph S. Biochar for environmental management: An introduction. In: Biochar for Environmental Management, Lehmann J, Joseph S, editores. Science and Technology. New York: Routledge; 2015. p.1-12.

Lehmann J. A handful of carbon. *Nat.* 2007: 447(7141); 143-144.

Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O'Neill B., ... Neves EG. Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Sci Soc Am J.* 2006: 70(5); 17-19.

Liu Z, Dugan B, Masiello CA, Barnes RT, Gallagher ME, Gonnermann H. (2016). Impacts of biochar concentration and particle size on hydraulic conductivity and DOC leaching of biochar-sand mixtures. *J. Hydrol.* 2016: 533; 461-472.

Maia CE, Morais, ERC De Filho FDQP, Gueyi HR, Medeiros JFDe. Teores foliares de nutrientes em meloeiro e de nutriente irrigado com águas de diferentes salinidades. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* 2005: 9; 292–295.

Major J, Rondon M, Molina D, Riha SJ, Lehmann J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant Soil.* 2010: 333(1); 117–128.

Mukherjee A, Lal R. Biochar Impacts on Soil Physical Properties and Greenhouse Gas Emissions. *Agron.* 2013: 3(2); 313–339.

Novak JM, Lima I, Xing B, Gaskin JW, Steiner C Das KC., ... Schomberg H. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Ann. Environmental. Sci.* 2009:3(843); 195–206.

Obia A, Mulder J, Martinsen V, Cornelissen G, Borresen T. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil Tillage Res.* 2016: 155; 35–44.

Oguntunde PG, Fosu M, Ajayi AE, Van De Giesen NDe. (2004). Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biol. Fertil. Soils.* 2004: 39(4); 295–299.

Oram NJ, van de Voorde TFJ, Ouweland GJ, Bezemer TM, Mommer L, Jeffery S, Groenigen JWV. Soil amendment with biochar increases the competitive ability of legumes via increased potassium availability. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2014: 191; 92–98.

Paneque M, De la Rosa JM, Franco-Navarro JD, Colmenero-Flores JM, Knicker H. Effect of biochar amendment on morphology, productivity and water

relations of sunflower plants under non-irrigation conditions. *Catena*. 2016: 147; 280–287.

Peake LR, Reid BJ, Tang X. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. *Geoderma*. 2014: 235–236; 182–190.

Prakongkep N, Gilkes RJ, Wiriyakitnatekul W. Forms and solubility of plant nutrient elements in tropical plant waste biochars. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2015: 178(5); 732–740.

Ritsema CJ, Dekker LW. Preferential Flow in Water Repellent Sandy Soils: Principles and Modeling Approaches. *J. Hydrol.* 2000: 231–232; 308–319.

SAEG. Sistema para análises estatísticas, Versão 9.1: Fundação Arthur Bernardes. Viçosa- UFV-Viçosa, 2007.

Schulz H, Glaser B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2012: 175(3); 410–422.

Shakesby RA, Doerr SH. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth Sci. Rev.* 2006: 74(3–4); 269–307.

Sharma R K, Wooten JB, Baliga VL, Lin X, Chan WG, Hajaligol MR. Characterization of chars from pyrolysis of lignin. *Fuel*. 2004: 83(11–12); 1469–1482.

Smider B, Singh B. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2014: 191; 99–107.

Steenari BM, Karlsson LG, Lindqvist O. Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. *Biomass Bioenergy*. 1999:16(2); 119–136.

Taiz L, Zeiger E. *Fisiologia Vegetal*. 4^a ed. Tradutor Eliane Romanato Santarém et al. Porto Alegre: Artimed, 2009. 820 p.

Zheng J, Han J, Liu Z, Xia W, Zhang X, Li L., ... Pan G. Biochar compound fertilizer increases nitrogen productivity and economic benefits but decreases carbon emission of maize production. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2017: 241; 70–78.

5. ARTIGO 3

QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO ARTIFICIALMENTE COMPACTADO EM RESPOSTA A APLICAÇÃO DE BIOCARVÃO

RESUMO: A incorporação de matéria orgânica no solo é uma alternativa para melhorar a qualidade física do solo. Porém, em condições de clima quente e úmido apresenta rápida decomposição, que resulta na melhoria das propriedades do solo por tempo limitado. O desejável seria incorporar um material que reúnice capacidade de melhorar atributos físicos do solo e recalitrância, como o biocarvão. Os dados sobre condutividade hidráulica em meio saturado e a porosidade de solos que receberam biocarvão e passaram pelo processo de compactação são escassos, além de informações sobre a resistência a penetração. Enquanto os efeitos da aplicação do biocarvão na condutividade hidráulica em meio saturado são inconclusivos, pois aumento, diminuição ou ausência foram observados. O presente trabalho objetivou quantificar em laboratório a condutividade hidráulica em meio saturado (K_{sat}), porosidade e a resistência a penetração em resposta ao incremento artificial do índice de compactação (IC) de misturas contendo solo e biocarvão em diferentes doses. As unidades experimentais foram formadas por cilindros (anéis) que receberam solo tratado com biocarvão, na granulometria menor que 0,5 mm e nas doses de 0, 10, 20 e 40 ($g\ kg^{-1}$). Os tratamentos foram previamente umedecidos e posteriormente compactadas até atingir os IC de 0,8; 0,9 e 1,0 para então determinação da K_{sat} , macroporosidade, microporosidade e a resistência a penetração. Os dados foram analisados por meio de análise de regressão e estatística descritiva. Observou-se que a aplicação de biocarvão reduziu a K_{sat} , possivelmente devido à obstrução dos poros do solo com partículas de biocarvão. A obstrução dos poros pode ter sido favorecida pela granulometria inferior a 0,5 mm do biocarvão. Condição que também refletiu na redução da macroporosidade e aumento da microporosidade. A aplicação do IC reduziu a K_{sat} , a macroporosidade e aumentou a microporosidade, condição esperada com o aumento da densidade do solo. Os valores médios de resistência a penetração mostram uma tendência de redução com a aplicação do biocarvão e do IC. Corroborando com os resultados encontrados na K_{sat} e na porosidade.

Palavras-chave: Qualidade física do solo; índice de compactação; biochar.

ABSTRACT: The incorporation of organic matter in the soil is an alternative to improve the physical quality of the soil. However, in hot and humid conditions, it shows rapid decomposition, which results in enhancement in soil properties for a limited time. The recommendation would be to incorporate a material that would combine potential to improve soil physical attributes and recalcitrance, such as biochar. Data on hydraulic conductivity in saturated medium and the porosity of soils that have received biochar and have undergone the compaction process are scarce, as well as the information on the root penetration, while the effects of the application of the biochar in the hydraulic conductivity in saturated medium are inconclusive because an increase, a decrease or an absence were observed. The objective of this work was to quantify in the laboratory the hydraulic conductivity in saturated medium (K_{sat}), porosity and root penetration in response to the artificial increase of the compaction index (CI) of mixtures containing soil and biochar at different doses. The experimental units were made up by cylinders (rings) that received soil treated with biochar, with grain size less than 0.5 mm and at doses of 0, 10, 20 and 40 ($g\ kg^{-1}$). The treatments were previously moistened and subsequently compacted until reaching the CI of 0.8; 0.9 and 1.0 for determination of K_{sat} , macroporosity, microporosity and root penetration. Data were analyzed using regression analysis and descriptive statistics. It was observed that the application of biochar reduced the K_{sat} , possibly due to the obstruction of the soil pores with biochar particles. Pore obstruction may have been promoted by the particle size of less than 0.5 mm of biochar. This condition also reflected in the reduction of macroporosity and the increase in microporosity. The application of the CI reduced the K_{sat} , the macroporosity and increased the microporosity, which was expected with the increase in soil density. The average values of root penetration show a tendency of reduction with the application of biochar and CI, corroborating with the results found in K_{sat} and porosity.

Keywords: biochar; compaction index; Soil physical quality.

INTRODUÇÃO

Estima-se que a compactação do solo seja responsável pela degradação de 68 milhões de hectares em todo mundo (Batey, 2009; Hamza e Anderson, 2005; Van den Akker e Canarache, 2001). A compactação tem causa principal o uso de máquinas agrícolas pesadas (Tracy et al., 2011), que resultam no aumento da densidade do solo e na diminuição da conectividade dos poros com redução da qualidade física do solo. A qualidade física pode ser definida, como a capacidade do solo de proporcionar ao sistema radicular das plantas condições favoráveis ao seu crescimento e desenvolvimento (Silva et al., 2009). Conforme Reichert et al. (2007), quando os solos são compactados, a densidade do solo aumenta e a porosidade e a permeabilidade diminuem, afetando a infiltração de água, a condutividade hidráulica em meio saturado e também na produtividade das culturas.

Como forma de melhoria da qualidade do solo destaca-se a matéria orgânica. Nos atributos físicos, sua presença diminui a densidade aparente e melhora a estrutura do solo, que reflete em uma boa aeração, drenagem, retenção de água, consistência e menor resistência a penetração (Kiehl, 1985; Celik et al., 2010). A adição de materiais que são facilmente degradáveis estimula a atividade microbiana, entretanto, em condições de clima quente e úmido tem a decomposição favorecida (Parton et al., 1987; Wang et al., 2000), o que resulta na melhoria das propriedades do solo por tempo limitado. O desejável seria incorporar um material com capacidade de melhorar atributos físicos e que fosse recalcitrante.

Nos solos amazônicos antropogênicos, comumente conhecidos como Terra Preta de Índio (TPI), a adição de carbono pirogênico pelos índios é um dos elementos chave na preservação da elevada fertilidade, boa estruturação e condição físico-hídrica desses solos (Teixeira et al., 2010), resultados que abrem as portas para novas pesquisas. O carbono pirogênico é originado da transformação de resíduos em carvão vegetal (Glaser et al., 2002), processo que também é responsável pela produção do biocarvão. Os biocarvões são enriquecidos de estruturas de carbono aromáticas condensada, que levam a lenta decomposição por micro-organismo, dessa forma os os biocarvões são muito mais estáveis no solo do que os materiais de biomassa não carbonizados (Lehmann e Joseph, 2015).

A densidade e a porosidade são medidas relativamente simples para quantificar a compactação do solo, que podem ser complementadas com outras como a condutividade hidráulica saturada e a resistência a penetração (Colombi e Walter, 2016). A resistência a penetração é um dos atributos físicos que melhor retrata a condição de compactação do solo (Stone et al., 2002), por ser influenciada pela densidade relativa, conteúdo de água, mineralogia, textura e condição estrutural do solo (Tardieu, 1994). Outros artifícios podem ser usados para avaliar o estado de estrutura do solo e eventual restrição ao crescimento das raízes, como o índice de compactação (IC), proposto por Barber et al. (1989), calculado através da relação entre a densidade do solo e a densidade máxima, determinada no ensaio de compactação de Proctor

Estudos sobre os efeitos do biocarvão na porosidade do solo alterado pelo biocarvão, com grau relativamente alto de compactação, são escassos (Wong et al., 2018). Enquanto os efeitos da aplicação do biocarvão na condutividade hidráulica saturada do solo são inconclusivos, pois aumento, diminuição ou ausência são observados (Asai et al., 2009; Brockhoff et al., 2010; Githinji, 2014). Observa-se também a falta de dados da condutividade hidráulica saturada de solos que receberam biocarvão e foram compactados, além de informações sobre a resistência à penetração.

O presente trabalho objetivou quantificar a condutividade hidráulica em meio saturado, porosidade e a resistência à penetração em resposta ao incremento artificial do índice de compactação de misturas contendo solo e biocarvão em diferentes doses.

MATERIAIS E MÉTODOS

O biocarvão utilizado no ensaio foi produzido pelo processo de pirólise lenta a 350 °C, utilizando-se cascas de *Eucalyptus* spp. como matéria-prima. As cascas foram inicialmente secas em estufa a 105 °C até massa constante e, em seguida foram dispostas em reator de pirólise SPPT - V60. O procedimento de pirólise iniciou com taxa de aquecimento média de 5 °C min⁻¹ nos primeiros 40 min e de 5 °C min⁻¹ nos 50 finais, até atingir 350 °C. Essa temperatura foi mantida constante por mais 60 min, quando então o reator foi desligado. O biocarvão permaneceu no reator por aproximadamente 12 h, tempo necessário

para o resfriamento, sendo então recolhido e passado por moinho tipo Willey. O material moído foi passado em peneira de granulometria menor do que 0,5 mm.

Os tratamentos consistiram na combinação de três índices de compactação IC (0,8; 0,9 e 1,0) com quatro doses de biocarvão (0, 10, 20, 40 g kg⁻¹). O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados

Na condução do ensaio foram usadas amostras de horizonte B de Latossolo Vermelho textura argilosa, com 35% de areia, 3% de silte e 62% de argila. O solo foi inicialmente passado em peneira de 2 mm de malha, posteriormente foram preparadas as misturas a partir da adição de quatro doses de biocarvão (0, 10, 20, 40 g kg⁻¹). As misturas foram caracterizadas quanto a densidade do solo pelo método da proveta Embrapa (2011), densidade de partícula pelo método do picnômetro e carbono orgânico pelo método Walkley e Black (Embrapa, 2011) com 4 repetições (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores médios de densidade do solo (Ds) e densidade de partícula (Dp) e Carbono orgânico (CO) das diferentes misturas.

Dose de biocarvão (g kg ⁻¹)	0	10	20	40
Ds (g dm ⁻³)	1,13	1,13	1,12	1,09
Dp (g dm ⁻³)	2,20	2,14	2,12	1,96
CO (kg kg ⁻¹)	0,22	0,30	0,74	1,04

Para determinar a densidade máxima de Proctor utilizou-se o método indicado pela norma de Ensaio NBR 7182 (ABNT, 1986). As amostras de solo de 3 kg na dose 0 (sem tratamento com biocarvão) receberam água até que atingissem o potencial de -10 kPa. Feito isso, uma parte delas foi colocada em dois tubos superpostos do equipamento, ocupando um terço do volume, que foi submetido a 25 golpes de um soquete de 2,5 kg a uma altura de 30 cm. A operação foi repetida por 3 vezes até que se completasse os tubos. A seguir foi retirado o tubo superior, bem como o solo em excesso por meio de uma espátula, sobrando apenas o tubo inferior, cuja massa foi aferida por balança e posteriormente calculou-se a densidade da amostra úmida. Esse valor de densidade foi corrigido para densidade da amostra seca e subtraiu-se a massa de água da massa de solo úmido. A densidade então foi determinada para sete valores de umidade e foi ajustada uma equação de regressão quadrática, que possibilitou determinar o valor de umidade relacionado com a máxima

densidade, sendo esta então a umidade crítica de compactação (Saini et al., 1984).

O índice de compactação (IC) foi calculado através da relação entre a densidade do solo e a densidade máxima determinada no ensaio de compactação de Proctor.

As unidades experimentais receberam um volume de água correspondente à umidade crítica de compactação e foram homogeneizadas, seguido de repouso por 24 h para garantir a estabilização do sistema. As unidades experimentais foram formadas por tubos cilíndricos de aço inoxidável, de 4,8 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura, que foram preenchidos com diferentes massas de solo até 3 cm de altura, garantindo assim diferentes IC. A compactação artificial foi realizada com o auxílio da prensa hidráulica.

Após a compactação as unidades amostrais foram saturadas com água por 48h. Procedimento importante para eliminação das bolhas de ar presas nos poros.

As amostras foram colocadas em permeômetros de carga constante para determinar a condutividade hidráulica em meio saturado (K_{sat}) (Freire et al., 2003), com 20 repetições. Em seguida o corresponde a quatro repetições foram imediatamente transferidas à mesa de tensão para determinar a microporosidade, por equilíbrio a tensão de 60 cm de coluna de água, por 48 h (Embrapa, 2011). A porosidade total foi calculada subtraindo-se, da umidade, a relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas e a macroporosidade, subtraindo-se a microporosidade da porosidade total.

As demais amostras correspondentes aos tratamentos de -10, -30, -100 e -1500 kPa foram colocadas em equipamento de placa de pressão, com 4 repetições. Após 72 h foi determinada a resistência a penetração por meio de um penetrômetro eletrônico de bancada, modelo MA 933, da marca MARCONI, dotado de variador eletrônico de velocidade e sistema de registro de dados. Posteriormente foi determinada a umidade dos diferentes tratamentos.

Os dados foram analisados por meio de análise da metodologia da superfície de resposta e estatística descritiva. Os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste de 't' adotando-se o nível de 5% de probabilidade, no coeficiente de

determinação e no fenômeno em estudo. Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software SAEG 9.1 (UFV, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Condutividade hidráulica

O ajuste do modelo para a variável Ksat por meio de análise de regressão polinomial, evidenciou efeito quadrático para as doses de biocarvão e linear para os IC. A menor Ksat estimada pelo modelo de equação de regressão que melhor se ajustou aos dados (Figura 1) foi obtido com a aplicação da dose de 25 g kg⁻¹ de biocarvão combinado com o IC de 1. A redução da Ksat com a aplicação de biocarvão, também foi observado em outros trabalhos (Githinji, 2014; Barnes et al., 2014; Lim et al., 2016; Jacka et al., 2018). A diminuição da Ksat pode estar ligada a alguns fatores como: obstrução dos poros do solo com partículas de biocarvão, levando a diminuição fluxo de água (Barnes et al., 2014; Lim et al., 2016); diminuição da macroporosidade (Uzoma et al., 2011; Jeffery et al., 2015) e aumento do número de microporos (Hardie et al., 2014; Lim et al., 2016). Outros trabalhos evidenciam o aumento da Ksat com a aplicação do biocarvão (Oguntunde et al., 2008; Uzoma et al., 2011; Herath et al., 2013), devido a melhoria da estrutura e da porosidade do solo (Uzoma et al., 2011; Herath et al., 2013). Em outros estudos foi observado que a aplicação de biocarvão não alterou a Ksat (Laird et al., 2010; Busscher et al., 2010; Ouyang et al., 2013; Rogovska et al., 2015; Castellini et al., 2015). De acordo com Castellini et al. (2015), em solos argilosos o biocarvão pode-se comportar de forma semelhante ao próprio solo e dessa forma inalterar a Ksat.

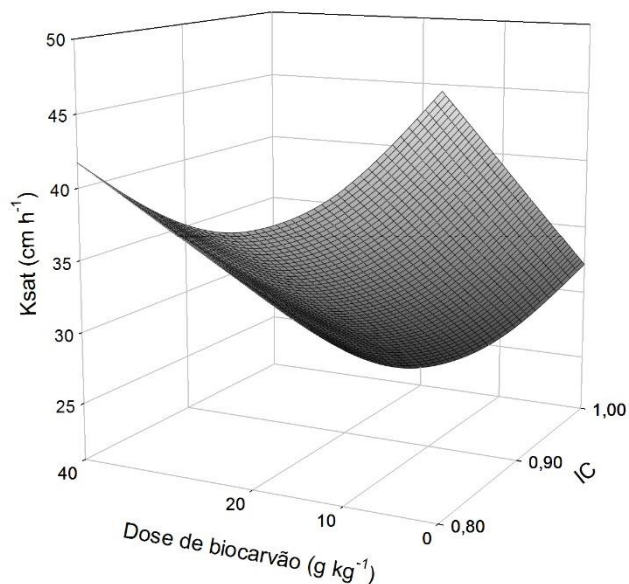


Figura 1 – Condutividade hidráulica saturada (Ksat) em função das diferentes doses de biocarvão e índice de compactação (IC). Equação de ajuste: $\hat{y} = 111,49 - 0,813^{**}dose + 0,0164^{**}dose^2 - 79,36^{**}IC$; $R^2 = 0,73$. (** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”).

Porosidade

Ao desdobrar os efeitos dos tratamentos para a variável macroporosidade verificou-se, que o modelo de equação de regressão que melhor se ajustou às doses de biocarvão e ao IC aplicados foi o quadrático (Figura 2A). Enquanto pela análise de regressão constatou-se que a microporosidade do solo aumentou linearmente com o aumento das doses de biocarvão e aplicação dos diferentes IC (Figura 2B). As doses de biocarvão e a aplicação dos IC influenciaram positivamente a microporosidade do solo. Segundo Lim et al. (2016) a distribuição do tamanho das partículas do biocarvão, controla fortemente a geometria do poro e a Ksat resultantes após a aplicação do biocarvão. Sabe-se que os macroporos são aqueles maiores que 0,05 mm, responsáveis pela infiltração, rápida redistribuição e aeração do solo (Ferreira, 2010). Logo a aplicação de biocarvão com granulometria inferior a 0,5 mm, atuou possivelmente na obstrução dos poros e na criação de microporos. Em solos de textura arenosa, com problemas de retenção de água e altas taxas de K_0 , a aplicação de biocarvão com a granulometria inferior a 0,5 mm poderia trazer resultados

vantajosos. A aplicação dos IC condicionou o melhor rearranjo das partículas do biocarvão, ou até mesmo a quebra. De acordo Naisse et al. (2015), o tamanho de partícula de biocarvão não é uma propriedade estática, podendo o mesmo se desintregar facilmente.

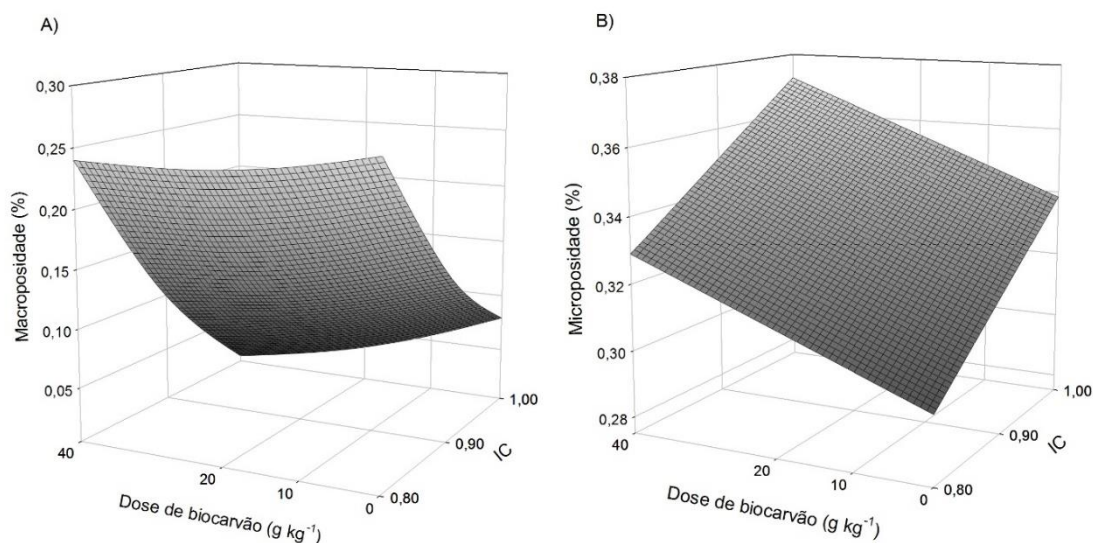


Figura 2: Macroporidade (A) em função das diferentes doses de biocarvão e índice de compactação (IC). Equação de ajuste: $\hat{y} = 2,79 - 0,007^{**}dose - 4,98^{**}IC + 0,005^{**} dose*IC + 0,00003^{**} dose^2 + 2,26^{**}IC^2$; $R^2 = 0,97$. Microporidade (B) em função das diferentes doses de biocarvão e índice de compactação (IC). Equação de ajuste: $\hat{y} = 0,12 + 0,0008^{**} dose + 0,216^{**}IC$; $R^2 = 0,73$. (** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”).

Resistência à penetração

Em relação a resistência a penetração nas diferentes tensões de água no solo, foram observados em resposta à aplicação dos diferentes IC incrementos nos valores médios de resistência à penetração, segundo Colombi et al. (2018) a resistência à penetração do solo está positivamente correlacionada com a densidade do solo. Ao observar a média geral, o IC de 0,8 para 0,9 aumentou a resistência a penetração em 7,8, 2,42, 2,5 e 7,75% nas doses de 0, 10, 20, 40 kg ha⁻¹ respectivamente, enquanto o aumento do IC de 0,9 para 1 aumentou em 41,81, 14,63, 21,78 e 12,23% nas mesmas doses (Tabela 3). Os dados mostram uma tendência de menor incremento na resistência a penetração nos tratamentos que receberam biocarvão quando ocorre o aumento do IC.

Quanto a influência das doses de biocarvão na resistência a penetração para cada IC, observou-se na média geral (Tabela 3), que a presença de biocarvão apresentou uma tendência de aumentar a resistência a penetração. Também foi observado, dados apresentados anteriormente, que a presença de biocarvão provocou a diminuição da macroporosidade e aumento da microporosidade, conseqüentemente era esperado um aumento na resistência a penetração com aplicação do biocarvão. Os resultados encontrados por Obia et al. (2017), Andrenelli et al. (2016) e Busscher et al. (2014) são contrários aos encontrados no presente estudo e mostram diminuição da resistência a penetração dos solos tratados com biocarvão, enquanto, Mukherjee et al. (2014) não observaram diferenças na resistência a penetração com a aplicação de biocarvão.

Umidade do solo

Em relação a umidade do solo nas diferentes tensões de água no solo, foram observados em resposta à aplicação dos diferentes IC incrementos nos valores médios de umidade. Ao observar a média geral, o IC de 0,8 para 0,9 aumentou a retenção de água no solo em 9,6; 21,9; 14,9 e 4,1% em nas doses 0, 10, 20, 40 kg ha⁻¹ respectivamente, enquanto o aumento do IC de 0,9 para 1 aumentou em 10,1; 2,9; 9,6 e 8,6% nas mesmas doses (Tabela 4). O aumento do IC proporcionou a criação de microporos que são os responsáveis pela retenção de água no solo. A compactação também proporcionou o aumento da retenção de água no solo em estudos realizados por Silva et al. (2006).

O incremento das doses de biocarvão proporcionou uma tendência de aumento da retenção de água no solo, corroborando com outros estudos (Laird et al., 2010; Busscher et al., 2010; Abel et al., 2013). Características como elevada área superficial específica e alta porosidade podem ser responsável por aumentar a retenção de água de solos tratados com biocarvão (Mukherjee e Lal, 2013; Obia et al., 2016).

Tabela 3. Médias e desvios padrão da resistência a penetração em função das diferentes tensões de água no solo para cada IC e dose de biochar aplicadas ao solo.

Tensão	0	10	20	40
	Índice de compactação 0,8			
kPa	MPa			
- 6	0,24 ± 0,02	0,25 ± 0,02	0,18 ± 0,01	0,23 ± 0,03
- 10	0,28 ± 0,02	0,27 ± 0,02	0,24 ± 0,01	0,30 ± 0,05
- 30	0,48 ± 0,14	0,42 ± 0,04	0,46 ± 0,06	0,35 ± 0,02
- 100	0,78 ± 0,07	0,66 ± 0,02	0,82 ± 0,03	0,74 ± 0,03
- 1500	1,28 ± 0,10	2,31 ± 0,12	2,22 ± 0,47	2,03 ± 0,03
Média	0,51	0,80	0,99	1,29
	Índice de compactação 0,9			
	MPa			
- 6	0,24 ± 0,02	0,24 ± 0,03	0,27 ± 0,03	0,30 ± 0,01
- 10	0,30 ± 0,02	0,33 ± 0,04	0,31 ± 0,02	0,30 ± 0,01
- 30	0,47 ± 0,08	0,47 ± 0,17	0,37 ± 0,06	0,43 ± 0,06
- 100	0,86 ± 0,10	0,75 ± 0,15	0,93 ± 0,08	0,86 ± 0,08
- 1500	1,41 ± 0,09	2,01 ± 0,63	2,16 ± 0,37	2,44 ± 0,25
Média	0,55	0,82	1,01	1,39
	Índice de compactação 1,0			
	MPa			
- 6	0,33 ± 0,03	0,40 ± 0,01	0,42 ± 0,02	0,36 ± 0,03
- 10	0,46 ± 0,05	0,44 ± 0,02	0,50 ± 0,04	0,46 ± 0,03
- 30	0,61 ± 0,06	0,60 ± 0,08	0,59 ± 0,13	0,61 ± 0,08
- 100	0,92 ± 0,06	0,98 ± 0,03	1,06 ± 0,09	1,09 ± 0,05
- 1500	2,35 ± 0,09	2,24 ± 0,63	2,83 ± 0,37	2,87 ± 0,25
Média	0,78	0,94	1,23	1,56

Tabela 4. Médias e desvios padrão da umidade em função das diferentes tensões de água no solo para cada IC e dose de biochar aplicadas ao solo.

Tensão	0	10	20	40
Índice de compactação 0,8				
kPa	kg kg ⁻¹			
- 6	0,39 ± 0,02	0,38 ± 0,01	0,39 ± 0,01	0,40 ± 0,001
- 10	0,36 ± 0,01	0,37 ± 0,03	0,37 ± 0,03	0,48 ± 0,01
- 30	0,33 ± 0,01	0,30 ± 0,06	0,36 ± 0,01	0,36 ± 0,01
- 100	0,30 ± 0,01	0,31 ± 0,001	0,32 ± 0,01	0,32 ± 0,01
- 1500	0,27 ± 0,03	0,26 ± 0,01	0,27 ± 0,01	0,29 ± 0,03
Média	0,33	0,32	0,34	0,37
Índice de compactação 0,9				
	kg kg ⁻¹			
- 6	0,41 ± 0,02	0,43 ± 0,01	0,42 ± 0,03	0,46 ± 0,001
- 10	0,39 ± 0,01	0,42 ± 0,04	0,46 ± 0,03	0,43 ± 0,01
- 30	0,39 ± 0,03	0,38 ± 0,001	0,41 ± 0,04	0,39 ± 0,01
- 100	0,34 ± 0,001	0,35 ± 0,02	0,35 ± 0,001	0,36 ± 0,01
- 1500	0,28 ± 0,01	0,29 ± 0,001	0,31 ± 0,03	0,29 ± 0,01
Média	0,36	0,39	0,39	0,39
Índice de compactação 1,0				
	kg kg ⁻¹			
- 6	0,46 ± 0,01	0,45 ± 0,007	0,47 ± 0,01	0,49 ± 0,02
- 10	0,43 ± 0,01	0,44 ± 0,007	0,45 ± 0,01	0,45 ± 0,10
- 30	0,42 ± 0,01	0,42 ± 0,01	0,43 ± 0,01	0,43 ± 0,01
- 100	0,38 ± 0,01	0,39 ± 0,004	0,44 ± 0,01	0,39 ± 0,10
- 1500	0,32 ± 0,008	0,33 ± 0,01	0,35 ± 0,03	0,33 ± 0,02
Média	0,40	0,41	0,43	0,42

CONCLUSÃO

A aplicação de biocarvão e do índice de compactação reduziram a condutividade hidráulica saturada e a macroporosidade do solo.

A microporosidade, resistência à penetração e a retenção de água no solo aumentaram com aplicação do biocarvão e dos índices de compactação e com a aplicação do biocarvão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEL, Stefan et al. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma**, v. 202, p. 183-191, 2013.
- ANDRENELLI, M. C. et al. Field application of pelletized biochar: Short term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 190-196, 2016.
- ASAI, H. et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPA and grain yield. **Field Crops Research**, v.111, n. 1-2, p. 81-84, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo: ensaio de compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas.** Rio de Janeiro. 1986.
- BARBER, R. G.; HERRERA, C.; DÍAZ, O. Compaction status and compaction susceptibility of alluvial soils in Santa Cruz, Bolivia. **Soil and Tillage Research**, v. 15, n. 1-2, p. 153-167, 1989.
- BARNES, R. T. et al. Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments. **Public Library of Science**, v. 9, n. 9, p. e108340, 2014.
- BATEY, T. Soil compaction and soil management—a review. **Soil use and management**, v. 25, n. 4, p. 335-345, 2009.
- BROCKHOFF, S. R. et al. Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar. **Agronomy Journal**, v. 102, n. 6, p. 1627-1631, 2010.
- BUSSCHER, W. J. et al. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand. **Soil Science**, v. 175, n. 1, p. 10-14, 2010.
- CASTELLINI, M. et al. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 1-13, 2015.
- CELIK, I. et al. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions. **Geoderma**, v. 160, p. 236-243, 2010.
- COLOMBI, T. et al. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth—A vicious circle. **Science of the Total Environment**, v. 626, p. 1026-1035, 2018.

COLOMBI, T.; WALTER, A. Root responses of triticale and soybean to soil compaction in the field are reproducible under controlled conditions. **Functional plant biology**, v. 43, n. 2, p. 114-128, 2016.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa, 2011. 230 p.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. **Física do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1-27, 2010.

FREIRE, M. B. G. D. S. et al. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 45-52, 2003.

GITHINJI, L. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 60, n. 4, p. 457–470, 2014.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review, **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, n. 4, p. 219-230, 2002.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and tillage research**, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005.

HARDIE, M. et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability. **Plant and Soil**, v. 376, n. 1-2, p. 347-361, 2014.

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

JACĀKA, L. et al. Biochar presence in soil significantly decreased saturated hydraulic conductivity due to swelling. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 181-185, 2018.

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

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Agronômica Ceres, 1985.

LAIRD, D. A. et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, v. 158, n. 3-4, p. 443-449, 2010.

LEHMANN, Johannes; JOSEPH, Stephen (Ed.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. Routledge, 2015

LIM, T. J. et al. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. **Chemosphere**, v. 142, p. 136-144, 2016.

MUKHERJEE, A.; LAL, R.; ZIMMERMAN, A. R. Impacts of 1.5-year field aging on biochar, humic acid, and water treatment residual amended soil. **Soil Science**, v. 179, n. 7, p. 333-339, 2014.

MUKHERJEE, Atanu; LAL, Rattan. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. **Agronomy**, v. 3, n. 2, p. 313-339, 2013

NAISSE, C. et al. Effect of physical weathering on the carbon sequestration potential of biochars and hydrochars in soil. **Gcb Bioenergy**, v. 7, n. 3, p. 488-496, 2015.

OBIA, A. et al. Effect of biochar on crust formation, penetration resistance and hydraulic properties of two coarse-textured tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 170, p. 114-121, 2017.

OBIA, A. et al. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 35-44, 2016.

OGUNTUNDE, P. G. et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 4, p. 591-596, 2008.

OUYANG, L. et al. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 13, n. 4, p. 991-1002, 2013.

PARTON, W. J. et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, n. 5, p. 1173-1179, 1987.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos Ciência do Solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

ROGOVSKA, Natalia; LAIRD, David A.; KARLEN, Douglas L. Corn and soil response to biochar application and stover harvest. **Field crops research**, v. 187, p. 96-106, 2016.

SAEG. Sistema para análises estatísticas, Versão 9.1: **Fundação Arthur Bernardes**. Viçosa- UFV-Viçosa, 2007.

- SAINI, G. R.; CHOW, T. L.; GHANEM, I. Compactibility indexes of some agricultural soils of New Brunswick, Canada. **Soil science**, v. 137, n. 1, p. 33-38, 1984.
- SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 842-847, 2006.
- SILVA, V. R. et al. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two Brazilian Oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p.1097-1104, 2009.
- STONE, Luís F.; GUIMARÃES, Cleber M.; MOREIRA, José AA. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.
- TARDIEU, François. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signalling?. **Soil and Tillage Research**, v. 30, n. 2-4, p. 217-243, 1994.
- TEIXEIRA, W. G. et al. As propriedades físicas e hídricas dos horizontes antrópicos das terras pretas de índio na Amazônia Central. **Embrapa Amazônia Ocidental-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2010.
- TRACY, S. R. et al. Soil compaction: a review of past and present techniques for investigating effects on root growth. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 91, n. 9, p. 1528-1537, 2011.
- UZOMA, K. C. et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. **Soil use and management**, v. 27, n. 2, p. 205-212, 2011.
- VAN DEN AKKER, J. J. H.; CANARACHE, A. Two European concerted actions on subsoil compaction. **Landnutzung und Landentwicklung**, v. 42, n. 1, p. 15-22, 2001.
- WANG, Y.; AMUNDSON, R.; NIU, X.F. Seasonal and altitudinal variation in decomposition of soil organic matter inferred from radiocarbon measurements of soil CO₂ flux. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, n. 1, p. 199-211, 2000.
- WONG, J. T. F. et al. Effects of biochar on hydraulic conductivity of compacted kaolin clay. **Environmental Pollution**, v. 234, p. 468-472, 2018.

6. CONCLUSÃO GERAL

O nitrogênio como gás de arraste não alterou características que possam justificar o seu uso na produção do biocarvão.

Os ganhos de retenção de água promovidos pelo biocarvão não são suficientes para enfrentar problemas de restrição hídrica nas condições que foram conduzido o estudo.

O uso do biocarvão melhora as condições de fertilidade do solo e levam ao melhor desenvolvimento das plantas de milho.

A aplicação do biocarvão afeta diretamente características físicas do solo, com aumento da microporosidade, resistência à penetração, retenção de água e diminuição macroporosidade do solo.