

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

RONALDO WILLIAN DA SILVA

**BIOCARVÕES DE PALHA DE CAFÉ E CASCA DE EUCALIPTO PRODUZIDOS  
A 350 E 600 °C COMO CONDICIONADORES DO SOLO**

ALEGRE - ES

2017

RONALDO WILLIAN DA SILVA

**BIOCARVÕES DE PALHA DE CAFÉ E CASCA DE EUCALIPTO PRODUZIDOS  
A 350 E 600 °C COMO CONDICIONADORES DO SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal na área de concentração Solos e Nutrição de Plantas. Orientador: Prof. D.Sc. Renato Ribeiro Passos

ALEGRE - ES

2017


RONALDO WILLIAN DA SILVA


**BIOCARVÕES DE PALHA DE CAFÉ E CASCA DE EUCALIPTO PRODUZIDOS  
A 350 E 600 °C COMO CONDICIONADORES DO SOLO**


Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal na área de concentração Solos e Nutrição de Plantas.


Aprovada em 23 de fevereiro de 2017

**COMISSÃO EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sc. Renato Ribeiro Passos  
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias – UFES  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sc. Felipe Vaz Andrade  
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias – UFES  
Coorientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Ph. D. Eduardo de Sá Mendonça  
Universidade Federal do Espírito Santo

  
\_\_\_\_\_  
Prof. D. Sc. Otacílio José Passos Rangel  
Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Espírito Santo – Campus de Alegre

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)

(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

Silva, Ronaldo Willian da, 1990-

S586b Biocarvões de palha de café e casca de eucalipto produzidos a 350 e 600°C como condicionadores do solo / Ronaldo Willian da Silva. – 2017.

67 f. : il.

Orientador: Renato Ribeiro Passos.

Coorientador: Felipe Vaz Andrade.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Biochar. 2. Pirólise. 3. Solos ácidos. 4. Solos – Fertilidade. I. Passos, Renato Ribeiro. II. Andrade, Felipe Vaz. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 63

---

***Dedico***

*Aos meus queridos pais, Nair e José.*

*Aos meus irmãos, Reginaldo e Michelli.*

*Aos meus avós, Antônio (in memoriam) e Maria Lúcia.*

*E a todos os amigos que de forma direta e indireta fizeram parte desta trajetória.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela presença constante em minha vida, por estar sempre ao meu lado e por sempre me mostrar o caminho mesmo nas horas mais difíceis.

A minha família, em especial a minha mãe Nair Aparecida da Silva que sempre esteve ao meu lado me apoiando em todas as etapas de minha vida.

Ao meu orientador, professor Dr. Renato Ribeiro Passos pela orientação, apoio e confiança depositada e que, com certeza é um grande responsável pela minha formação.

Ao meu Coorientador, Prof. Dr. Felipe Vaz Andrade, pela parceria, sugestões, orientação e pelas contribuições no desenvolvimento da pesquisa.

Aos Professores Dr. Eduardo de Sá Mendonça e Dr. Otacílio José Passos Rangel, componentes da banca de defesa de projeto e da banca examinadora de defesa, pelas sugestões na implantação do projeto e pelas importantes sugestões para finalização deste trabalho.

Ao amigo e colega de curso, doutorando Danilo Andrade, pela grande ajuda com as análises estatísticas e confecções gráficas.

Aos amigos da iniciação científica Laís, Liliane, Lazaro e Cássio que contribuíram diretamente nas análises deste trabalho.

Aos amigos técnicos do laboratório de solos, Marcelo e Soninha, pela amizade e contribuição no andamento das atividades.

Aos amigos do laboratório de solos, que em nossas conversas também deram sua contribuição, em especial ao Fabiano e Ramires.

A todos os professores e funcionários pela amizade e pelos ensinamentos e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pelo ensino de qualidade, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Campus Alegre, pela oportunidade de realização deste curso.

A CAPES - Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, pela concessão de bolsa de auxílio aos estudos.

A Cristiane Francisca pelo início desta pesquisa e auxílio na execução deste trabalho, pelo apoio e pela grande amizade.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho e finalização desse mestrado mesmo quando o futuro parecia incerto.

Muito Obrigado!

## RESUMO GERAL

SILVA, Ronaldo Willian, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, Fevereiro de 2017. **Biocarvões de palha de café e casca de eucalipto produzidos a 350 e 600 °C como condicionadores do solo.** Orientador Prof. D Sc. Renato Ribeiro Passos. Coorientador Prof. D Sc. Felipe Vaz Andrade.

A matéria orgânica do solo (MOS) é de grande importância na formação e manutenção de propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos tropicais e, contribui com até 80 % de sua capacidade de troca catiônica. No entanto, em regiões tropicais, a taxa de mineralização da MOS atinge altos níveis devido a altas temperaturas, umidade e a atividade microbiana, reduzindo sua quantidade nos solos. Uma alternativa para a manutenção da MOS é a utilização de biocarvão, produto da decomposição térmica de materiais orgânicos sob baixa concentração de oxigênio e em temperaturas controladas. O biocarvão é mais resistente à degradação biológica é indicado como alternativa promissora para armazenar carbono no solo por longo tempo. Além disso, sua presença no solo pode aumentar o pH, CTC, nutrientes, retenção de água, atividade biológica do solo e o rendimento das culturas. No entanto, as características e benefícios do biocarvão estão associados com a temperatura de pirólise e a matéria prima utilizada para o seu processamento. Neste sentido, com o objetivo de avaliar o potencial de biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE) produzidos a 350 e 600 °C como condicionadores do solo, realizaram-se dois experimentos de incubação em ambiente com temperatura controlada a 25 °C. O primeiro experimento visou avaliar a influência dos biocarvões associado ao calcário, sobre o pH e cargas negativas do solo. Os tratamentos foram compostos por biocarvões produzidos a partir de PC e CE, duas temperaturas finais de pirólise 350 e 600 °C, quatro doses de biocarvão 5, 10, 15 e 20 t ha<sup>-1</sup>, cinco doses de CaCO<sub>3</sub> 0, 0.55, 1.1, 2.2 e 3.3 t ha<sup>-1</sup> e um tratamento adicional sem adição de biocarvão. O segundo experimento teve como objetivo avaliar os efeitos do uso dos biocarvões nas propriedades químicas do solo. Os tratamentos foram compostos por biocarvões produzidos a partir de PC e CE, duas temperaturas finais de pirólise 350 e 600 °C, quatro doses de biocarvão 5, 10, 15 e 20 t ha<sup>-1</sup>, um tratamento adicional sem adição de biocarvão e sete épocas de avaliação 0, 7, 15, 30, 60, 90 e 120 dias após a incubação. Os resultados experimentais mostram que biocarvões de PC promovem maior elevação do pH do solo.

Biocarvões produzidos a 600 °C proporcionaram maior elevação do pH do solo em relação à biocarvões produzidos a 300 °C. O efeito neutralizante da acidez pelos biocarvões se deu na seguinte ordem crescente: CE350; PC350; CE600 e PC600, apresentando elevação no pH do solo quando comparado ao tratamento controle de 1,26; 1,46; 1,61 e 1,71 unidades respectivamente. O pH do solo foi elevado com o aumento da dose de aplicação de biocarvão. A associação de doses de biocarvão com CaCO<sub>3</sub> apresentou interação positiva no aumento do pH do solo. No entanto, o uso em conjunto do corretivo e o condicionador, em doses mais altas elevou o pH do solo além da faixa de pH ideal para a maioria das culturas (5,5 – 6,0). Biocarvões proporcionaram maior carga líquida negativa do solo. Esse efeito foi maior com o uso de biocarvões de PC, e potencializado com elevação da temperatura de pirólise para 600 °C. Os biocarvões de PC proporcionaram maiores teores de P, K, Mg e maior capacidade de troca de cátions (CTC). Os tratamentos com biocarvões de CE se destacaram pela maior concentração de Ca, em média, os teores de Ca no solo foram acrescidos em 5,9 e 19,4 % para as temperaturas de 350 e 600 °C respectivamente comparando aos biocarvões de PC nas mesmas temperaturas. Tratamentos com biocarvões produzidos em maior temperatura de pirólise (600 °C) apresentaram maiores valores de Ca e CTC para ambos os biocarvões e, maior concentração de K com uso do biocarvão de PC. O aumento da dose de biocarvão proporcionou maior concentração de nutrientes e CTC independente do material de origem e temperatura de pirólise. Já o aumento do tempo de incubação causou redução, para todos os tratamentos, nas concentrações de nutrientes, exceto o Ca e CTC do solo.

**PALAVRAS-CHAVE:** biochar, pirólise, acidez do solo, fertilidade do solo



## GENERAL ABSTRACT

SILVA, Ronaldo Willian da, Center of Agrarian Sciences of the Federal University of Espírito Santo, February of 2017. **Biochar of coffee straw and eucalyptus bark produced at 350 and 600 ° C as soil conditioners.** Advisor Prof. D Sc. Renato Ribeiro Passos. Co advisor Prof. D Sc. Felipe Vaz Andrade.

Soil organic matter (SOM) is of great importance in the formation and maintenance of chemical, physical and biological properties of tropical soils and contributes up to 80 % of its cation exchange capacity (CEC). However, in tropical regions, the rate of mineralization of SOM reaches high levels due to high temperatures, humidity and microbial activity, reducing its amount in soils. An alternative to the maintenance of SOM is the use of biochar, the product of thermal decomposition of organic materials under low oxygen concentration and controlled temperatures. The biochar is more resistant to biological degradation is indicated as a promising alternative to store soil carbon for a long time. In addition, its presence in soil can increase pH, CEC, nutrients, water retention, soil biological activity and crop yield. However, the characteristics and benefits of biochar are associated with the pyrolysis temperature and the raw material used for its processing. In this sense, with the objective of evaluating the potential of biochar of coffee straw (CS) and eucalyptus bark (EB) produced at 350 and 600 °C as soil conditioners, two incubation experiments were carried out in a controlled temperature environment 25 °C<sup>±1</sup>. The first experiment was aimed at evaluating the influence of the biochars associated to CaCO<sub>3</sub> in the pH and soil negative charges. The treatments were composed of biochars produced from CS and EB, two final pyrolysis temperatures 350 and 600 °C, four doses of biochar, 5; 10; 15 and 20 t ha<sup>-1</sup>, five doses of CaCO<sub>3</sub> 0.00; 0.55; 1.10; 2.20 and 3.30 t ha<sup>-1</sup> and an additional treatment without addition of biochar. The second experiment had as objective to evaluate the effects of the use of the biochars in the chemical properties of the soil. The treatments were composed of biochars produced from CS and EB, two final pyrolysis temperatures 350 and 600 °C, four doses of biochar, 5; 10; 15 and 20 t ha<sup>-1</sup>, an additional treatment without addition of biochar and seven seasons. Of evaluation 0; 7; 15; 30; 60; 90 and 120 days after incubation. The experimental results show that CS biochars promote higher soil pH elevation. The neutralizing effect of acidity by biochars occurred in the following growing order: EB350; CS350; EB600 and CS600, showing elevation in soil pH

when compared to the control treatment of 1.26; 1.46; 1.61 and 1.71 units, respectively. The pH of the soil was elevated with the increase of the application dose of biochar. The association of doses of biochar with  $\text{CaCO}_3$  showed a positive interaction in the increase of pH of the soil. However, the use of the corrective and the conditioner at higher doses raised soil pH beyond the ideal pH range for most crops (5.5 - 6.0). Biochars provided higher negative net soil load. This effect was greater with the use of CS biochars, and potentiated with raising the pyrolysis temperature to 600 °C. CS biochars provided higher levels of P, K, Mg and higher cation exchange capacity (CEC). The treatments with EB biochars were highlighted by the higher concentration of Ca, on average the Ca contents in the soil were increased by 5.9 and 19.4% for the temperatures of 350 and 600 °C respectively, comparing to the CS biochars in the same temperatures. Treatments with biochars produced at higher pyrolysis temperature (600 °C) showed higher Ca and CEC values for both biochars, and higher K concentration with CS biochar. The increase of the biochar dose gave a higher concentration of nutrients and CEC independent of the source material and pyrolysis temperature. However, the increase in incubation time caused a reduction, for all treatments, in nutrient concentrations, except the Ca and CEC of the soil.

**KEY WORDS:** biochar, pyrolysis, soil acidity, soil fertility

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

**Figura 1-** Valores de pH em água (H<sub>2</sub>O) em função de doses de CaCO<sub>3</sub> e dos biocarvões PC350 (A), CE350(B), PC600 (C) e CE600 (D).....27

**Figura 2-** Valores de pH em cloreto de potássio (KCl) em função de doses de CaCO<sub>3</sub> e dos biocarvões PC350 (A), CE350(B), PC600 (C) e CE600 (D).....28

**Figura 3-** Valores de pH em cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>) em função de doses de CaCO<sub>3</sub> e dos biocarvões PC350 (A), CE350(B), PC600 (C) e CE600 (D).....29

**Figura 4-** Carga líquida de superfície, representada por ΔpH em função de doses dos biocarvões PC350; PC600; CE350 e CE600.....30

### CAPÍTULO 2

**Figura 1-** Fósforo (P) disponível no solo em função de doses dos biocarvões PC350 (A), CE350 (B), PC600 (C), CE600 (D) e tempos de avaliação.....51

**Figura 2-** Teor de potássio trocável (K) no solo em função de doses dos biocarvões PC350 (A), CE350 (B), PC600 (C), CE600 (D) e tempos de avaliação.....52

**Figura 3-** Teor de cálcio (Ca) no solo em função de doses de biocarvão.....53

**Figura 4-** Teor de magnésio (Mg) no solo em função de doses dos biocarvões PC350 (A), CE350 (B), PC600 (C), CE600 (D) e tempos de avaliação.....54

**Figura 5-** Capacidade de troca catiônica (CTC) no solo em função de doses dos biocarvões PC350 (A), CE350 (B), PC600 (C), CE600 (D) e tempos de avaliação.....55

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 1

**Tabela 1-** Características químicas dos biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE) pirolisados na temperatura de 350 °C e 600 °C.....23

**Tabela 2-** Características químicas e físicas do solo utilizado no experimento .....24

**Tabela 3-** Valores médios de pH e  $\Delta$ pH do solo tratado com biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE) produzidos nas temperaturas de 350 e 600 °C.....26

### CAPITULO 2

**Tabela 1-** Características químicas dos biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE) pirolisados na temperatura de 350 °C e 600 °C.....46

**Tabela 2-** Características químicas e físicas do solo utilizado no experimento .....46

**Tabela 3-** Necessidade de  $\text{CaCO}_3$  (NC) e quantidades de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{CaCl}_2$  aplicados em cada tratamento para elevar o pH do solo a 6,1 e padronizar os teores de Ca adicionado nos tratamentos.....48

**Tabela 4-** Teores médios de nutrientes e valores de CTC do solo para os biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE) produzidos nas temperaturas de 350 e 600 °C.....50

**BIOCARVÕES DE PALHA DE CAFÉ E CASCA DE EUCALIPTO PRODUZIDOS  
A 350 E 600 °C COMO CONDICIONADORES DO SOLO**

**SUMÁRIO**

RESUMO GERAL .....	iii
GENERAL ABSTRACT .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	viii
1 INTRODUÇÃO GERAL .....	11
2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15

**CAPÍTULO 1 - EFEITO DO BIOCARVÃO E CaCO<sub>3</sub> SOBRE O pH E GERAÇÃO  
DE CARGAS NEGATIVAS NO SOLO**

1 RESUMO .....	19
2 ABSTRACT .....	20
3 INTRODUÇÃO .....	21
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	22
4.1 Produção e Características dos Biocarvões .....	22
4.2 Solo Utilizado .....	24
4.3 Montagem e Condução do Experimento .....	24
4.4 Análises de pH e Calculo do $\Delta$ pH .....	25
4.5 Análises Estatísticas .....	25
5 RESULTADOS .....	25
6 DISCUSSÃO .....	30
7 CONCLUSÕES .....	33
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35

**CAPÍTULO 2 - EFEITO DE BIOCARVÕES DE PALHA DE CAFÉ E CASCA DE  
EUCALIPTO SOBRE A FERTILIDADE DO SOLO**

1 RESUMO .....	41
2 ABSTRACT .....	42
3 INTRODUÇÃO.....	43
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	44

4.1 Produção e Características dos Biocarvões .....	45
4.2 Solo Utilizado .....	46
4.3 Montagem e Condução do Experimento .....	47
4.4 Análises Químicas .....	48
4.5 Análises Estatísticas .....	49
5 RESULTADOS .....	49
6 DISCUSSÃO .....	55
7 CONCLUSÕES .....	58
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	66

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Solos de regiões tropicais são caracterizados geralmente pelo seu alto grau de intemperismo com presença predominante de minerais com baixa atividade de carga negativa, acidez elevada, baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e pouca disponibilidade de nutrientes (LAIRDE et al., 2010).

A matéria orgânica do solo (MOS) é de grande importância na formação e manutenção de propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos tropicais, contribuindo com até 80 % de sua CTC (PACHECO; PETTER, 2011). No entanto, em regiões tropicais, a taxa de mineralização da MOS atinge altos níveis na decomposição de resíduos devido a altas temperaturas, umidade e a atividade microbiana, ambos os quais reduzem a quantidade destes no solo (TORRES et al., 2005).

Devido à alta taxa de mineralização da MOS, sua manutenção nestes solos é dificultada e exige-se maior deposição de resíduos orgânicos. Dessa forma, uma alternativa é a utilização de materiais orgânicos mais estáveis que podem aumentar a fertilidade e o estoque de carbono (C) no solo (RITTIL et al., 2015). Em geral, materiais mais recalcitrantes são de difícil acesso aos microrganismos e podem contribuir para o acúmulo da MOS (SIX et al., 2002).

Biocarvão é o termo que define um material específico para uso no solo, constituído por alto teor de C, em estruturas que são responsáveis pela elevada resistência à degradação. Esse material é obtido pelo processo de pirólise, no qual ocorre a conversão térmica de materiais orgânicos em condições limitadas de oxigênio e em temperaturas de até 700 °C (LEHMANN; JOSEPH, 2009), que se mantém durante um determinado tempo, resultando na produção de gases não condensáveis, um produto líquido (bio-óleo) e um sólido (biocarvão) (EBC, 2012). Atualmente, o uso do biocarvão tem se destacado devido aos potenciais benefícios para a agricultura, o ambiente e o clima (ABIVEN et al., 2014).

O biocarvão é indicado como alternativa promissora para armazenar C no solo por longo tempo, levando potencialmente a uma redução significativa na emissão de gases de efeito de estufa (GEE) do solo para a atmosfera (AGEGNEHU et al., 2016; SOHI et al., 2010). Além disso, sua presença no solo é relatada para aumentar o pH, CTC e nutrientes (FIDEL et al., 2017; YUAN et al., 2011), retenção de água e condutividade hidráulica do solo (SULIMAN et al., 2017; LIM et al., 2016), aumento da atividade biológica do solo

(LEHMANN et al., 2011) e o rendimento das culturas (LIU et al., 2016; PENG et al., 2011; VAN ZWIETEN et al., 2010).

A eficácia do uso de biocarvão no solo é altamente dependente das características de cada biocarvão (JEFFREY et al., 2015; LEHMANN et al., 2006; VAN ZWIETEN et al., 2010). As características do biocarvão dependem de vários fatores, dentre eles, os principais são as características da matéria prima e a temperatura de pirólise (BASU, 2013; TAG et al., 2016).

Várias pesquisas relatam a contribuição de biocarvões provenientes de diversas fontes no aumento da concentração de nutrientes no solo (WANG et al., 2014; YUAN; XU, 2011; RABILEH et al., 2015). Dentre eles, Jin et al. (2013) e Lee et al. (2013) destacam elevados teores de Ca provenientes de biocarvões obtidos a partir de cascas de madeira. Maiores teores de K e P foram relatados em biocarvões provenientes de resíduos de culturas agrícolas (ZHAO et al. 2013).

À medida que a temperatura de pirólise aumenta, os componentes alifáticos da matéria prima serão gradualmente oxidados e convertidos em compostos aromáticos e assim o produto tem grandes diferenças nas propriedades físicas e químicas em comparação com a matéria prima original (DAI et al., 2017).

Conforme eleva-se a temperatura de pirólise, ocorre aumento de cinzas, pH, condutividade elétrica, grupos funcionais básicos, estabilidade do C e o conteúdo total de C, P, K, Ca e Mg. Já o rendimento do biocarvão e os teores totais de O, H, N, S e grupos funcionais ácidos são reduzidos (AL-WABEL et al., 2013). Isso se dá devido à concentração dos nutrientes, uma vez que o aumento de temperatura fará volatilizar, seletivamente, O e H principalmente, concentrando C e os demais nutrientes não-voláteis à faixa de temperatura normalmente empregada na pirólise (NOVAK et al., 2009).

Efeitos observados na fertilidade do solo com o uso de biocarvão têm sido explicados principalmente por um aumento de pH em solos ácidos (VAN ZWIETEN et al., 2010). Geralmente, os biocarvões são de natureza alcalina e, portanto, podem em condições específicas de solo e material utilizado, elevar o pH do solo reduzindo a acidez e neutralizando o  $Al^{3+}$  (DAI et al., 2017; FIDEL et al., 2017). No entanto, deve-se estar atento ao utilizar biocarvões em conjunto com o calcário para não elevar o pH do solo além da faixa ideal para as culturas.

A alcalinidade do biocarvão é um fator importante na redução da acidez do solo (DAI et al., 2017). Yuan e Xu, (2011) observaram que o aumento no pH do solo foi



fortemente correlacionado com a alcalinidade do biocarvão utilizado ( $R^2 = 0,95$ ). Yuan et al. (2011) constataram que, embora carbonatos e óxidos sejam os principais componentes que contribuem para a alcalinidade, os grupos funcionais do biocarvão como ligação simples  $\text{COO}^-$  e  $\text{O}^-$  também contribuíram muito para a alcalinidade do biocarvão quando pirolisados a temperaturas mais baixas (300-500 °C).

Muitas são as matérias primas que podem ser destinadas à produção de biocarvão, tanto de origem animal quanto vegetal, entretanto, os resíduos de origem florestal e agrícola formam uma categoria interessante de matéria prima que pode ser explorada. São materiais de baixo valor, com utilização limitada e elevados custos de recolha (VERHEIJEN et al., 2010).

Dentre as matérias primas disponíveis para a produção de biocarvão destaca-se em algumas regiões brasileiras a palha de café e a casca de eucalipto. O Brasil é o maior produtor mundial de café e estima-se que são geradas cerca de 1,5 milhões de toneladas de palha por ano (PASSOS et al., 2016). Os resíduos de casca de eucalipto são provenientes do beneficiamento da madeira. O eucalipto é a espécie florestal mais plantada no Brasil, estima-se que esse setor gere cerca de 56,1 milhões de  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  de resíduos (PASSOS et al., 2016). Estes resíduos são normalmente acumulados em grandes quantidades nas proximidades de suas unidades de beneficiamento, tornando-se um problema ambiental em potencial.

No Espírito Santo, a Portaria N° 23-R, de 2 de dezembro de 2003, proíbe o uso de palha de café, cama de aviário, sobra de arraçamento animal ou qualquer outro material semelhante em fase de decomposição como fonte de material orgânico, sem o uso das técnicas de controle da mosca-dos-estábulo, *Stomoxys calcitrans*. A utilização dos resíduos orgânicos citados na Portaria só poderá ser realizada após o completo processo de fermentação ou com o uso de técnicas de controle da mosca. A estabilização destes materiais na forma de biocarvão visa, além da produção de um condicionador do solo, o atendimento de uma premissa legal, possibilitando a utilização agrícola da palha de café e casca de eucalipto.

Diante do exposto e com a hipótese que o uso de biocarvão aumenta o pH, a CTC e a disponibilidade de nutrientes melhorando conseqüentemente a fertilidade do solo, e que este efeito varia conforme a matéria prima utilizada, temperatura de pirólise, dose aplicada e tempo de incubação, este trabalho objetivou avaliar o potencial de biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE) produzidos a 350 e 600 °C como condicionadores do

solo, por intermédio de dois experimentos de incubação em ambiente com temperatura controlada a  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$ . O primeiro experimento visou avaliar a influência dos biocarvões citados, associado ao calcário sobre o pH e cargas negativas do solo. O segundo experimento teve como objetivo avaliar os efeitos do uso dos biocarvões nas propriedades químicas do solo.

## 2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIVEN, S.; SCHMIDT, M. W. I.; LEHMANN, J. Biochar by design. *Nature Geoscience*, v. 7, p. 326-327, 2014.

AGEGNEHU, G.; BASS, ADRIAN M. NELSON, P. N.; BIRD, M. I. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, v. 543, p. 295-306, 2016.

AL-WABEL, M. I.; AL-OMRAN, A.; EL-NAGGAR, A. H.; NADEEM, M.; USMAN, A. R. A. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. *Bioresource Technology*, v. 131, p. 374-379, 2013.

BASU, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory Pyrolysis. Elsevier Inc., 2.ed. 2013. 548 p.

DAI, Z.; ZHANG, X.; TANG, C.; MUHAMMAD, N.; WU, J.; BROOKES, P. C.; XU, J. Potential role of biochars in decreasing soil acidification - A critical review. *Science of the Total Environment*, 2017.

EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATE - EBC. Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. European Biochar Foundation, Arbaz, Switzerland. Version 6.1 of 19th June, p. 1-22, 2012.

FIDEL, R. B.; LAIRD, D. A.; THOMPSON, M. L.; LAWRENKO, M. Characterization and quantification of biochar alkalinity. *Chemosphere*, v. 167, p. 367-373, 2017.

JEFFERY, S.; MEINDERS, M. B. J.; STOOF, C. R.; BEZEMER, T. M.; VAN DE VOORDE, T. F. J.; MOMMER, L.; VAN GROENIGEN, J. W. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. *Geoderma*, v. 251-252, p. 47-54, ago. 2015.

JIN, W.; SINGH, K.; ZONDLO, J. Pyrolysis Kinetics of Physical Components of Wood and Wood-Polymers Using Isoconversion Method. *Agriculture*, v. 3, p. 12-32, 2013.

LAIRD, D.; FLEMING, P.; WANG, B.; HORTON, R.; KARLEN, D. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, v. 158, p. 436-442, 2010.

LEE, Y.; PARK, J.; RYU, C.; GANG, K. S.; YANG, W.; PARK, Y. K.; HYUN, S. Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C. *Bioresource Technology*, Oxford, v. 148, p. 196-201, 2013.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 11, p. 395-419, 2006.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: an introduction. In: \_\_\_\_\_. (Ed.). *Biochar for environmental management science and technology*. New York: Earthscan 2009. p. 1-9.

LEHMANN, J.; RILLIG, M.; THIES, J.; MASIELLO, C.; HOCKADAY, W.C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota: a review. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 43, p. 1812-1836, 2011.

LIM, T. J.; SPOKAS, K. A.; FEYEREISEN, G.; NOVAK, J. M. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*, v. 142, p. 136-144, 2016.

LIU, Y.; LUA, H.; YANG, S.; WANG, Y. Impacts of biochar addition on rice yield and soil properties in a coldwaterlogged paddy for two crop seasons. *Field Crops Research*, v. 191 p. 161-167, 2016.

NOVAK, J. M.; LIMA, I.; XING, B.; GASKIN, J. W.; STEINER, C.; DAS, K. C.; AHMEDNA, M. A.; REHRAH, D.; WATTS, D. W.; BUSSCHER, W. J. SCHOMBERG, H. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Environmental Science*, v. 3, p. 195-206, 2009.

PACHECO, L. P.; PETTER, F. A. Benefits of cover crops in soybean plantation. In: Brazilian Cerrados. In: Tzi Bun Ng (ed). Soybean - Applications and Technology, p. 67-94, 2011.

PASSOS, R. R.; SILVA, R. W.; BARBOSA, C. F.; MENDONÇA, E. S.; RANGEL, O. J. P. Resíduos potenciais para a produção de biocarvão. In: Ferreira, A.; Lopes, J. C.; Ferreira, M. F. S.; Soares, T. C. V. Tópicos Especiais em Produção Vegetal VI. 1. ed. – Alegre, ES : CAUFES, 2016. Cap. 25, p. 530-553.

PENG, X.; YE, L. L.; WANG, C. H.; ZHOU, H.; SUN, B. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil & Tillage Research*, v. 112, p. 159-166, 2011.

RABILEH, M. A.; SHAMSHUDDIN, J.; PANHWAR, Q. A.; ROSENANI, A. B.; ANUAR, A. R. Effects of biochar and/or dolomitic limestone application on the properties of Ultisol cropped to maize under glasshouse conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 95, p. 37-47, 2015.

RITTL, T. F.; ARTS, B.; KUYPER, T. W.; Biochar: An emerging policy arrangement in Brazil?. *Environmental Science & Policy*, v. 51, p. 45-55, 2015.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; SA, J. C. D.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-effect of no-tillage. *Agronomie*, v. 22, p.755-775, 2002.

SOHI, S. P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, v. 105, p. 47-82, 2010.

SULIMAN, W.; HARSH, J. B.; ABU- LAIL, N, I.; FORTUNA, A. M.; DALLMEYER, I.; PÉREZ, M. G. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of the Total Environment*, v. 574, p. 139-147, 2017.

TAG, A. T.; TAGHIZADEH-TOOSI, A.; CLOUGH, T. J.; SHERLOCK, R. R.; CONDRON, L. M. Effects of Feedstock Type and Pyrolysis Temperature on Potential Applications of Biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 120, p. 200-206, 2016.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.609-618, 2005.

VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; CHAN, K. Y.; DOWNIE, A.; RUST, J.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, v. 327, p. 235-246, 2010.

WANG, Y.; YINA, R.; LIU, R. Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 110, p. 375-381, 2014.

YUAN, J. H.; XU, R. K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management*, v. 27, p. 110-115, 2011.

YUAN, J. H.; XU, R. K.; ZHANG, H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, v. 102, p. 3488-3497, 2011.

ZHAO, L.; CAO, X.; MAŠEK, O.; ZIMMERMAN, A. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. *Journal of Hazardous Materials, Amsterdam*, v. 256-257, p. 1-9, 2013.

ZIELIŃSKA, A. OLESZCZUK, P.; CHARMAS, B.; SKUBISZEWSKA-ZIĘBA, J.; PASIECZNA-PATKOWSKA, S. Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 112, p. 201–213, 2015.

**CAPITULO 1**  
**EFEITO DO BIOCÁRVÃO E CaCO<sub>3</sub> SOBRE O pH E GERAÇÃO DE CARGAS**  
**NEGATIVAS NO SOLO**

**1 RESUMO**

O biocárvão é um subproduto rico em carbono (C), produzido por degradação térmica (pirólise) de materiais orgânicos em um ambiente com ausência ou presença limitada de oxigênio e utilizado exclusivamente para fins ambientais e agrônômicos, como o sequestro de carbono, aumento do pH, da capacidade de troca de cátions (CTC), aumento da concentração de nutrientes e retenção de água no solo. Os benefícios agrônômicos e ambientais do seu uso estão associados principalmente à temperatura de pirólise e a biomassa utilizada para o seu processamento. O presente estudo visou avaliar a influência dos biocárvoes de palha de café conilon (PC) e casca de eucalipto (CE) produzidos nas temperaturas de 350 e 600 °C associado ao CaCO<sub>3</sub> sobre o pH e cargas negativas do solo. O processo de pirólise lenta foi realizado em reator metálico hermeticamente fechado. O experimento foi realizado em laboratório com temperatura controlada em torno de 25 °C. Os tratamentos foram compostos por biocárvoes produzidos a partir de PC e CE, duas temperaturas finais de pirólise (350 e 600 °C), quatro doses de biocárvão (5, 10, 15 e 20 t ha<sup>-1</sup>), cinco doses de CaCO<sub>3</sub> (0, 0,55, 1,1, 2,2, e 3,3 t ha<sup>-1</sup>) e um tratamento adicional sem adição de biocárvão. O aumento do pH do solo foi maior com o uso de biocárvão de PC em relação ao de CE. Biocárvoes produzidos a 600 °C proporcionaram maior elevação do pH do solo. O efeito neutralizante da acidez dos biocárvoes se deu então na seguinte ordem crescente: CE350; PC350; CE600 e PC600, apresentando elevação no pH do solo quando comparado ao tratamento controle de 1,26; 1,46; 1,61 e 1,71 unidades respectivamente. O pH do solo foi elevado com o aumento da dose aplicada de biocárvão. A associação de doses de biocárvão com CaCO<sub>3</sub> apresentaram interação positiva no aumento do pH do solo. No entanto, o uso em conjunto do corretivo e o condicionador, em doses mais altas, elevou o pH do solo além da faixa de pH ideal para a maioria das culturas (5,5 – 6,0). Biocárvoes proporcionaram maior carga líquida negativa do solo. Esse efeito foi maior com o uso de biocárvoes de PC, e potencializado com elevação da temperatura de pirólise para 600 °C.

**Palavras-chave:** Biochar, Correção da Acidez do Solo, CTC, Condicionador do Solo

# CHAPTER 1

## EFFECT OF BIOCHAR AND CaCO<sub>3</sub> ON THE pH AND GENERATION OF NEGATIVE LOADS IN SOIL

### 2 ABSTRACT

The biochar is a carbon-rich by-product (C), produced by thermal degradation (pyrolysis) of organic materials in an environment with limited or no oxygen presence and used exclusively for environmental and agronomic purposes, such as carbon sequestration, pH increase, cation exchange capacity (CEC), nutrient concentration increase and soil water retention. The agronomic and environmental benefits of its use are mainly associated with the pyrolysis temperature and the biomass used for its processing. The present study aimed to evaluate the influence of the biochars of coffee conilon straw (PS) and eucalyptus bark (EB) produced at temperatures of 350 and 600 °C associated with CaCO<sub>3</sub> on pH and negative soil loads. The slow pyrolysis process was carried out in a hermetically sealed metallic reactor. The experiment was carried out in a laboratory with a temperature controlled around 25 °C<sup>±1</sup>. The treatments were composed of biochars produced from CS and EB, two final pyrolysis temperatures (350 and 600 °C), four biochar doses (5; 10; 15 and 20 t ha<sup>-1</sup>), five doses of CaCO<sub>3</sub>, 0.55; 1.10; 2.20 and 3.30 t ha<sup>-1</sup>) and an additional treatment without addition of biochar. The increase in soil pH was higher with the use of CS biochar in relation to EB. Biochars produced at 600 °C provided higher soil pH elevation. The neutralizing effect of the acidity of the biochars was then in the following growing order: EB350; CS350; EB600 and CS600, showing elevation in soil pH when compared to the control treatment of 1.26; 1.46; 1.61 and 1.71 units, respectively. The pH of the soil was elevated with the increase of the applied biochar. The association of doses of biochar with CaCO<sub>3</sub> showed a positive interaction in the increase of soil pH. However, the use of the corrective and the conditioner, in higher doses, raised soil pH beyond the ideal pH range for most crops (5.5 - 6.0). Biochars provided higher net negative soil load. This effect was greater with the use of CS biochars, and potentiated with raising the pyrolysis temperature to 600 °C.

**Key words:** Biochar, Soil Acidity Correction, CEC, Soil Conditioner



### 3 INTRODUÇÃO

O biocarvão é um subproduto rico em C, produzido por degradação térmica de materiais orgânicos como resíduos de culturas agrícolas e florestais em um ambiente com ausência ou presença limitada de oxigênio (pirólise) e utilizado exclusivamente para fins ambientais e agrônômicos (LEHMANN et al., 2011).

Devido à riqueza em C, o biocarvão é indicado como alternativa promissora para armazenar carbono no solo por longo tempo, levando potencialmente a uma redução significativa na emissão de gases de efeito de estufa (GEE) do solo para a atmosfera (AGEGNEHU et al., 2016; SOHI et al., 2010). Além disso, sua presença no solo é relatada para melhorar as propriedades químicas do solo (pH, CTC e nutrientes) (FIDEL et al., 2017; YUAN et al., 2011a), propriedades físicas (retenção de água do solo, condutividade hidráulica) (SULIMAN et al., 2017; LIM et al., 2016), biológicas (LEHMANN et al., 2011) e o rendimento das culturas (LIU et al., 2016; PENG et al., 2011; VAN ZWIETEN et al., 2010).

O processo de pirólise resulta na formação de grupos funcionais de superfície, que determinam a capacidade de adsorção de íons no biocarvão. A presença de grupamentos funcionais básicos ou ácidos é influenciada pela temperatura de pirólise. A elevação da temperatura tende a aumentar os grupamentos básicos e diminuir os ácidos (SHI et al., 2015), o que reflete diretamente nas cargas de superfície do biocarvão, CTC, alcalinidade e na qualidade do biocarvão como condicionador de solos.

Dentre as propriedades químicas do solo influenciadas pela aplicação de biocarvão, destaca-se o pH. As mudanças no pH têm impactos progressivos sobre muitos processos do solo, incluindo mineralização do nitrogênio, precipitação de sais, troca iônica, e as emissões de gases de efeito estufa (JOSEPH et al., 2010; McCORMACK et al., 2013).

A acidificação do solo é uma preocupação global (CALEGARI et al., 2013). Solos ácidos ocupam aproximadamente 30 % do total das áreas agricultáveis na Terra. A acidificação do solo pode resultar em toxicidade de alumínio e manganês para as plantas e deficiências de fósforo, molibdênio, cálcio, magnésio e redução da CTC do solo, portanto, pode limitar o crescimento das culturas e reduzir a produtividade (YUAN et al., 2011a). A calagem é uma prática comum para correção de solo ácidos cuja principal função é elevar o pH do solo, reduzir a toxidez do  $Al^{3+}$  e fornecer cálcio e magnésio para as plantas (FAGERIA; BALIGAR, 2008).

O biocarvão é geralmente alcalino e pode ser usado como um condicionador do solo para neutralizar a acidez (FIDEL et al., 2016; ZHAO et al., 2015). O pH do biocarvão é influenciado pelo tipo de biomassa utilizada, temperatura e tempo de permanência na temperatura final (LIU; ZHANG, 2012). A eficiência do biocarvão em neutralizar a acidez do solo depende do tipo de biocarvão, do solo (LEHMANN et al., 2006; VAN ZWIETEN et al., 2010) e da dose aplicada (MOLNÁR et al., 2016).

Entretanto, devido à alta capacidade de alguns biocarvões em aumentar o pH do solo, o seu uso associado à calagem pode promover uma elevação desproporcional no pH do solo, o que pode gerar malefícios como a redução da disponibilidade de alguns micronutrientes, como Fe, Zn, Cu e Mn (NOVAIS et al., 2007).

Nesse contexto, torna-se importante conhecer as características do biocarvão e do solo que será manejado, bem como as interações entre ambos e a prática de calagem para se obter melhor eficiência no manejo do solo com a aplicação de biocarvão. Diante disso, o presente estudo visou avaliar a influência dos biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE), produzidos nas temperaturas de 350 e 600 °C, associado ao carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) sobre o pH e cargas negativas do solo.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado no Laboratório de Solos da Universidade Federal do Espírito Santo, campus de Alegre, em ambiente controlado com temperatura de 25 °C ±1. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado disposto em esquema fatorial 2x2x4x5, sendo dois biocarvões produzidos a partir de palha de café conilon (PC) e casca de eucalipto (CE), duas temperaturas finais de pirólise 350 e 600 °C, quatro doses de biocarvão (5, 10, 15 e 20 t ha<sup>-1</sup>) e cinco doses de CaCO<sub>3</sub>, reagente P.A. (0, 0.55, 1.1, 2.2 e 3.3 t ha<sup>-1</sup>) totalizando 80 tratamentos com três repetições. Para efeito de comparação montou-se um tratamento controle sem adição de biocarvão com três repetições. As doses de biocarvão e CaCO<sub>3</sub> utilizadas foram estimadas considerando-se a incorporação dos materiais na camada de 0-20 cm de solo.

### **4.1 Produção e Características dos Biocarvões**

As matérias primas utilizadas na produção dos biocarvões, PC e CE, são resíduos que se acumulam em suas unidades de beneficiamento e possuem potencial poluidor quando descartado em local inadequado. A palha de café conilon (*Coffea canephora*), proveniente de secagem em terreiro de cimento era composta pela casca, polpa, pergaminho e grãos perdidos no beneficiamento, foi proveniente do Instituto Federal do Espírito Santo, campus de Alegre-ES. A casca de eucalipto, da espécie *Eucalyptus grandis*, proveniente do beneficiamento de madeira da empresa Bragança Beneficiamento de Madeiras em Autoclave (BBM), foi passada em picadeira para redução e padronização do tamanho de partículas em torno de 5 cm. Ambos os resíduos foram secos ao ar até apresentarem teor de umidade entre 11 % e 12 %.

Os biocarvões foram produzidos pelo processo de pirólise lenta em duas temperaturas (350 e 600 °C), com tempo de permanência nessas temperaturas de 60 min. A pirólise foi conduzida em um reator metálico, modelo SPPT-V60, com taxa de aquecimento de 6 °C min<sup>-1</sup>. Após o processo de pirólise, o biocarvão permaneceu no reator até que o mesmo atingisse a temperatura ambiente. Para padronização dos materiais e aumento da reatividade, os biocarvões produzidos foram passados em sua totalidade em peneiras de malha de 1 e 0,5 mm, sendo utilizado o material retido na segunda malha.

Os materiais obtidos foram caracterizados por Barbosa (2016), sendo a caracterização química dos biocarvões apresentada na tabela 1.

**Tabela 1-** Características químicas dos biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE) pirolisados na temperatura de 350 °C e 600 °C

Variáveis	Unidade	Biocarvões			
		PC		CE	
		350 °C	600 °C	350 °C	600 °C
C	%	55,68	65,73	54,99	65,05
H		4,36	1,77	3,12	1,44
N		3,52	2,66	0,60	0,51
O		36,43	29,83	41,28	34,37
Cz	%	13,65	20,55	16,83	26,01
pH	-	8,94	9,57	7,20	8,15
Carga negativa	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	296,99	39,84	99,20	19,76
P	g kg <sup>-1</sup>	0,39	0,55	0,33	0,44
K		158,90	191,99	19,12	22,93
Ca		1,84	2,06	2,91	3,78
Mg		0,44	0,55	0,64	0,75

Fonte: Barbosa, 2016. Cz: cinzas.

## 4.2 Solo Utilizado

O solo utilizado no experimento foi um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, o qual foi coletado na profundidade de 0 - 20 cm em área de pastagem com alto nível de degradação, localizada no município de Alegre estado do Espírito Santo. Após coletado, o solo foi seco ao ar e passado em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), retirou-se uma amostra para caracterização química e física, cujos resultados são apresentados na tabela 2.

**Tabela 2-** Características químicas e físicas do solo utilizado no experimento

Análise Química										
pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	M
H <sub>2</sub> O	mg dm <sup>-3</sup>		-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				-----%-----			
4,86	1,75	37	0,23	0,24	0,60	4,04	0,57	4,61	12,38	51,23
Análise Física										
Ds	Dp	Areia		Silte		Argila		MO		
-----kg dm <sup>-3</sup> -----		-----%-----		-----%-----		-----%-----		-----%-----		
1,16	2,33	48		5		47		1,98		

pH em H<sub>2</sub>O (relação 1:2,5); K, Na: potássio e sódio trocáveis, por extração com Mehlich 1 e determinação por fotometria de chama; Ca, Mg: cálcio e magnésio trocáveis por extração com cloreto de potássio (KCl) 1 mol L<sup>-1</sup> e determinação em absorção atômica; Al: alumínio trocável extraído com KCl e determinação por titulação; H +Al: acidez potencial por extração com acetato de cálcio e determinação por titulação; P: fósforo extraído com Mehlich 1 e determinado por colorimetria; T: capacidade de troca catiônica potencial; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; (EMBRAPA, 1997); M.O: matéria orgânica do solo (YEOMANS; BREMMER, 1988); Areia, silte e argila: Método da pipeta por agitação lenta; Ds = Densidade do solo determinada pelo método da proveta e Dp = Densidade de partículas determinada pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997).

## 4.3 Montagem e Condução do Experimento

Para incubação, doses proporcionais a 5, 10, 15 e 20 t ha<sup>-1</sup> dos biocarvões foram incorporadas a 0,7 kg de solo. Adicionaram-se doses de 0, 0,55, 1,1, 2,2 e 3,3 t ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> que correspondem, respectivamente, a 0, 25, 50, 100 e 150 % da recomendação de calagem para elevar a saturação de bases do solo a 60 % pelo método da elevação da saturação de bases (NOVAIS et al., 2007). Foi adicionado água deionizada aos tratamentos, elevando a umidade do solo a 70 % da capacidade de campo.

Os tratamentos foram acondicionados em recipientes plásticos com capacidade para um dm<sup>3</sup>, fechados para evitar perda de água e abertos por 20 minutos a cada 48 horas para realização das trocas gasosas.

### **3.4 Análises de pH e Cálculo do $\Delta$ pH**

Aos trinta dias de incubação realizou-se nova homogeneização do material e coleta de aproximadamente 80 cm<sup>3</sup> de solo de cada unidade experimental. O solo foi seco em estufa de circulação forçada a 40 °C por 48 horas. A determinação do pH em H<sub>2</sub>O, KCl (1 mol L<sup>-1</sup>) e CaCl<sub>2</sub> (0,01 mol L<sup>-1</sup>) na relação solo-solução de 1:2,5 foi realizada segundo Embrapa (2009).

Foi estimado a carga negativa do solo pelos valores de  $\Delta$ pH obtido através da expressão  $\Delta$ pH= pH (KCl) – pH (H<sub>2</sub>O) (NOVAIS et al., 2007).

### **3.5 Análises Estatísticas**

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para determinar diferenças significativas entre os tratamentos ao nível de  $p \leq 0,05$ . Quando houve diferenças significativas, os dados qualitativos foram submetidos ao teste de Tukey a 5 % de probabilidade e os dados quantitativos foram ajustados a modelos de superfície de resposta em função das doses de biocarvão e doses de CaCO<sub>3</sub>. Quando os dados não se ajustaram a nenhum modelo de superfície de resposta, buscou-se o ajuste a modelos de regressão somente em função das doses de biocarvão.

## **5 RESULTADOS**

O uso de biocarvão independentemente de dose aplicada ou CaCO<sub>3</sub> adicionado, proporcionou aumento significativo no pH do solo ( $P \leq 0,05$ ) (Tabela 3). Os biocarvões de PC promoveram aumento de pH superior aos biocarvões de CE. Quanto à temperatura, os biocarvões produzidos a 350 °C proporcionaram valores de pH inferiores aos biocarvões produzidos a 600 °C. O efeito neutralizante da acidez dos biocarvões seguiu-se então a seguinte ordem crescente: CE350; PC350; CE600 e PC600, apresentando elevação

no pH do solo quando comparado ao tratamento controle de 1,26; 1,46; 1,61 e 1,71 unidades respectivamente (Tabela 3).

Quando o pH é determinado pelos extratores KCl e CaCl<sub>2</sub>, os valores médios são 0,67 e 0,74 unidades respectivamente, inferiores ao pH em H<sub>2</sub>O. Para estes extratores são observados os mesmos efeitos que a leitura em H<sub>2</sub>O, exceto para a temperatura de 600 °C onde não houve diferença entre os materiais PC e CE (Tabela 3).

**Tabela 3-** Valores médios de pH e ΔpH do solo tratado com biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE) produzidos nas temperaturas de 350 e 600 °C

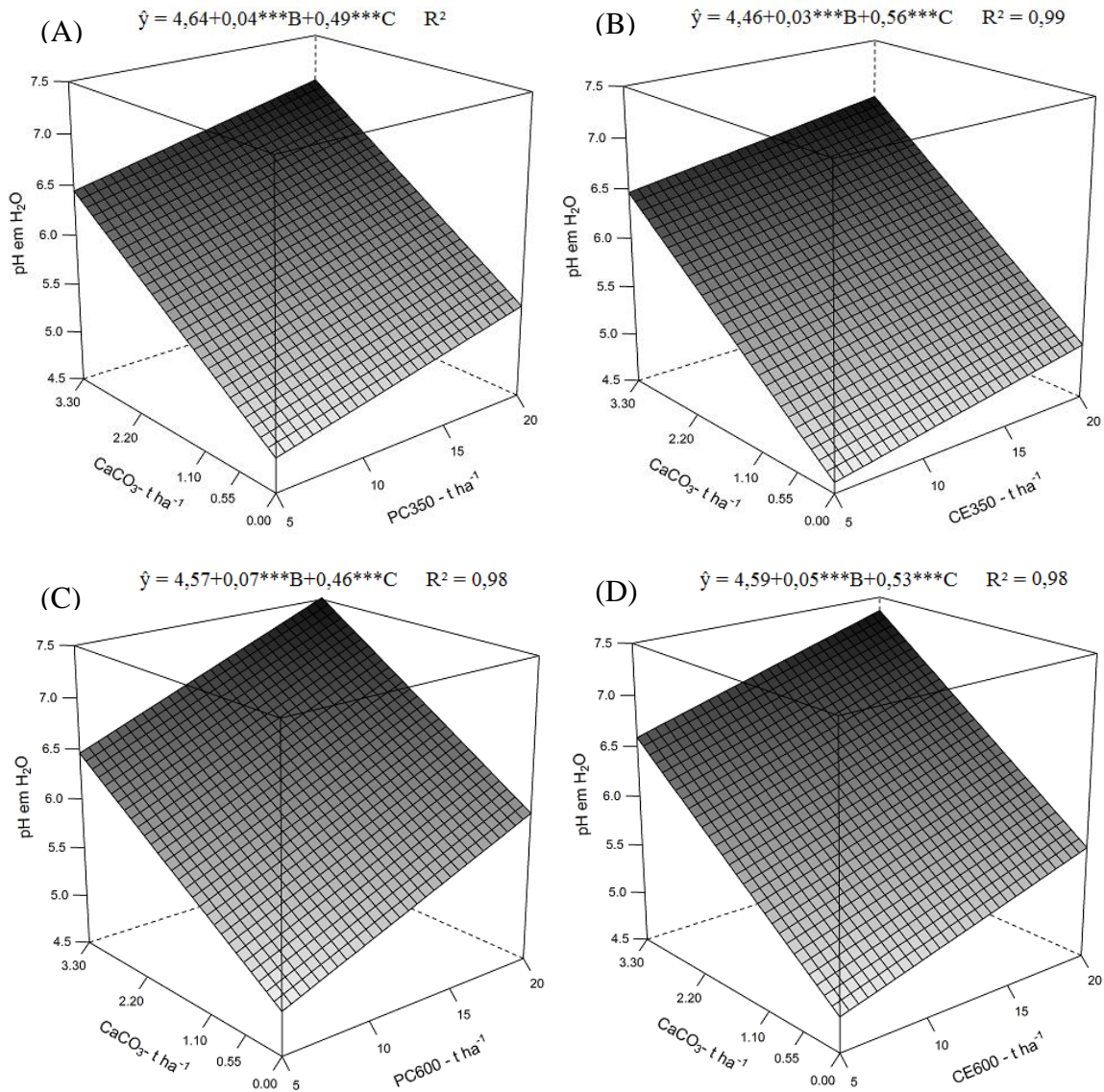
Variável	Material	Temperatura °C		Controle Absoluto	CV %
		350	600		
pH (H <sub>2</sub> O)	PC	5,85 aB	6,10 aA	4,39	3,13
	CE	5,65 bB	6,00 bA		
pH (KCl)	PC	5,11 aB	5,30 aA	4,10	5,16
	CE	4,96 bB	5,28 aA		
pH (CaCl <sub>2</sub> )	PC	5,20 aB	5,45 aA	3,86	3,01
	CE	5,10 bB	5,46 aA		
ΔPh	PC	-0,74 aB	-0,80 aA	-0,29	7,09
	CE	-0,69 bB	-0,72 bA		

Médias seguidas por letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

A carga líquida negativa do solo, estimada pelos valores de ΔpH foram aumentadas com a adição de biocarvão (Tabela 3). Os biocarvões de PC proporcionaram maior densidade de carga negativa em relação ao biocarvão de CE, e estas cargas aumentaram com elevação da temperatura de pirólise.

Houve interação entre doses de CaCO<sub>3</sub> e doses de biocarvão (Figuras 1; 2 e 3). O CaCO<sub>3</sub> promoveu correção da acidez, aumentando o pH do solo linearmente conforme o aumento da dose aplicada. O biocarvão potencializou o poder de neutralização do corretivo elevando linearmente o pH do solo conforme o aumento da dose utilizada. Na Figura 1, observa-se o efeito das doses de biocarvão associadas ao CaCO<sub>3</sub> na elevação do pH em H<sub>2</sub>O do solo, ocorreu maior elevação do pH com a utilização de CaCO<sub>3</sub>. Analisando o ângulo de inclinação da reta no sentido das doses de biocarvão, os biocarvões de PC (Figuras 1 A e 1 C) possuem maior poder neutralizante da acidez que

os biocarvões de CE (Figuras 1 B e 1 D). Quanto à temperatura de pirólise, os biocarvões carbonizados a 350 °C (figura 1 A e 1 B) apresentaram menor poder neutralizante que os carbonizados a 600 °C (figura 1 C e 1 D).



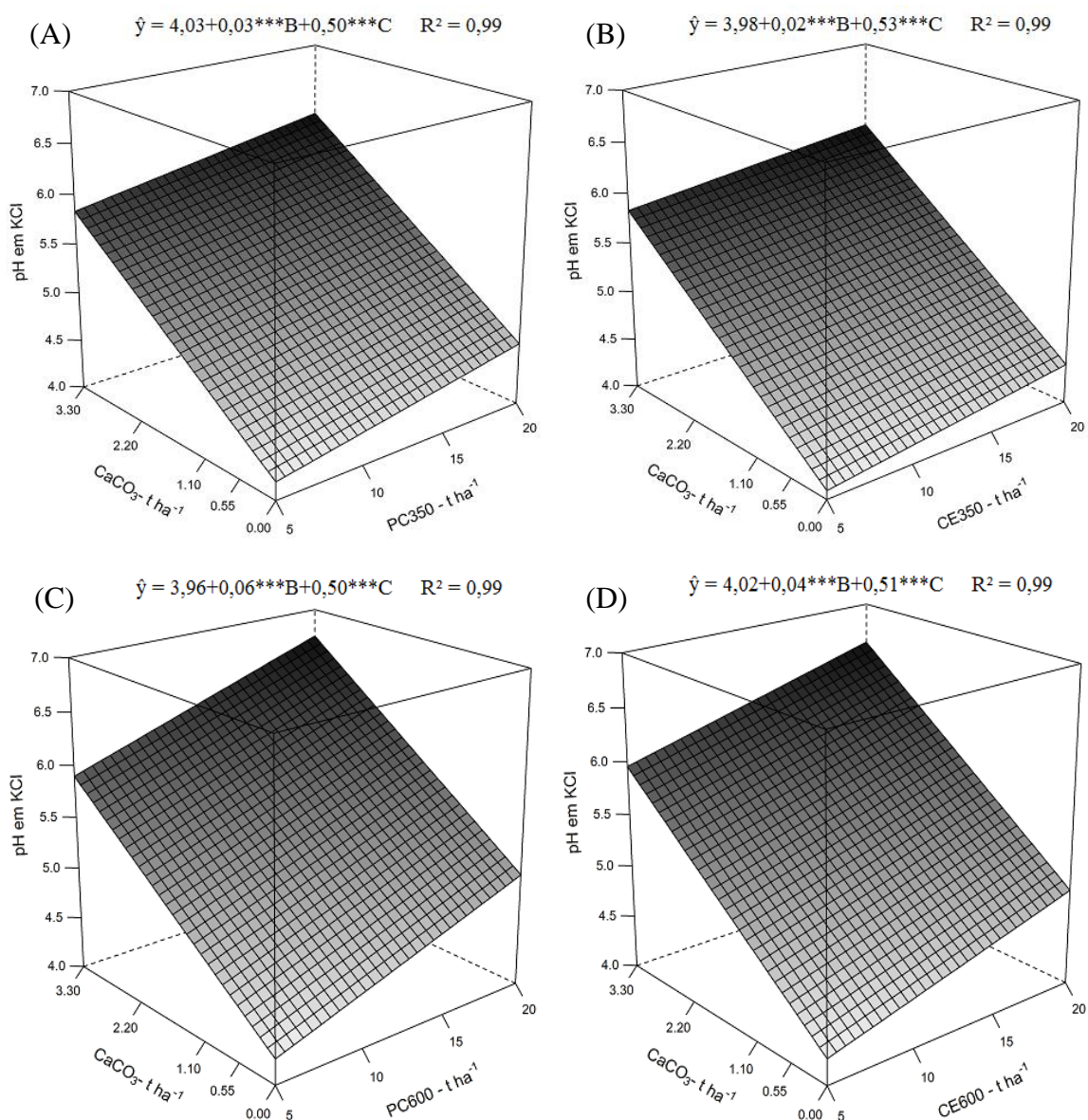
**Figura 1** – Valores de pH em água (H<sub>2</sub>O) em função de doses de CaCO<sub>3</sub> e dos biocarvões PC350 (A), CE350(B), PC600 (C) e CE600 (D). \*\*\*: significativo a 0,1 %.

A dose de 2,2 t ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub>, considerada 100 % da calagem foi suficiente para elevar o pH do solo inicialmente de 4,86 para o valor próximo de 5,5. Com a adição de doses de biocarvões, o pH do solo é elevado, chegando a valores acima de 6,0 para maior dose de biocarvão, independente da sua origem. Quando aplicado a maior dose do

corretivo associada às maiores doses de biocarvões, os valores de pH do solo chegam a ser superiores a 7 (Figura 1).

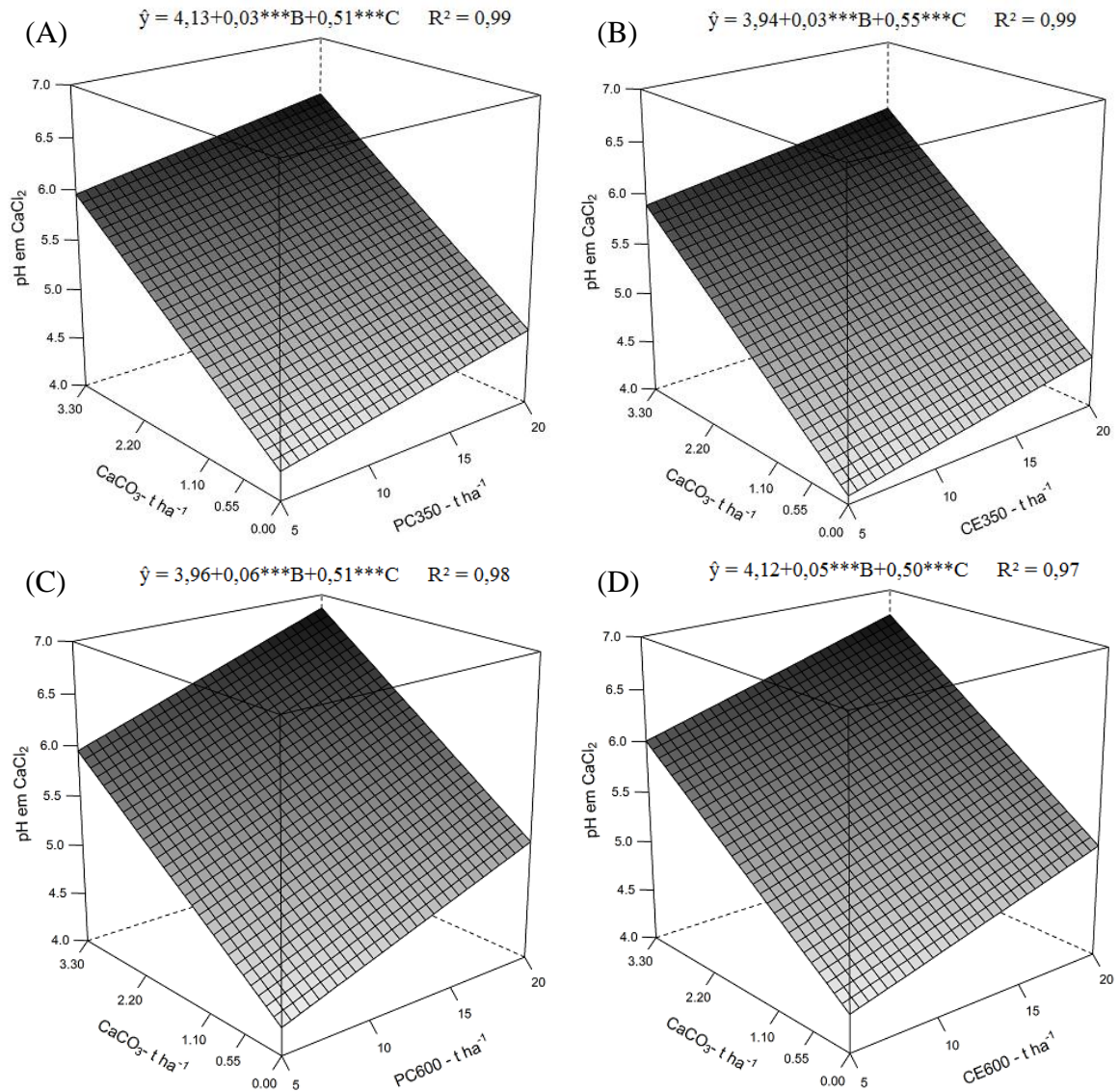
O biocarvão PC600 foi o que apresentou maior poder neutralizante, proporcionando médias de pH em H<sub>2</sub>O variando entre 4,8 e 6,1 para a menor e maior dose aplicada respectivamente, e quando associado ao CaCO<sub>3</sub>, elevou o pH do solo próximo de 7,5 (Figura 1 D).

Os valores de pH, em KCl e CaCl<sub>2</sub> (Figuras 2 e 3, respectivamente), apesar de inferiores, apresentaram comportamentos similares ao pH em H<sub>2</sub>O, exceto para a temperatura de 600 °C, na qual não houve diferença entre os materiais PC e CE.



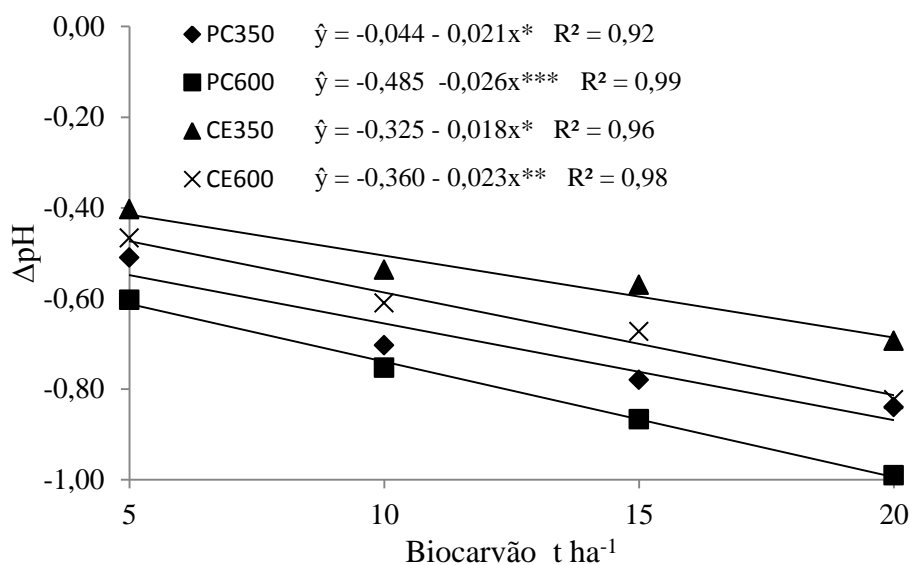
**Figura 2** – Valores de pH em cloreto de potássio (KCl) em função de doses de CaCO<sub>3</sub> e dos biocarvões PC350 (A), CE350(B), PC600 (C) e CE600 (D). \*\*\*: significativo a 0,1%.





**Figura 3** – Valores de pH em cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) em função de doses de  $\text{CaCO}_3$  e dos biocarbões PC350 (A), CE350(B), PC600 (C) e CE600 (D). \*\*\*: significativo a 0,1 %.

Os valores de  $\Delta\text{pH}$  não se ajustaram a modelos de superfície de resposta em função das doses de biocarbão e de  $\text{CaCO}_3$ . Desse modo, foram ajustados modelos de regressão somente em função das doses de biocarbão. A carga líquida superficial decresceu com o aumento das doses de ambos os biocarbões. Houve efeito significativo tanto para os biocarbões provenientes dos dois materiais (PC e CE) quanto para as temperaturas de pirólise (350 e 600 °C). No geral, biocarbões de PC proporcionaram maior incremento de cargas negativas e estes valores foram acrescidos com o aumento da temperatura de pirólise para 600 °C (Figura 4).



**Figura 4** – Carga líquida de superfície, representada por  $\Delta\text{pH}$ , em função de doses dos biocarvões PC350; PC600; CE350 e CE600. \*, \*\* e \*\*\*: significativo a 5; 1 e 0,1% respectivamente.

## 6 DISCUSSÃO

O efeito da correção da acidez do solo por adição de biocarvão seguiu a mesma tendência de alcalinidade dos biocarvões (Tabela 1). Uma relação linear foi encontrada entre o pH do solo e a alcalinidade de biocarvões produzidos a partir de nove resíduos de culturas com a incorporação dos biocarvões em Argissolo ácido (YUAN; XU, 2010), o qual foi apontado para diminuir a acidez trocável no solo (DAI et al., 2014; YUAN; XU, 2010).

A diferença entre os valores de pH do biocarvão e do solo podem ser a principal causa de alteração do pH do solo. Biocarvões alcalinos têm o potencial para tamponar a acidez do solo (WINDEATT et al., 2014), podendo aumentar o pH de uma ampla gama de solos ácidos e até mesmo alcalinos desde que o pH do biocarvão seja superior ao do solo (Van ZWIETEN et al., 2010; YUAN, et al., 2011b; YUAN; XU, 2010). Cheng et al. (2006) afirmam que esmo utilizando-se biocarvão com pH mais baixo, pode-se aumentar o pH do solo quando usado em solo com valor de pH inferior.

A alcalinidade do biocarvão é formada por grupos funcionais de superfície orgânicos, compostos orgânicos solúveis, carbonatos, e outras bases inorgânicas, as quais podem incluir óxidos, hidróxidos, sulfatos e ortofosfatos (CHEAH et al., 2014, SINGH et al., 2010; YUAN et al., 2011a). As bases orgânicas e inorgânicas solúveis, contribuem para

a redução da acidez a curto prazo (YUAN et al., 2011b), enquanto que os grupos funcionais de superfície orgânicos e carbonatos, especialmente  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ , reagem lentamente com o  $\text{H}^+$ , portanto podem contribuir para o tamponamento do pH e aumento da CTC do solo a longo prazo (MAO et al., 2012; YUAN et al., 2011a).

Os biocarvões derivados de resíduos de culturas possuem pH mais elevado do que os remanescentes de resíduos madeireiros, dada à maior presença de espécies químicas como carbonatos e outros sais (LEHMANN et al., 2011). A presença de sais alcalinos remanescentes do material original também contribui para o elevado pH determinado nos biocarvões (LEHMANN; JOSEPH, 2009). Estes relatos justificam o pH mais elevado nos tratamentos com biocarvões de PC, os quais possuem teores mais elevados de K e Mg.

Em estudos realizados por Windeatt et al. (2014), biocarvões de oito resíduos de culturas produzidos a 600 °C, apresentaram pH ente 6,1 a 11,6, com a maioria dos biocarvões sendo ligeiramente alcalinos. No mesmo estudo, os níveis mais elevados de sais alcalinos corresponderam a um pH mais elevado do biocarvão e uma correlação positiva entre o pH de ambos os biocarvões e a concentração de K foi encontrada.

A tendência do aumento de pH com a elevação da temperatura é consistente com o aumento do teor de cinzas dos biocarvões (Tabela 1). Esta relação também foi observada por outros autores, e é suportado por sais alcalinos e carbonatos que são os principais componentes das cinzas (YUAN et al., 2011a; ZHAO et al., 2013).

Os grupos  $-\text{COO}^-$  e  $-\text{O}^-$  também devem contribuir para a alcalinidade dos biocarvões, tamponando a acidez do solo através da associação destes grupos com  $\text{H}^+$  da solução (YUAN et al., 2011a; FIDEL et al., 2017). Ânions orgânicos sobre a superfície de biocarvão são também uma importante fonte de alcalinidade, especialmente em biocarvões gerados a temperaturas de pirólise mais baixas, uma vez que estes grupos quantitativamente são maiores em temperaturas mais baixas (YUAN et al., 2011a).

Outro fator contribuinte à alcalinidade dos biocarvões é a redução quantitativa dos grupos ácidos, tais como  $-\text{COOH}$  e  $-\text{OH}$  com o aumento da temperatura de pirólise e desaparecimento destes em altas temperaturas (CHUN et al., 2004; YUAN et al., 2011a) e formação de alguns grupos oxigenados, provenientes da conversão térmica da celulose (JOSEPH et al, 2009).

A interação positiva entre  $\text{CaCO}_3$  e biocarvão para elevar o pH do solo, pode ser explicada pelos mecanismos já reconhecidos do corretivo em neutralizar a acidez do solo (FAGERIA; BALIGAR, 2008) somada às propriedades características de cada biocarvão

já citadas, que possuem caráter corretivo da acidez do solo (YUAN et al., 2011a; FIDEL et al., 2017).

Em estudo com calcário associado ao biocarvão, Rabileh et al. (2015) encontraram resultados semelhantes, no qual 2 t ha<sup>-1</sup> de calcário elevou o pH do solo de 4,30 para 5,30 e quando a mesma dose de calcário foi associada a 20 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão o pH do solo foi elevado para 7,33.

No entanto, doses mais elevadas de biocarvão associadas ao CaCO<sub>3</sub>, podem elevar o pH do solo além da faixa considerada adequada para a maioria das culturas agrícolas 5,5 - 6,0 (NOVAIS et al., 2007), podendo gerar danos como diminuição da disponibilidade de alguns micronutrientes (Fe, Zn, Cu e Mn) (NOVAIS et al., 2007), ou a precipitação de P como fosfato de cálcio em pH acima de 6,5 (FAGERIA; BALIGAR, 2008). Ressalta-se, então, a importância de um estudo prévio de caracterização dos efeitos do biocarvão antes do seu uso em campo para produção agrícola.

A carga líquida negativa do solo aumentada com o uso de biocarvão pode ser atribuída principalmente à alta área superficial específica e densidade de carga negativa de superfície, geralmente elevada do próprio biocarvão (LIANG et al., 2006) e ao aumento do pH do solo pela adição de biocarvão favorecer a manifestação de cargas variáveis. Estes efeitos se somam aumentando a eletronegatividade do solo.

Estudando biocarvões de resíduos de quatro culturas agrícolas, Yuan et al. (2011a) ao avaliarem os valores de potencial zeta, nos quais seu valor e sinal estão relacionados com a carga superficial das partículas (YUAN; XU, 2011), assim como os valores de ΔpH (BENITES; MENDONÇA, et al., 1998), relataram que para todas as amostras de biocarvão os valores de potencial zeta foram negativos, o que indica que as partículas de biocarvão possuem cargas negativas sobre as suas superfícies, e estas cargas aumentam com o aumento do pH. Segundo os mesmos autores, o potencial zeta do biocarvão diminuiu com o aumento da temperatura de pirólise, por conseguinte, os biocarvões produzidos a temperaturas mais baixas possuem mais cargas superficiais negativas do que aqueles produzidos a temperaturas mais elevadas. Os relatos anteriores são compatíveis com os biocarvões estudados neste trabalho, os quais apresentam valores de CTC mais elevados na temperatura de 300 °C e no biocarvão de PC (Tabela 1).

Grandes quantidades de grupos funcionais contendo oxigênio (-COO<sup>-</sup>, -COH e -OH) são encontrados no biocarvão, entre eles, -COO<sup>-</sup> e OH contribuem consideravelmente

para a carga de superfície dos biocarvões (YUAN et al., 2011a) e do solo posteriormente a incorporação do material.

O efeito sobre a carga superficial negativa do solo é associado à desprotonação do  $H^+$  a partir da superfície de partículas minerais ou orgânicas com carga variável, em consequência do aumento do pH pela alcalinidade do biocarvão (VAN ZWIETEN et al., 2010). Provavelmente, este mecanismo tenha sobressaído para a formação das cargas negativas do solo tratado com biocarvão, isso devido ao fato de biocarvões produzidos a 600 °C apresentarem pH mais elevado, proporcionando maior densidade de carga negativa ao solo, mesmo com valores de CTC inferiores. O mesmo se aplica ao biocarvões de PC, que apresentaram pH e CTC superiores aos biocarvões de CE.

Devido à densidade de carga negativa por unidade de superfície do biocarvão ser geralmente elevada, a sua incorporação ao solo pode aumentar a sorção catiônica do solo (LIANG et al., 2006). Além disso, a oxidação do C aromático sobre a superfície do biocarvão para formar grupos carboxílicos resulta no aumento de cargas de superfície e incremento na CTC (CHENG et al., 2006). Tem sido relatado aumento na retenção e disponibilidade de nutrientes pelo uso de biocarvões, diminuindo as necessidades de fertilizantes e lixiviação de nutrientes (LAIRD, 2008; STEINER et al., 2007).

Como a aplicação de biocarvão aumenta o pH e CTC do solo, pode indiretamente alterar o fornecimento de nutrientes para as plantas (LIU et al., 2016; ATKINSON et al., 2010). Melhorias do crescimento e rendimento de culturas a partir da alteração do biocarvão em solos ácidos, provavelmente resultante dos aumentos no pH do solo e CTC, são frequentemente relatados na literatura (LIU et al., 2016; WANG et al., 2014; PENG et al., 2011).

## **6 CONCLUSÕES**

A elevação do pH do solo é maior com o uso de biocarvão de PC em relação ao de CE. Biocarvões produzidos a 600 °C proporcionam maior elevação do pH do solo em relação à biocarvões produzidos a 350 °C.

A associação de doses de biocarvão com  $CaCO_3$  apresentam interação positiva no aumento do pH do solo. O uso em conjunto do corretivo e do condicionador, em doses mais altas pode elevar o pH do solo além da faixa de pH ideal para a maioria das culturas.

O uso conjunto de  $1,1 \text{ t ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  e  $10 \text{ t ha}^{-1}$  dos biocarvões PC350, PC600 e CE600 proporciona elevação do pH do solo a uma faixa de 5,5 a 6. Já para o biocarvão CE350, é necessário  $1,5 \text{ t ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  e  $10 \text{ t ha}^{-1}$  de biocarvão para elevar o pH do solo a tal faixa.

Biocarvões proporcionam maior carga líquida negativa do solo. Esse efeito é maior com o uso de biocarvões de PC, e potencializado com elevação da temperatura de pirólise para  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEGNEHU, G.; BASS, ADRIAN M. NELSON, P. N.; BIRD, M.I. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, v. 543, p. 295-306, 2016.

ATKINSON, C. J.; FITZGERAKI, J. D.; HIPPS, N. A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil*, v. 337, p. 1-18, 2010.

BARBOSA, C. F. Caracterização de biocarvões produzidos em diferentes temperaturas. Universidade Federal do Espírito Santo - Centro de Ciências Agrárias e Engenharia. 76p. 2016. Dissertação Mestrado.

BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 215-221, 1998.

CALEGARI, A.; TIECHER, T.; HARGROVE, W. L.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; DE TOURDONNET, S.; GUIMARÃES, M. F. SANTOS, D. R. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. *Soil & Tillage Research*. v. 133, p. 32-39, 2013.

CHEAH, S.; MALONE, S. C.; FEIK, C. J. Speciation of sulfur in biochar produced from pyrolysis and gasification of oak and corn stover. *Environmental Science & Technology*. v. 48, p. 8474-8480, 2014.

CHENG, C. H.; LEHMANN, J.; THIES, J. E.; BURTON, S. D.; ENGELHARD, M. H. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry*, v. 37, p. 1477-1488, 2006.

CHUN, Y.; SHENG, G.; CHIOU, C. T.; XING, B. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars. *Environmental Science & Technology*, v. 38, p.4649-4655, 2004.

DAI, Z.; WANG, Y.; MUHAMMAD, N.; YU, X.; XIAO, K.; LIU, X.; XU, J.; BROOKES, P. C. The effects and mechanisms of soil acidity changes, following incorporation of biochars in three soils differing in initial pH. *Soil Science Society of America*, v. 78, n. 5, p. 1606-1614, 2014.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos. 2. ed. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília DF. 2009, 627p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. *Advances in Agronomy*, v. 99, p. 345-399, 2008.

FIDEL, R. B.; LAIRD, D. A.; THOMPSON, M. L.; LAWRIENKO, M. Characterization and quantification of biochar alkalinity. *Chemosphere*, v. 167, p. 367-373, 2017.

JOSEPH, S. D.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; LIN, Y.; MUNROE, P.; CHIA, C. H.; HOOK, J.; VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; COWIE, A.; SINGH, B. P.; LEHMANN, J.; FOIDL, N.; SMERNIK, R.J.; AMONETTE, J. E. An investigation into the reactions of biochar in soil. *Soil Research*. v. 48, p. 501-515, 2010.

LAIRD, D. A. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal*, v. 100, p. 178-181, 2008.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 11, p. 395-419, 2006.



LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: an introduction. In: \_\_\_\_\_. (Ed.). Biochar for environmental management science and technology. New York: Earthscan 2009. p. 1–9.

LEHMANN, J.; RILLIG, M.; THIES, J.; MASIELLO, C.; HOCKADAY, W.C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota: a review. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011.

LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J.; O'NEILL, B.; SKJEMSTAD, J. O.; THIES, J.; LUIZAO, F. J.; PETERSEN, J.; NEVES, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal* v. 70, p. 1719-1730, 2006.

LIM, T. J.; SPOKAS, K. A.; FEYEREISEN, G.; NOVAK, J. M. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*, v. 142, p. 136-144, 2016.

LIU, X. H.; ZHANG, X. C. Effect of biochar on pH of alkaline soils in the Loess Plateau: Results from incubation experiments. *International Journal of Agriculture & Biology*, v. 14, n. 5, p. 745-750, 2012.

LIU, X. H.; ZHANG, X. C. Effect of biochar on pH of alkaline soils in the loess plateau: Results from incubation experiments. *International Journal of Agriculture and Biology*, v.14, p. 745-750, 2012.

LIU, Y.; LUA, H.; YANG, S.; WANG, Y. Impacts of biochar addition on rice yield and soil properties in a coldwaterlogged paddy for two crop seasons. *Field Crops Research*, v. 191 p. 161-167, 2016.

MAO, J. D.; JOHNSON, R. L.; LEHMANN, J.; OLK, D. C.; NEVES, E. G.; THOMPSON, M. L.; SCHMIDT-ROHR, K. Abundant and stable char residues in soils: implications for soil fertility and carbon sequestration. *Environ. Environmental Science & Technology*, v. 46, p. 9571-9576, 2012.

MCCORMACK, S. A.; OSTLE, N.; BARDGETT, R. D.; HOPKINS, D. W.; VANBERGEN, A. J. Biochar in bioenergy cropping systems: impacts on soil faunal communities and linked ecosystem processes. *GCB Bioenergy* v. 5, p. 81-95, 2013.

MOLNÁR, M.; VASZITA, E.; FARKAS, E.; UJACZKI, E.; KERTÉSZ, I. F.; TOLNER, M.; KLEBERCZ, O.; KIRCHKESZNER, C.; GRUIZ, K.; UZINGER, N.; FEIGL, V. Acidic andy soil improvement with biochar - A microcosm study. *Science of the Total Environment*, v. 563–564, p. 855-865, 2016.

NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ, V. H. V.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. *Fertilidade do Solo*. Viçosa; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, 1017 p.

PENG, X.; YE, L. L.; WANG, C. H.; ZHOU, H.; SUN, B. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil & Tillage Research*, v. 112, p. 159-166, 2011.

PENG, X.; YE, L. L.; WANG, C. H.; ZHOU, H.; SUN, B. Temperature and durationdependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an ultisol in southern China. *Soil & Tillage Research*. v. 112, p. 159-166, 2011.

RABILEH, M. A.; SHAMSHUDDIN, J.; PANHWAR, Q. A.; ROSENANI, A. B.; ANUAR, A. R. Effects of biochar and/or dolomitic limestone application on the properties of Ultisol cropped to maize under glasshouse conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 95, p. 37-47, 2015.

SHI, K.; XIE, Y.; QIU, Y. Natural oxidation of a temperature series of biochars: Opposite effect on the sorption of aromatic cationic herbicides. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 114, p. 102-108, 2015.

SINGH, B.; SINGH, B. P.; COWIE, A. L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*. v. 48, p. 516-

525, 2010.

SOHI, S. P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, v. 105, p. 47-82, 2010.

SOLAIMAN Z. M.; ANAWAR, H. M. Application of biochars for soil constraints: Challenges and solutions. *Pedosphere*, v. 25, p. 631-638, 2015.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; DE MACÊDO, J. L. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, v. 291, p. 275-290, 2007.

SULIMAN, W.; HARSH, J. B.; ABU- LAIL, N, I.; FORTUNA, A. M.; DALLMEYER, I.; PÉREZ, M. G. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of the Total Environment*, v. 574, p. 139-147, 2017.

VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; CHAN, K. Y.; DOWNIE, A.; RUST, J.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, v. 327, p. 235-246, 2010.

WANG, T.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; HEDLEY, M.; SINGH, B. P.; CALVELO-PEREIRA, R.; WANG, C. Determination of carbonate-C in biochars. *Soil Research*, v. 52, p. 495-504, 2014.

WINDEATT J. H.; ROSS, A. B.; WILLIAMS, P. T.; FORSTER, P. M.; NAHIL, M. A.; SINGH S. Characteristics of biochars from crop residues: Potential for carbon sequestration and soil amendment. *Journal of Environmental Management*, v. 146, p. 189-197, 2014.

YUAN, J. H.; XU, R. K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management*, v. 27, p. 110-115,

2010.

YUAN, J. H.; XU, R. K.; ZHANG, H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 3, p. 3488-3497, 2011a.

YUAN, J. H.; XU, R. K.; WANG, N.; LI, J. Y. Amendment of acid soils with crop residues and biochars. *Pedosphere*, v. 21, p. 302-308, 2011b.

ZHAO, L.; CAO, X.; MAŠEK, O.; ZIMMERMAN, A. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. *Journal of Hazardous Materials, Amsterdam*, v. 256-257, p. 1-9, 2013.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. v. 19, p. 1467-1476, 1988.

ZHAO, R.; N COLES, N.; KONG, Z.; WU, J. Effects of aged and fresh biochars on soil acidity under different incubation conditions. *Soil & Tillage Research*, v. 146 p. 133-138, 2015.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. *Advances in Agronomy*, v. 99, p. 345-399, 2008.

## CAPITULO 2

### EFEITO DE BIOCARVÕES DE PALHA DE CAFÉ E CASCA DE EUCALIPTO SOBRE A FERTILIDADE DO SOLO

#### 1 RESUMO

Na maioria dos ambientes tropicais a agricultura enfrenta restrições devido à redução dos teores de nutrientes e rápida mineralização da matéria orgânica do solo. A utilização de biocarvões, materiais orgânicos de alta estabilidade, podem aumentar o estoque de carbono (C) no solo e, ainda, melhorar a qualidade da matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes e a fertilidade do solo. Diante disso, esta pesquisa teve como objetivo avaliar os efeitos do uso de biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE) produzidos em temperaturas de 350 e 600 °C nas propriedades químicas do solo. O biocarvão foi produzido pelo processo de pirólise em reator metálico hermeticamente fechado. O experimento foi conduzido em laboratório com temperatura controlada (25 °C). Os tratamentos foram compostos por biocarvões produzidos a partir de PC e CE, duas temperaturas finais de pirólise 350 e 600 °C, quatro doses de biocarvão 5, 10, 15 e 20 t ha<sup>-1</sup>, sete épocas de avaliação 0; 7; 15; 30; 60; 90 e 120 dias após a incubação e um tratamento adicional sem adição de biocarvão. Os resultados experimentais mostraram que os biocarvões de PC proporcionaram maiores teores de P, K, Mg e maior capacidade de troca de cátions (CTC). Os tratamentos com biocarvões de CE se destacaram pela maior concentração de Ca, em média, os teores de Ca no solo foram acrescidos em 5,9 e 19,4 % para as temperaturas de 350 e 600 °C respectivamente comparando aos biocarvões de PC nas mesmas temperaturas. Tratamentos com biocarvões produzidos em maior temperatura de pirólise (600 °C) apresentaram maiores valores de Ca e CTC para ambos os biocarvões e, maior concentração de K com uso biocarvão de PC. O aumento da dose de biocarvão proporcionou maior concentração de nutrientes e CTC independente do material de origem e temperatura de pirólise. O aumento do tempo de incubação causou redução para todos os tratamentos nas concentrações de nutrientes, exceto o Ca, e redução da CTC do solo.

**Palavras-chave:** Biochar, Pirólise, Condicionador do solo, Macronutrientes

## **CHAPTER 2**

### **COFFEE STRAW AND EUCALYPTUS BARK BIOCHARUES EFFECT ON SOIL FERTILITY**

#### **2 ABSTRACT**

In most tropical environments, agriculture faces constraints due to reduced nutrient content and rapid mineralization of soil organic matter. The use of biochars, organic materials of high stability, can increase the carbon (C) stock in the soil and also improve the quality of organic matter, availability of nutrients and soil fertility. Therefore, the objective of this research was to evaluate the effects of the use of biochars of coffee straw (CS) and eucalyptus bark (EB) produced at temperatures of 350 and 600 °C in the chemical properties of the soil. The biochar was produced by the pyrolysis process in a hermetically closed metallic reactor. The experiment was conducted in a laboratory controlled temperature (25 °C<sup>±1</sup>). The treatments were composed of biochars produced from CS and EB, two final pyrolysis temperatures 350 and 600 °C, four biochars doses 5; 10; 15 and 20 t ha<sup>-1</sup>, seven evaluation times 0; 7; 15; 30; 60; 90 and 120 days after incubation and an additional treatment without addition of biochar. The experimental results showed that CS biochars provided higher levels of P, K, Mg and higher cation exchange capacity (CEC). The treatments with EB biochars were highlighted by the higher concentration of Ca, on average the Ca contents in the soil were increased by 5.9 and 19.4% for the temperatures of 350 and 600 °C, respectively, comparing to the CS biochars in the same temperatures. Treatments with biochars produced at higher pyrolysis temperature (600 °C) showed higher Ca and CEC values for both biochars and higher K concentration with CS biochar. The increase of the biochar dose gave a higher concentration of nutrients and CEC independent of the source material and pyrolysis temperature. The increase in incubation time caused reduction for all treatments in nutrient concentrations, except for Ca, and reduction of soil CEC.

**Key words:** Biochar, Pyrolysis, Soil conditioner, Macronutrients

### 3 INTRODUÇÃO

Na maioria dos ambientes tropicais a agricultura enfrenta restrições devido à redução dos teores de nutrientes e rápida mineralização da matéria orgânica do solo (TORRES et al., 2005). Considerando-se que a matéria orgânica do solo (MOS) é de grande importância na formação e manutenção de propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos tropicais, contribuindo com até 80 % de sua capacidade de troca catiônica (CTC) (PACHECO; PETTER, 2011), é de fundamental importância a sua manutenção nos solos tropicais.

A utilização de materiais orgânicos de alta estabilidade pode aumentar o estoque de C no solo (RITTLL et al., 2015). Produzidos a partir da decomposição térmica de materiais orgânicos em ambientes com ausência ou presença limitada de suprimento de oxigênio (pirólise) (LEHMANN et al., 2011), o material resultante, utilizado exclusivamente para fins ambientais e agronômicos é conhecido como biocarvão (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

Devido ao alto teor de C estável, o biocarvão é indicado como alternativa promissora para armazenar C no solo por longo tempo, levando potencialmente a uma redução significativa na emissão de gases de efeito de estufa (AGEGNEHU et al., 2016; SOHI et al., 2010). Várias pesquisas relatam que sua presença no solo pode melhorar propriedades químicas como pH, CTC e disponibilidade de nutrientes (FIDEL et al., 2017; YUAN et al., 2011a), propriedades físicas como a retenção de água do solo e condutividade hidráulica (SULIMAN et al., 2017; LIM et al., 2016), biológicas (LEHMANN et al., 2011) e o rendimento das culturas (LIU et al., 2016; PENG et al., 2011; VAN ZWIETEN et al., 2010).

Produzidos a partir de uma ampla gama de resíduos orgânicos agrícolas, florestais, animais e urbanos dentre outros, variadas temperaturas e condições de pirólise (SOHI et al., 2010), biocarvões apresentam características físicas e químicas distintas para cada processo de produção, sendo a eficácia do uso de biocarvão no solo, altamente dependente das características de cada biocarvão (JEFFREY et al., 2015; LEHMANN et al., 2006; VAN ZWIETEN et al., 2010). Assim, os mecanismos de alteração após a adição do biocarvão ao solo podem ser diferentes de acordo com as características do biocarvão e necessitam de ser analisados cautelosamente (ZHAO et al., 2015).

O aumento da temperatura de pirólise não só eleva o teor de C elementar e a porção de C recalcitrante, mas também o teor de nutrientes no biocarvão e no solo após sua aplicação (TAG et al., 2016; AL-WABEL et al., 2013). Estes elementos não são perdidos por volatilização na faixa de temperatura normalmente utilizada durante a pirólise (NOVAK et al., 2009). No entanto, a degradação térmica decorrente do aumento da temperatura é acompanhada pela perda de materiais voláteis e acúmulo de componentes inorgânicos na forma de cinzas (MCBEATH et al., 2015). As cinzas associadas ao biocarvão contém nutrientes solúveis e acessíveis às plantas (PENG et al., 2011).

Pesquisas relatam a contribuição do biocarvão no aumento da concentração de nutrientes no solo (WANG et al., 2014; YUAN; XU, 2011, RABILEH et al., 2015). Dentre eles, foram observados elevados teores de Ca provenientes de biocarvões obtidos a partir de cascas de madeira (JIN et al., 2013; LEE et al., 2013). Maiores teores de K foram relatados em biocarvões provenientes de resíduos de culturas agrícolas (ZHAO et al. 2013).

No entanto, efeitos obtidos dos na fertilidade do solo com o uso de biocarvão são explicados principalmente por um aumento de pH em solos ácidos (VAN ZWIETEN et al., 2010), o que por si só não justifica a sua utilização devido ao seu alto custo de produção em relação a fontes convencionais de corretivos de acidez do solo, como o calcário. Diante disso, esta pesquisa teve como objetivo avaliar os efeitos do uso de biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE) produzidos em temperaturas de 350 e 600 °C sobre as propriedades químicas do solo.

#### **4 MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado no Laboratório de Solos da Universidade Federal do Espírito Santo, campus de Alegre, em ambiente controlado com temperatura de 25 °C  $\pm$ 1. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado disposto em esquema fatorial 2x2x4x7 em que os fatores em estudo foram: biocarvões produzidos a partir de dois materiais: palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE); duas temperaturas de pirólise: 350 e 600 °C; quatro doses de biocarvão: 5, 10, 15 e 20 t ha<sup>-1</sup> e sete épocas de avaliação 1; 7; 15; 30; 60; 90 e 120 dias após a incubação com três repetições para cada tratamento. Para efeito de comparação montou-se um tratamento controle sem adição de biocarvão com três



repetições. As doses de biocarvão e  $\text{CaCO}_3$  utilizadas foram estimadas considerando-se a incorporação dos materiais na camada de 0-20 cm de solo.

#### **4.1 Produção e Características dos Biocarvões**

As matérias primas utilizadas na produção dos biocarvões, PC e CE são caracterizadas como resíduos de difícil descarte ambientalmente correto, os quais se acumulam em suas unidades de beneficiamento. A palha de café conilon (*Coffea canephora*), proveniente de secagem em terreiro de cimento era composta pela casca, polpa, pergaminho e grãos perdidos no beneficiamento, foi proveniente do Instituto Federal do Espírito Santo, campus de Alegre - ES.

A casca de eucalipto, da espécie *Eucalyptus grandis*, proveniente do beneficiamento de madeira da empresa Bragança Beneficiamento de Madeiras em Autoclave (BBM), foi passada em picadeira para redução e padronização do tamanho de partículas em torno de 5 cm. Ambos os resíduos foram secos ao ar até apresentarem massa constante e o teor de umidade entre 11 % e 12 %.

Os biocarvões foram produzidos pelo processo de pirólise lenta em duas temperaturas (350 °C e 600 °C), com tempo de permanência nessas temperaturas de 60 min. A pirólise foi conduzida em um reator metálico, modelo SPPT-V60, com taxa de aquecimento de 6 °C min<sup>-1</sup>. Após o processo de pirólise, o biocarvão permaneceu no reator até que o mesmo atingisse a temperatura ambiente. Para padronização dos materiais e aumento da reatividade, o biocarvão produzido foi passado em peneira de malha de 1 mm e 0,5 mm, sendo utilizado o material retido na segunda malha.

Os materiais obtidos foram caracterizados por Barbosa (2016), sendo a caracterização química dos biocarvões apresentada na tabela 1.

**Tabela 1-** Características químicas dos biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE) pirolisados na temperatura de 350 °C e 600 °C

Variáveis	Unidade	Biocarvões			
		PC		CE	
		350 °C	600 °C	350 °C	600 °C
C	%	55,68	65,73	54,99	65,05
H		4,36	1,77	3,12	1,44
N		3,52	2,66	0,60	0,51
O		36,43	29,83	41,28	34,37
Cz	%	13,65	20,55	16,83	26,01
pH	-	8,94	9,57	7,20	8,15
Carga negativa	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	296,99	39,84	99,20	19,76
P	g kg <sup>-1</sup>	0,39	0,55	0,33	0,44
K		158,90	191,99	19,12	22,93
Ca		1,84	2,06	2,91	3,78
Mg		0,44	0,55	0,64	0,75

Fonte: Barbosa, 2016. Cz: cinzas.

#### 4.2 Solo Utilizado

O solo utilizado no experimento foi um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, o qual foi coletado na profundidade de 0 - 20 cm em área de pastagem com alto nível de degradação, localizada no município de Alegre, estado do Espírito Santo. Após coletado, o solo foi seco ao ar e passado em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), de onde retirou-se uma amostra para caracterização química e física, cujos resultados são apresentados na tabela 2.

**Tabela 2-** Características químicas e físicas do solo utilizado no experimento

Análise Química										
pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	m
H <sub>2</sub> O	mg dm <sup>-3</sup>		-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				-----%-----			
4,86	1,75	37	0,23	0,24	0,60	4,04	0,57	4,61	12,38	51,23
Análise Física										
Ds	Dp	Areia			Silte		Argila		MO	
-----kg dm <sup>-3</sup> -----		-----%-----			-----%-----		-----%-----		-----%-----	
1,16	2,33	48			5		47		1,98	

pH em H<sub>2</sub>O (relação 1:2,5); K, Na: potássio e sódio trocáveis, por extração com Mehlich 1 e determinação por fotometria de chama; Ca, Mg: cálcio e magnésio trocáveis por extração com cloreto de potássio (KCl) 1 mol L<sup>-1</sup> e determinação em absorção atômica; Al: alumínio trocável extraído com KCl e determinação por titulação; H +Al: acidez potencial por extração com acetato de cálcio e determinação por titulação; P: fósforo

extraído com Mehlich 1 e determinado por colorimetria; T: capacidade de troca catiônica potencial; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; (EMBRAPA, 1997); M.O: matéria orgânica do solo (YEOMANS; BREMMER, 1988); Areia, silte e argila: Método da pipeta por agitação lenta; Ds = Densidade do solo determinada pelo método da proveta e Dp = Densidade de partículas determinada pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997).

### 4.3 Montagem e Condução do Experimento

Devido à variação de pH dos biocarvões conforme o material de origem e a temperatura de pirólise (Tabela 1), e visando a padronização do pH do solo, próximo a 6,0 para todos os tratamentos, foi realizado um experimento prévio no qual utilizou-se o método da curva de incubação (NOVAIS et al., 2007) aplicando-se 0; 0,55; 1,1; 2,2; e 3,3 t ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> para cada tratamento e avaliou-se o pH do solo aos trinta dias de incubação.

O pH do solo foi elevado, variando de acordo com o material de origem dos biocarvões, temperatura de pirólise e dose aplicada. No qual o tratamento com biocarvão de PC produzido a 600 °C atingiu valor de pH de 6,1 sem adição de CaCO<sub>3</sub>. A partir destes resultados, ajustaram-se as quantidades de CaCO<sub>3</sub> para cada tratamento visando atingir um valor de pH de 6,1 (Tabela 3).

Para incubação do experimento, doses proporcionais a 5; 10; 15 e 20 t ha<sup>-1</sup> dos biocarvões foram incorporados a 1,7 kg de solo. Posteriormente adicionou-se CaCO<sub>3</sub> de acordo com a necessidade de cada tratamento. Como a quantidade de CaCO<sub>3</sub> aplicada variou de acordo com cada tratamento, foi adicionado CaCl<sub>2</sub> para igualar o teor de Ca aplicado a todos os tratamentos. As doses de CaCO<sub>3</sub> e CaCl<sub>2</sub> utilizadas são apresentadas na tabela 3.

Após homogeneização dos materiais, adicionou-se água deionizada elevando-se a umidade do solo a 70% da capacidade de campo.

Os tratamentos foram acondicionados em recipientes plásticos com capacidade para 2 dm<sup>3</sup>. Os recipientes foram fechados para evitar perda de água e abertos a cada 48 horas para a realização das trocas gasosas.

O controle da umidade foi realizado através de pesagem dos recipientes antes e após cada coleta de solo para análise, e quando necessário à umidade foi ajustada adicionando-se água deionizada.

**Tabela 3-** Necessidade de  $\text{CaCO}_3$  (NC) e quantidades de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{CaCl}_2$  aplicados em cada tratamento para elevar o pH do solo a 6,1 e padronizar os teores de Ca adicionado nos tratamentos

Biocarvão	Dose de BC	NC	$\text{CaCO}_3$	$\text{CaCl}_2$
	-----t ha <sup>-1</sup> -----		-----g kg <sup>-1</sup> -----	
PC-350	5	2,35	1,01	0,24
	10	2,18	0,94	0,32
	15	2,02	0,87	0,40
	20	1,47	0,63	0,66
PC-600	5	2,20	0,95	0,31
	10	1,70	0,73	0,56
	15	0,80	0,35	0,98
	20	0,00	0,00	1,37
CE-350	5	2,55	1,10	0,15
	10	2,26	0,97	0,29
	15	1,99	0,86	0,42
	20	2,05	0,88	0,39
CE-600	5	2,34	1,01	0,25
	10	1,96	0,85	0,43
	15	1,40	0,60	0,70
	20	0,80	0,34	0,99
CONTROLE	-	2,86	1,23	0,00

#### 4.4 Análises Químicas

O experimento foi conduzido por um período de 120 dias, com avaliações realizadas no 1°, 7°, 14°, 30°, 60°, 90° e 120° dias após o início do experimento. As coletas consistiram na retirada de uma amostra de aproximadamente 80 cm<sup>3</sup> de solo de cada unidade experimental. O solo foi seco em estufa de circulação forçada a 40 °C por 48 horas, destorroado e passado em peneira de malha de 2 mm.

Foram realizadas as seguintes análises químicas: P e K por extração com Mehlich-1 e determinação por colorimetria e espectrofotometria de chama, respectivamente; Ca e Mg: por extração com KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e determinação por espectrometria de absorção atômica; H+Al: por extração com acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> a pH 7 e determinação por titulometria e CTC a pH 7, calculada segundo Embrapa (1997).

### 3.5 Análises Estatísticas

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para determinar diferenças significativas entre os tratamentos ao nível de  $p \leq 0,05$ . Quando houve diferenças significativas, os dados qualitativos foram submetidos ao teste de Tukey a 5 % de probabilidade e os dados quantitativos, ajustados a modelos de superfície de resposta em função das doses de biocarvão e épocas de avaliação. Quando os dados não se ajustaram a nenhum modelo de superfície de resposta, buscou-se o ajuste a modelos de regressão somente em função das doses de biocarvão.

## 5 RESULTADOS

Em geral, a adição de biocarvão, independentemente da fonte, dose aplicada e tempo de avaliação, aumentou os teores de P, K, Ca e, Mg e os valores da CTC em 107,9; 152,9; 16,6; 33,7 e 20,7 %, respectivamente, em relação ao solo sem a aplicação de biocarvão (controle). Os valores de P, K, Mg e a CTC foram maiores para os tratamentos com biocarvões de PC, quando comparados aos biocarvões de CE. Os biocarvões de CE aumentaram em 5,9 e 19,4 % os teores de Ca no solo para as temperaturas de 350 e 600 °C, respectivamente, em relação aos biocarvões de PC nas mesmas temperaturas (Tabela 4).

Os valores de Ca e CTC do solo foram aumentados com a elevação de temperatura para 600 °C de ambos os biocarvões. Para o K, este aumento foi verificado somente para os biocarvões de PC, não sendo observado efeito de temperatura nos tratamentos com biocarvões de CE.

O aumento da temperatura de pirólise promoveu efeito inverso sobre o Mg. Para este nutriente, os tratamentos com biocarvões produzidos a 350 °C promoveram maior teor de Mg que tratamentos com biocarvões produzidos a 600 °C. Quanto ao P, esta redução foi verificada somente para o biocarvão de CE, não havendo diferença na disponibilidade de P com o aumento da temperatura de pirólise nos biocarvões de PC (tabela 4).

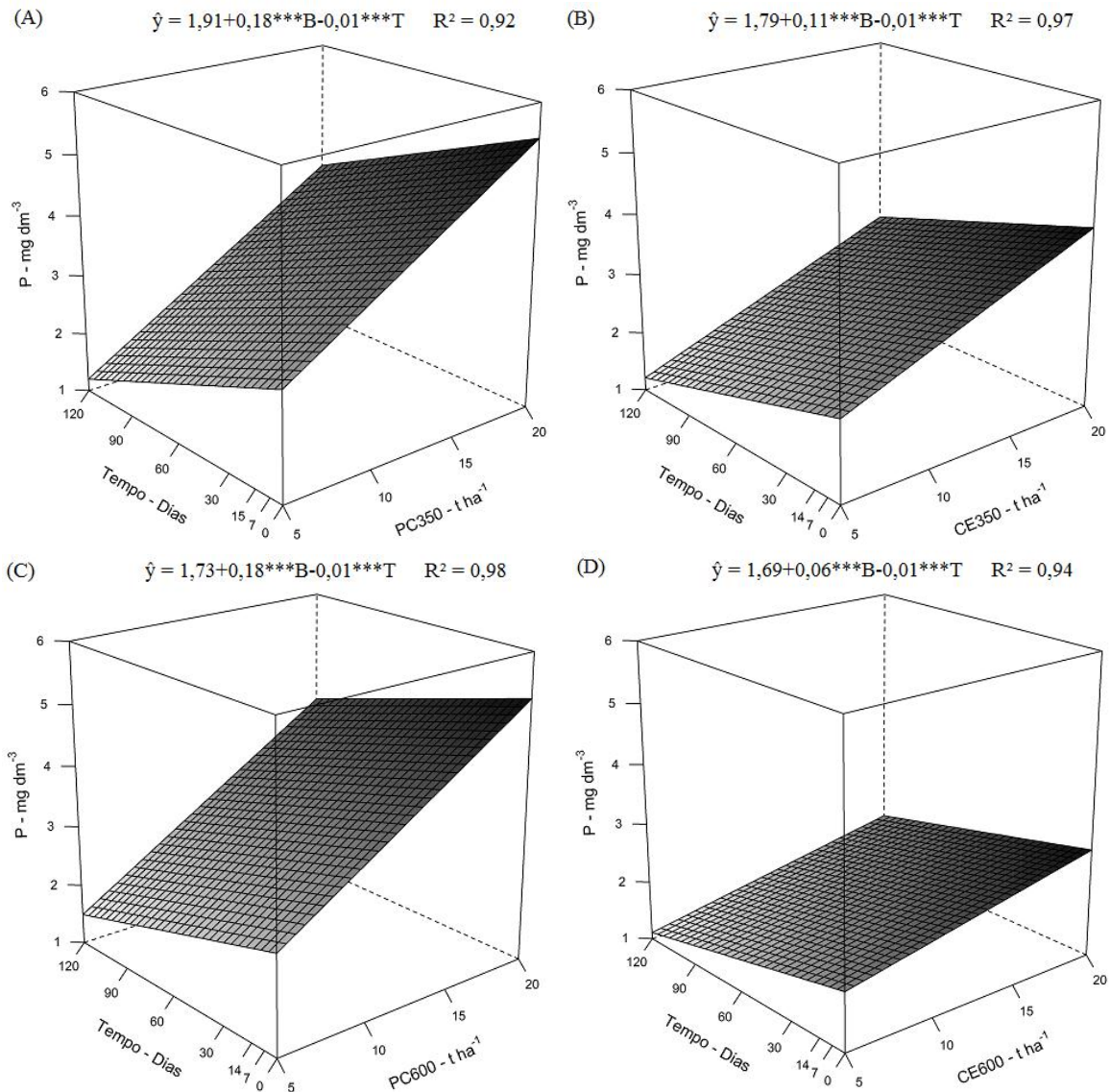
**Tabela 4-** Teores médios de nutrientes e valores de CTC do solo para os tratamentos com biocarvões de palha de café (PC) e casca de eucalipto (CE) produzidos nas temperaturas de 350 e 600 °C

Variável	Material	Temperatura °C		Controle Absoluto	CV%
		350	600		
P – mg dm <sup>-3</sup>	PC	3,51 aA	3,51 aA	1,42	1,00
	CE	2,73 bA	2,06 bB		
K – mg dm <sup>-3</sup>	PC	283,57 aB	350,10 aA	34,90	1,36
	CE	58,57 bA	59,06 bA		
Ca – cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	PC	2,69 bB	2,79 bA	2,50	0,65
	CE	2,85 aB	3,33 aA		
Mg – cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	PC	0,37 aA	0,29 aB	0,23	2,60
	CE	0,31 bA	0,26 bB		
CTC – cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	PC	6,14 aB	6,36 aA	5,00	0,49
	CE	5,64 bB	6,00 bA		

Letras iguais, minúsculas nas colunas e maiúsculas na linhas, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). CV: coeficiente de variação.

A disponibilidade de P mostrou-se crescente com o aumento das doses de biocarvão e decrescente com o passar do tempo de avaliação. O aumento da disponibilidade de P com a dose de aplicação de biocarvão foi maior para os tratamentos com os biocarvões PC350 e PC600 (Figuras 1A e 1C, respectivamente), porém o biocarvão PC600 apresentou menor redução de P disponível ao longo do tempo.

Os biocarvões de CE produzidos a 350 °C (Figura 1B) apresentaram aumento superior na disponibilidade de P com o aumento da dose de aplicação, quando comparados aos biocarvões de CE produzidos a 600 °C (Figura 1D).

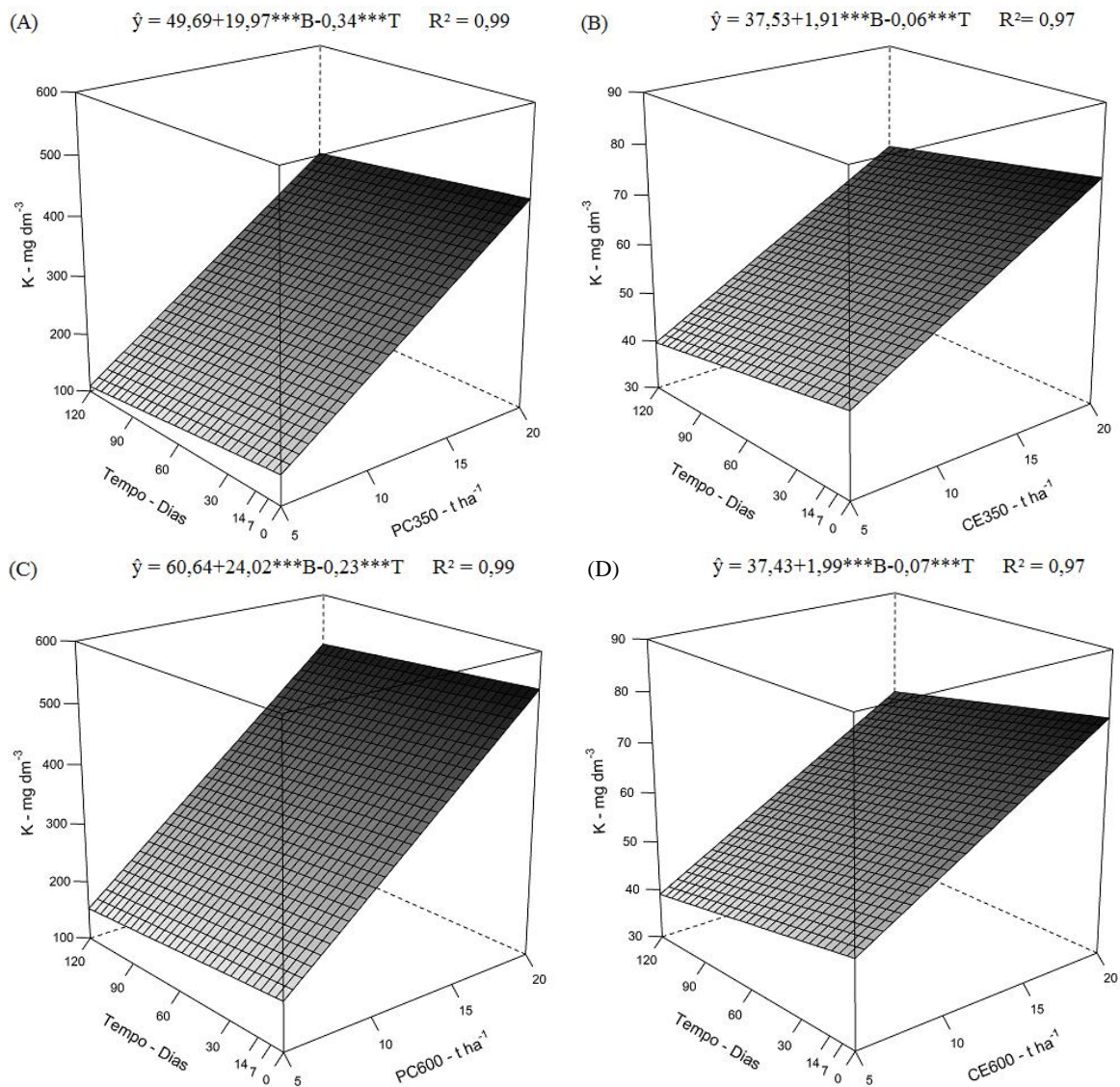


**Figura 1** – Fósforo (P) disponível no solo em função de doses dos biocarvões PC350 (A), CE350 (B), PC600 (C), CE600 (D) e tempos de avaliação. \*\*\*: significativo a 0,1 %.

O aumento da dose de aplicação de ambos os biocarvões promoveu aumento nos teores de K do solo, contudo os valores deste nutriente com a maior dose de biocarvões de CE (20 t ha<sup>-1</sup>, Figuras 2B e 2D) foram inferiores aos valores obtidos com a menor dose (5 t ha<sup>-1</sup>) dos biocarvões de PC (Figuras 2A e 2C).

Com o aumento da temperatura de pirólise e dose de aplicação do biocarvão de PC, foi observado incremento nos teores de K do solo. Entretanto, para os biocarvões de CE este efeito não foi observado.

Semelhantemente ao P, ocorreu redução nos teores de K com o aumento do tempo de avaliação. Esta redução foi maior para os biocarvões de PC, sendo o material PC350 o que sofreu maior redução.

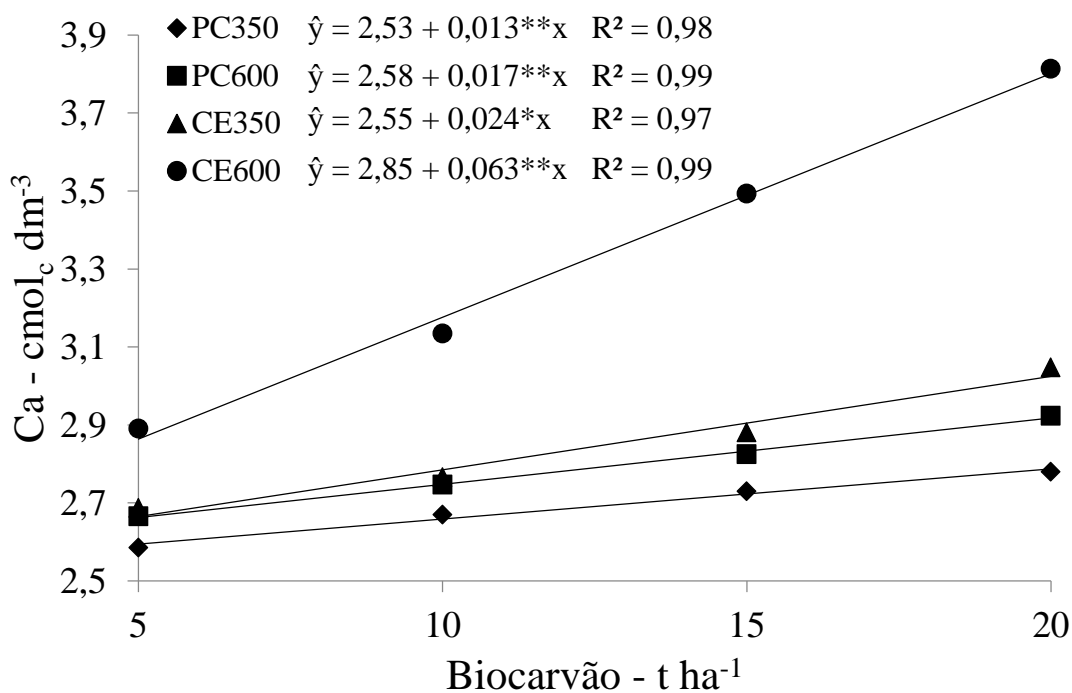


**Figura 2** – Teor de potássio trocável (K) no solo em função de doses dos biocarvões PC350 (A), CE350 (B), PC600 (C), CE600 (D) e tempos de avaliação. \*\*\*: significativo a 0,1%.

Os teores de Ca no solo decorrentes dos materiais PC350, PC600, CE350 e CE600 não se ajustaram a modelos de superfície de resposta em função do tempo e doses de biocarvão, não apresentando significância ( $p \geq 0,05$ ) para a variável tempo. Portanto, foram ajustados modelos de regressão somente em função das doses de biocarvão.



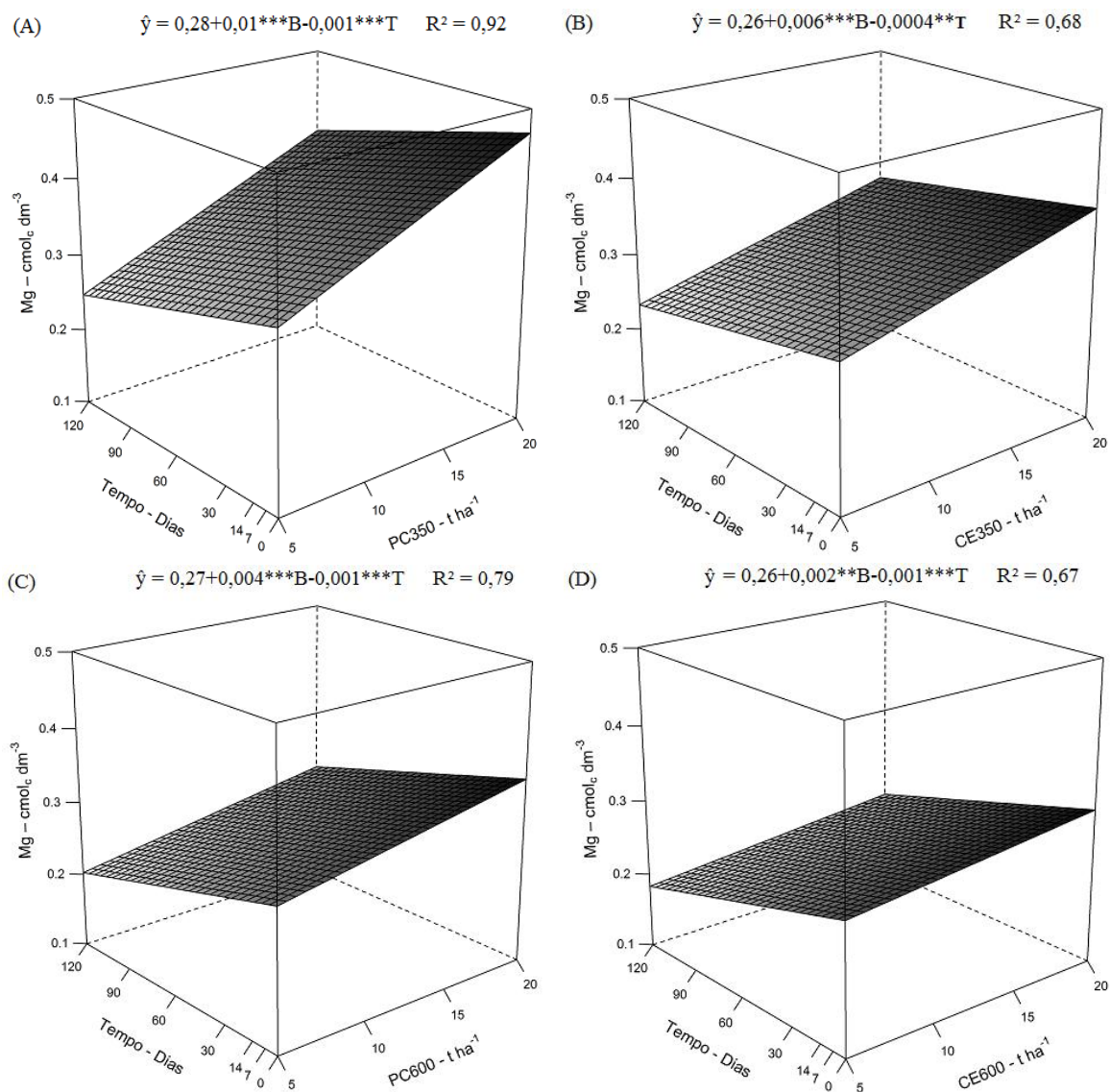
O aumento da dose de biocarvão promoveu aumento linear nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$ . Este efeito foi mais evidente para os biocarvões de CE. Quanto à temperatura de pirólise, biocarvões produzidos a 600 °C promoveram maior incremento de Ca no solo (Figura 3).



**Figura 3** – Teor de cálcio (Ca) no solo em função de doses de biocarvão. \*, \*\*: significativo a 5 e 1 % respectivamente.

Os teores de Mg no solo foram crescentes com o aumento das doses de biocarvão e decrescentes com o aumento do tempo de avaliação. Biocarvões de PC (Figuras 4A e 4C) apresentaram maiores teores de Mg que biocarvões de CE (Figuras 4B e 4C).

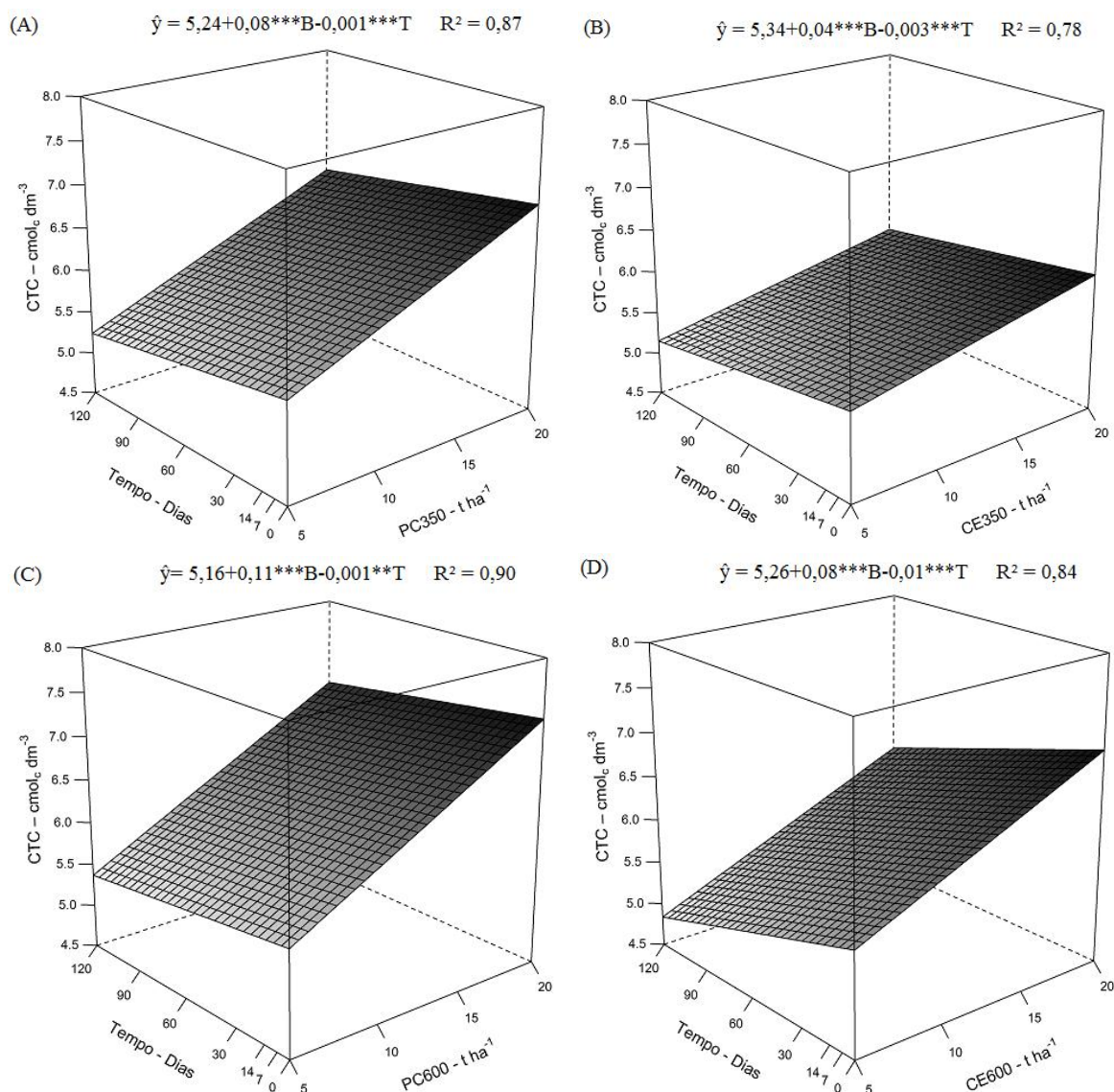
Os biocarvões produzidos nas temperaturas de 350 °C (Figuras 4A e 4B) proporcionaram maior concentração de Mg no solo que biocarvões produzidos a 600 °C (Figuras 4C e 4D).



**Figura 4** – Teor de magnésio (Mg) no solo em função de doses dos biocarvões PC350 (A), CE350 (B), PC600 (C), CE600 (D) e tempos de avaliação. \*\* e \*\*\*: significativo a 1 e 0,1% respectivamente.

Seguindo a tendência apresentada pelos nutrientes no solo, também houve incremento da CTC com o aumento da dose de aplicação de biocarvão, havendo pequena redução da CTC com o aumento do tempo de avaliação.

A aplicação de doses crescentes dos biocarvões de PC promoveu maior incremento da CTC (Figuras 5A e 5C). Quanto à temperatura de pirólise, biocarvões produzidos a 600 °C (figuras 5C e 5D) elevaram mais a CTC do solo.



**Figura 5**– Capacidade de troca catiônica (CTC) no solo em função de doses dos biocarvões PC350 (A), CE350 (B), PC600 (C), CE600 (D) e tempos de avaliação. \*\* e \*\*\*: significativo a 1 e 0,1% respectivamente.

## 6 DISCUSSÃO

O aumento dos teores de nutrientes no solo decorrente da adição de biocarvão se assemelha a resultados encontrados na literatura (WANG et al., 2014; YUAN; XU, 2011), onde as variações se deram principalmente conforme o conteúdo de nutrientes nas amostras de biocarvão e da taxa de aplicação.

Os resíduos de culturas contêm cátions básicos e outros nutrientes (WANG et al., 2009). Após a pirólise, estes são concentrados nas amostras de biocarvão e durante a

incubação, são em parte disponibilizados ao solo melhorando a fertilidade (YUAN: XU, 2011).

Trabalhando com biocarvões produzidos a partir de sete resíduos de culturas e animais, Enders et al. (2012) constataram que as concentrações de P, N, Ca, Mg, K e Na de biocarvões variaram principalmente em função do conteúdo elementar de cada nutriente na matéria prima. Os biocarvões utilizados neste trabalho tiveram comportamento semelhante, onde os nutrientes do material de origem foram concentrados nas estruturas dos biocarvões conforme apresentado por Barbosa (2016) (Tabela 1). No solo, os teores de nutrientes foram expressos conforme as características químicas de cada biocarvão utilizado no tratamento.

A elevação média dos teores de K no solo de 712 e 903 % para as temperaturas de 350 e 600 °C, respectivamente, com a adição de biocarvão de PC, demonstram que estes materiais, por possuírem teores acima de 150 g kg<sup>-1</sup> de K (Tabela 1), podem ser uma importante fonte de K no solo. Yuan; Xu (2011) relataram que após a incorporação de nove amostras de biocarvão, o K trocável no solo aumentou de 1,5 a 5,3 vezes em relação ao tratamento controle. Em conformidade com estes resultados, estudos realizados por Zhao et al. (2013), relatam maiores teores de K em biocarvões provenientes de resíduos de culturas agrícolas.

Os elevados teores de Ca observados nos biocarvões de CE (Tabela 1) e no solo tratado com os mesmos condizem com dados apresentados por Foelkel (2004), onde o Ca corresponde a 315 g kg<sup>-1</sup> de cinzas de casca de eucalipto. Jin et al. (2013) e Lee et al. (2013) também relatam elevados teores de Ca em biocarvões obtidos a partir de cascas de madeira.

A influência da temperatura de pirólise no aumento dos teores de nutrientes nos biocarvões (Tabela 1), e os teores de P, K e Ca no solo, pode ser atribuído à maior concentração destes elementos nos biocarvões obtidos com temperaturas mais elevadas (AL-WABEL et al., 2013). Estes elementos não são perdidos em quantidades significativas por volatilização durante o processo de pirólise (NOVAK et al., 2009). No entanto, a degradação térmica decorrente do aumento da temperatura é acompanhada pela perda de materiais voláteis e acúmulo de componentes inorgânicos na forma de cinzas (MCBEATH et al., 2015). As cinzas associadas ao biocarvão contém nutrientes solúveis e acessíveis às plantas (PENG et al., 2011).

Biocarvões produzidos a uma temperatura mais baixa podem conter grandes quantidades de nutrientes mais fracamente adsorvidos à estrutura do material do que biocarvões produzidas a uma temperatura mais elevada (GUNDALE; DELUCA, 2006). Isto se dá pelo aumento do teor de C e aromaticidade do biocarvão com a elevação da temperatura (CHEN et al., 2008). Estes relatos podem justificar a menor concentração de nutrientes no solo com a elevação da temperatura de pirólise, como ocorrido com o Mg em ambos os biocarvões e P para os tratamentos com biocarvões de CE, pois nem todo o nutriente contido no biocarvão é liberado para o solo e o aumento da aromaticidade dificulta a degradação do biocarvão (AL-WABEL et al., 2013).

Embora o P se apresente em baixas concentrações na composição dos biocarvões estudados, a adição de biocarvão proporcionou aumento dos teores de P no solo, o qual apresenta baixa disponibilidade deste nutriente (Tabela 2).

A disponibilidade de P por conta da adição de biocarvão no solo tem sido atribuído à precipitação de ferro (Fe) e de alumínio (Al) através da elevação do pH induzido pelo biocarvão (DeLUCA et al., 2015), à forte concorrência entre as forças de repulsão eletrostática induzidas por biocarvão, matéria orgânica dissolvida e sítios de sorção de P no solo (SCHNEIDER; HADERLEIN, 2016), além do biocarvão conter P em sua composição, podendo ser parcialmente solubilizado e disponível ao solo (DARI et al., 2016; JIN et al., 2016).

O aumento da CTC potencial do solo com a incorporação de biocarvão pode aumentar a capacidade de retenção de solos ácidos para os cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ . Trabalhos realizados por Yan; Xu (2011) demonstraram que o uso de biocarvões de diferentes resíduos diminuíram a acidez trocável e aumentaram a CTC, os teores de cátions trocáveis e a saturação de bases do solo.

O aumento da CTC e eventualmente da fertilidade do solo, pode reduzir a lixiviação dos nutrientes do solo através do movimento da água e fornecer reserva de nutrientes disponíveis para as raízes das plantas (QIAN et al., 2015).

O efeito sobre a CTC pode ser associado à desprotonação de  $\text{H}^+$  a partir da superfície de partículas minerais ou orgânicas com carga variável (presentes no solo), em consequência do aumento do pH pela alcalinidade do biocarvão (VAN ZWIETEN et al., 2010), reações de oxidação abiótica e carboxilação, na superfície das partículas do biocarvão, podem contribuir para a geração de cargas de superfície e incremento na CTC

(CHENG et al., 2006). O aumento da CTC pode também ser atribuído à alta superfície específica e densidade de carga do próprio biocarvão (LIANG et al. 2006).

Embora a CTC dos biocarvões seja maior nos materiais produzidos a 350 °C (Tabela 1), no solo, a maior CTC foi obtida nos tratamentos com biocarvões produzidos a 600 °C. Isto pode ser atribuído a uma provável maior superfície específica e uma maior concentração de cátions básicos destes materiais induzidos pelo aumento da temperatura e também, devido à CTC dos biocarvões e do solo ter sido estimada por métodos distintos.

O efeito na fertilidade do solo promovido pela adição de biocarvão pode diminuir ao longo do tempo através de lixiviação de cátions (MAJOR et al. 2010). No entanto, em experimento de campo, cinco anos após a incorporação de biocarvão de eucalipto nas proporções de 10 e 50 t ha<sup>-1</sup>, Raboin et al. (2016) constataram que o P disponível, K e Ca ainda eram significativamente maiores do que no tratamento controle.

Como o sistema de incubação deste estudo não permitia a lixiviação de nutrientes, as reduções ao longo do tempo foram provavelmente devido a formas minerais cada vez menos extraíveis, efeito também citado por Ippolito et al. (2014) e à adsorção específica de P, também citado por Zhang et al. (2016).

Dessa forma, devido a suas características, biocarvões apresentam um papel importante como condicionador do solo. O aumento do pH tem o efeito de reduzir a toxidez do Al em solos ácidos e pode aumentar a CTC, o P e cátions trocáveis responsáveis pela fertilidade do solo (ZHAO et al., 2015).

## **7 CONCLUSÕES**

Biocarvões de PC proporcionam maiores valores de P, K, Mg e CTC no solo. Já os tratamentos com biocarvões de CE se destacam pela maior concentração de Ca. Tratamentos com biocarvões produzidos em maior temperatura de pirólise (600 °C) apresentam maiores valores de Ca e CTC para ambos os biocarvões e, maior concentração de K com uso biocarvão de PC.

O aumento da dose de biocarvão proporciona maior concentração de nutrientes e CTC, independente do material de origem e temperatura de pirólise. Já o aumento do tempo de incubação proporciona para todos os tratamentos, redução nas concentrações de nutrientes, exceto o Ca, e redução da CTC do solo.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEGNEHU, G.; BASS, ADRIAN M. NELSON, P. N.; BIRD, M. I. Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, v. 543, p. 295-306, 2016.

AL-WABEL, M. I.; AL-OMRAN, A.; EL-NAGGAR, A. H.; NADEEM, M.; USMAN, A. R. A. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. *Bioresource Technology*, v. 131, p. 374-379, 2013.

ASAI, H.; SAMSON, B. K.; STEPHAN, H. M.; SONGYIKHANGSUTHOR, K.; HOMMA, K.; KIYONO, Y.; INOUE, Y.; SHIRAIWA, T.; HORIE, T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*, v. 11, p. 81-84, 2009.

BARBOSA, C. F. Caracterização de biocarvões produzidos em diferentes temperaturas. Universidade Federal do Espírito Santo - Centro de Ciências Agrárias e Engenharia. 76p. 2016. Dissertação Mestrado.

CHEN, B.; ZHOU, D.; ZHU, L.; SHEN, X. Sorption characteristics and mechanisms of organic contaminant to carbonaceous biosorbents in aqueous solution. *Science in China Series B: Chemistry*, v. 51, p. 464-472, 2008.

CHENG, C. H.; LEHMANN, J.; THIES, J. E.; BURTON, S. D.; ENGELHARD, M. H. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry*, v. 37, p. 1477-1488, 2006.

CHINTALA, R.; THOMAS, E. S.; LOUIS, M. M.; DAVID, E. C.; DOUGLAS, D. M.; SHARON, K. P.; SHARON, A. C.; JAMES, L. J. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures. *Clean Soil Air Water*, v. 42, p. 626-634, 2014.

DARI, B.; NAIR, V. D.; HARRIS, W. G.; NAIR, P. K. R.; SOLLENBERGER, L.; MYLAVARAPU, R. Relative influence of soil- vs. biochar properties on soil phosphorus retention. *Geoderma*, v. 280, p. 82–87, 2016.

DeLUCA, T. H.; GUNDALE, M. J.; MACKENZIE, M. D.; JONES, D. L. Biochar effects on soil nutrient transformations. *Biochar for environmental management: science. Technology and implementation*. Taylor and Francis, New York, USA, pp. p. 421-454, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

ENDERS, A.; HANLEY, K.; WHITMAN, T.; JOSEPH, S.; LEHMANN, J. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*, Oxford, v. 114, p. 644-653, 2012.

FIDEL, R. B.; LAIRD, D. A.; THOMPSON, M. L.; LAWVINENKO, M. Characterization and quantification of biochar alkalinity. *Chemosphere*, v. 167, p. 367-373, 2017.

FOELKEL, C. Casca da árvore do eucalipto : Aspectos morfológicos , fisiológicos , florestais , ecológicos e industriais , visando a produção de celulose e papel. *Eucalyptus On Line Book & Newsletter*, 2004, 109 p.

GUNDALE, M. J.; DELUCA, T. H. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal. *Forest Ecology and Management*, v. 231, p. 86-93, 2006.

IPPOLITO, J. A.; STROMBERGER, M. E.; LENTZ, R. D.; DUNGAN, R. S. Hardwood biochar influences calcareous soil physicochemical and microbiological status. *Journal of Environmental Quality*, v. 43, p. 681-689, 2014.



JEFFERY, S.; MEINDERS, M. B. J.; STOOF, C. R.; BEZEMER, T. M.; VAN DE VOORDE, T. F. J.; MOMMER, L.; VAN GROENIGEN, J. W. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. *Geoderma*, v. 251-252, p. 47-54, ago. 2015.

JIN, W.; SINGH, K.; ZONDLO, J. Pyrolysis Kinetics of Physical Components of Wood and Wood-Polymers Using Isoconversion Method. *Agriculture*, v. 3, n. 1, p. 12-32, 2013.

JIN, Y.; LIANG, X.; HE, M.; LIU, Y.; TIAN, G.; SHI, J. Manure biochar influence upon soil properties, phosphorus distribution and phosphatase activities: A microcosm incubation study. *Chemosphere*, v. 142, p. 128-135, 2016.

KUPPUSAMY S.; THAVAMANI, P.; MEGHARAJ, M.; VENKATESWARLU, K.; NAIDU, R. Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: Current knowledge and future research directions. *Environment International*, v. 87, p. 1-12, 2016.

LEE, Y.; PARK, J.; RYU, C.; GANG, K. S.; YANG, W.; PARK, Y. K.; HYUN, S. Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C. *Bioresource Technology*, Oxford, v. 148, p. 196-201, 2013.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 11, p. 395-419, 2006.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: an introduction. In: \_\_\_\_\_. (Ed.). *Biochar for environmental management science and technology*. New York: Earthscan 2009. p. 1-9.

LEHMANN, J.; RILLIG, M.; THIES, J.; MASIELLO, C.; HOCKADAY, W.C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota: a review. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011.

LIANG, B.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; GROSSMAN, J.; O'NEILL, B.; SKJEMSTAD, J. O.; THIES, J.; LUIZAO, F. J.; PETERSEN, J.; NEVES, E. G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal* v. 70, p. 1719-1730, 2006.

LIM, T. J.; SPOKAS, K. A.; FEYEREISEN, G.; NOVAK, J. M. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*, v. 142, p. 136-144, 2016.

LIU, Y.; LUA, H.; YANG, S.; WANG, Y. Impacts of biochar addition on rice yield and soil properties in a coldwaterlogged paddy for two crop seasons. *Field Crops Research*, v. 191 p. 161-167, 2016.

MAJOR, J.; RONDON, M.; MOLINA, D.; RIHA, S.J.; LEHMANN, J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant Soil*, v. 333, p. 117-128. 2010.

MCBEATH, A. V.; WURSTER, C. M.; BIRD, M. I. Influence of feedstock properties and pyrolysis conditions on biochar carbon stability as determined by hydrogen pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, v. 73, p. 155-173, 2015.

NOVAK, J. M.; LIMA, I.; XING, B.; GASKIN, J. W.; STEINER, C.; DAS, K. C.; AHMEDNA, M. A.; REHRAH, D.; WATTS, D. W.; BUSSCHER, W. J. SCHOMBERG, H. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Environmental Science*, v. 3, p. 195-206, 2009.

PACHECO, L. P.; PETTER, F. A. Benefits of cover crops in soybean plantation. In: *Brazilian Cerrados*. In: Tzi Bun Ng (ed). *Soybean - Applications and Technology*, p. 67-94, 2011.

PENG, X.; YE, L. L.; WANG, C. H.; ZHOU, H.; SUN, B. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil & Tillage Research*, v. 112, p. 159-166, 2011.

QIAN, K.; KUMAR, A.; ZHANG, H.; BELLMER, D.; HUHNKE, R. Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, p. 1055-1064, 2015.

Raboin, L. M.; Razafimahafaly, A. H. D.; Rabenjarisoa, M. B.; Rabary, B.; Dusserre, J.; Becquer T. Improving the fertility of tropical acid soils: Liming versus biochar application? A long term comparison in the highlands of Madagascar. *Field Crops Research*, v. 199, p. 99-108, 2016.

RITTL, T. F.; ARTS, B.; KUYPER, T. W.; Biochar: An emerging policy arrangement in Brazil?. *Environmental Science & Policy*, v. 51, p. 45-55, 2015.

SCHNEIDER, F.; HADERLEIN, S. B. Potential effects of biochar on the availability of phosphorus-mechanistic insights. *Geoderma*, v. 277, p. 83-90, 2016.

SOHI, S. P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, v. 105, p. 47-82, 2010.

SULIMAN, W.; HARSH, J. B.; ABU- LAIL, N, I.; FORTUNA, A. M.; DALLMEYER, I.; PÉREZ, M. G. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of the Total Environment*, v. 574, p. 139-147, 2017.

TAG, A. T.; TAGHIZADEH-TOOSI, A.; CLOUGH, T. J.; SHERLOCK, R. R.; CONDRON, L. M. Effects of Feedstock Type and Pyrolysis Temperature on Potential Applications of Biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 120, p. 200-206, 2016.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.609-618, 2005.

VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; CHAN, K. Y.; DOWNIE, A.; RUST, J.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, v. 327, p. 235-246, 2010.

WANG, Z.; CAO, J.; WANG, J. Pyrolytic characteristics of pine wood in a slowly heating and gas sweeping fixed-bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 84, p. 179-184. 2009.

WANG, Y.; YINA, R.; LIU, R. Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 110, p. 375-381, 2014.

XU, G.; SUN, J.; SHAO, H.; CHANG, S. X. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecological Engineering*, v. 62, p. 54-60, 2014.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. v. 19, p. 1467-1476, 1988.

YUAN, J. H.; XU, R. K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management*, v. 27, p. 110-115, 2011.

YUAN, J. H.; XU, R. K.; ZHANG, H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 3, p. 3488-3497, 2011.

ZHANG, H.; CHEN, C.; GRAY, E. M.; BOYD, S. E.; YANG, H.; ZHANG, D. Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: a phosphate adsorbent and a source of available phosphorus. *Geoderma*, v. 276, p. 1-6, 2016.

ZHAO, L.; CAO, X.; MAŠEK, O.; ZIMMERMAN, A. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v. 256-257, p. 1-9, 2013.

ZHAO, R.; N COLES, N.; KONG, Z.; WU, J. Effects of aged and fresh biochars on soil acidity under different incubation conditions. *Soil & Tillage Research*, v. 146 p. 133-138, 2015.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstram que a aplicação de biocarvão melhora as propriedades de fertilidade do solo. Os biocarvões utilizados, aumentam o pH e a capacidade do solo em reter nutrientes e mantê-los em formas disponíveis para as plantas, exercendo influência, principalmente no K, Ca, P.

Ambos os materiais testados (PC e CE) apresentaram grande potencial para elevar o pH do solo, principalmente quando produzidos na temperatura de 600 °C. A utilização destes biocarvões em solos ácidos pode ser uma prática vantajosa, principalmente em locais onde não se tem fácil acesso ao calcário. A elevação do pH do solo neutraliza o  $Al^{3+}$  tóxico às plantas, além de promover benefícios indiretos como elevação da CTC e maior disponibilidade de nutrientes.

Nas condições testadas, a dose mais elevada (20 t ha<sup>-1</sup>) dos biocarvões adicionados não elevaram o pH do solo além da faixa ideal para a maioria das culturas. Porém, deve-se estar atento quanto à recomendação de utilização destes materiais em solos mais arenosos de menor poder tamponante de pH e quanto ao uso destes materiais em consórcio com a prática de calagem. Pois, nestas condições, devido ao alto poder de neutralizante destes biocarvões, o pH do solo poderia ser elevado além da faixa ideal, promovendo malefícios como a deficiência de micronutrientes dentre outros.

Os biocarvões de PC se destacaram pela alta capacidade de fornecer e disponibilizar K ao solo, principalmente na temperatura de 600 °C. Estes materiais podem ser uma importante fonte alternativa de fertilizante potássico, principalmente em lavouras cafeeiras as quais demandam altas quantidades deste nutriente, ou em cultivos orgânicos, onde a utilização de KCl é restrita. Porém, os resultados deste trabalho demonstram que o K contido no biocarvão é rapidamente liberado ao solo, podendo ultrapassar os 500 mg de K por dm<sup>-3</sup> de solo na dose de 20 t ha<sup>-1</sup> de ambos os biocarvões. Nestas proporções, a adição de biocarvão de PC pode causar desbalanço nutricional, toxidez e lixiviação de K no solo. Portanto, os resultados desta pesquisa apontam que 10 t ha<sup>-1</sup> de biocarvão de PC, seria uma dose mais adequada para uma disponibilidade mais balanceada deste cátion no solo.

Biocarvões de CE se destacam pela maior concentração de Ca e capacidade de disponibilizar este nutriente na forma trocável no solo. Verificou-se, maior concentração

de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo, com a adição de biocarvão de CE produzido a 600 °C. Este material, quando aplicado na proporção de 20 t ha<sup>-1</sup>, disponibilizou aproximadamente 300 kg ha<sup>-1</sup> de  $\text{Ca}^{2+}$ , mostrando-se uma importante fonte de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo.

Embora os biocarvões estudados possuam baixa concentração de P em sua estrutura, a disponibilidade de P no solo por conta da adição de biocarvão chama atenção, principalmente quanto aos biocarvões de PC. Atribui-se essa disponibilidade principalmente por conta da precipitação de Fe e de Al através da elevação do pH e a forte concorrência entre as forças de repulsão eletrostática induzidos pelo biocarvão, matéria orgânica dissolvida e sítios de sorção de P no solo. Portanto a adição de biocarvão ao solo pode aumentar a eficiência da adubação fosfatada pela redução da adsorção de P no solo.

O aumento da CTC do solo com a incorporação de biocarvão aumenta a capacidade de retenção principalmente dos solos ácidos para os cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ . O aumento da CTC pode reduzir a lixiviação dos nutrientes do solo e fornecer reserva de nutrientes disponíveis para as plantas.

Diante dos resultados expostos neste trabalho, o uso de biocarvão como condicionador do solo, mostra-se como uma pratica promissora, tanto na parte agronômica, quanto pela reutilização de um resíduo que se mal descartado, poderia causar efeito contaminante ao meio ambiente. No entanto, é importante realizar novas pesquisas para avaliar o efeito destes materiais na parte química, física e biológica do solo em campo, principalmente em longo prazo.