
Carbono orgânico e atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob aplicação de biocarvão cultivado com *Eucalyptus urograndis*

| Renato Ribeiro Passos
UFES

| Danilo Andrade Santos
UFES

| Amanda Faé Sartori
UFES

| Alex Justino Zacarias
UFES

| Iohara Werneck Mendonça
UFES

| Otacílio José Passos Rangel
UFES

| Lázaro Longue Mosa
UFES

| Demetrius Profeti
UFES

| Luciene Paula Roberto Profeti
UFES

| Ronaldo Willian da Silva
UFES

RESUMO

A conversão de resíduos orgânico em biocarvões tem sido apontado como potencial estratégia para aproveitamento de resíduos da produção silvícola como condicionadores de solo. O presente estudo objetivou-se avaliar o potencial uso de biocarvões de casca de eucalipto produzidos sob duas temperaturas de pirólise e aplicado em cinco diferentes doses sobre o carbono orgânico e atributos físicos do solo cultivado com *Eucalyptus urograndis*. O ensaio de campo foi desenvolvido sob um delinamento em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 5, sendo: duas temperaturas de pirólise (350 °C e 600 °C) e cinco doses de biocarvão (0; 0,25; 0,5; 1; e 2% volume/volume), com três repetições. Aos 365 e 730 dias após o plantio do eucalipto, foram realizadas amostragens de solo para obtenção dos teores de carbono e estoque carbono, densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, conteúdo de água na capacidade de campo, ponto de murcha e água disponível. Os resultados experimentais não indicam efeitos diferencial entre as temperaturas de pirolise, contudo são verificados aumentos em COT, Estoque de C, DS, Θ_{CC} , Θ_{PMP} , Θ_{AD} com o aumento das doses dos biocarvões aplicados. E entre os tempos de avaliação foram verificados redução da Θ_{AD} , aumento da PT, MICRO, Θ_{CC} , Θ_{PMP} . Os resultados apontam potencial de aproveitamento das cascas de eucalipto sob a forma de biocarvões para uso nos processos de produção silvícola do eucalipto, contribuindo com a segurança hídrica do processo de produção e sequestro de carbono no solo.

Palavras-chave: Matéria Orgânica Carbonizada, Física do Solo, Solos Florestais.

■ INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas têm sido publicados importantes investigações sobre a presença e incorporação de materiais orgânicos parcialmente ou totalmente carbonizados alterando atributos biológicos (LEHMANN *et al.*, 2011), químicos (GUL *et al.*, 2015) e físicos (MUKHERJEE; LAL, 2013) do solo, sendo estes materiais denominados biocarvões.

No que diz respeito aos efeitos de biocarvões sobre os atributos físicos do solo, as pesquisas publicadas têm objetivado alcançar uma melhor compreensão da interação destes materiais com a fração mineral do solo (GLASER *et al.*, 2000; BRODOWSK *et al.*, 2006; PRONK *et al.*, 2012), observando os efeitos sobre os fenômenos relacionados com a estrutura do solo tais como: estabilidade e agregação dos solos (AWAD *et al.*, 2013; HERARTH *et al.*, 2013; JIEN & WANG, 2013), densidade e porosidade do solo, resistência do solo à penetração de raízes e relações com a dinâmica da água (LEHMANN & JOSEPH, 2015; PEREIRA *et al.*, 2012; MUHKERJEE & LAL, 2013; ABEL *et al.*, 2013).

Em virtude dos diferentes efeitos que os biocarvões produzem sobre o solo, os mesmos têm sido classificados como condicionadores de solos e as principais características que potencializam seu papel como condicionadores e consequentes efeitos sobre a produção vegetal são a sua alta porosidade e área superficial específica associadas à presença de cargas elétricas provenientes de grupos funcionais ligados à estrutura aromática resultantes das moléculas orgânicas carbonizadas, além do conteúdo mineral (cinzas) presentes nestes materiais. Tais características são, em presença e magnitude, variáveis em função, principalmente, da biomassa precursora e das condições de produção (LEHMANN; JOSEPH, 2015).

Cascas de eucalipto possuem características potenciais para serem como convertidas em biocarvões: são materiais ricos em lignina (ANDRADE *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2011) e gerados em alta quantidade nos processos de produção silvícola (MIRANDA *et al.* 2002; SEIXAS *et al.*, 2005; YADAV *et al.*, 2002). Tais características, em conjunto, conferem ao mesmo potencial uso em processos de conversão energética via pirólise da biomassa, cujo aproveitamento do resíduo sólido (biocarvão), deste processo, pode elevar seu uso dentro da cadeia produtiva do eucalipto, retornando assim a casca de eucalipto carbonizada como um produto condicionador de solo nas áreas de cultivo do eucalipto.

Neste capítulo objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de doses de biocarvão de casca de eucalipto produzidos sob duas temperaturas de pirólise sobre o carbono orgânico e atributos químicos do solo cultivado com eucalipto.

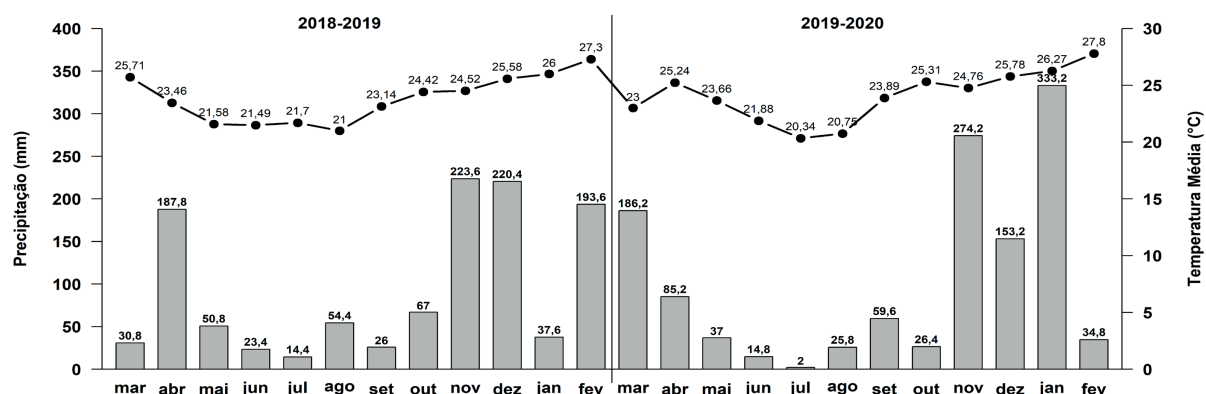
■ MATERIAL E MÉTODOS

Área de instalação do experimentos

Um ensaio de campo foi estabelecido na área experimental do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) - Campus de Alegre, localizado em Rive, distrito de Alegre, Estado do Espírito Santo, nas as coordenadas geográficas de latitude Sul de 20° 46' 7,436" S e longitude Oeste de 41° 27' 16.243" W e com altitude de 131 metros sob Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média.

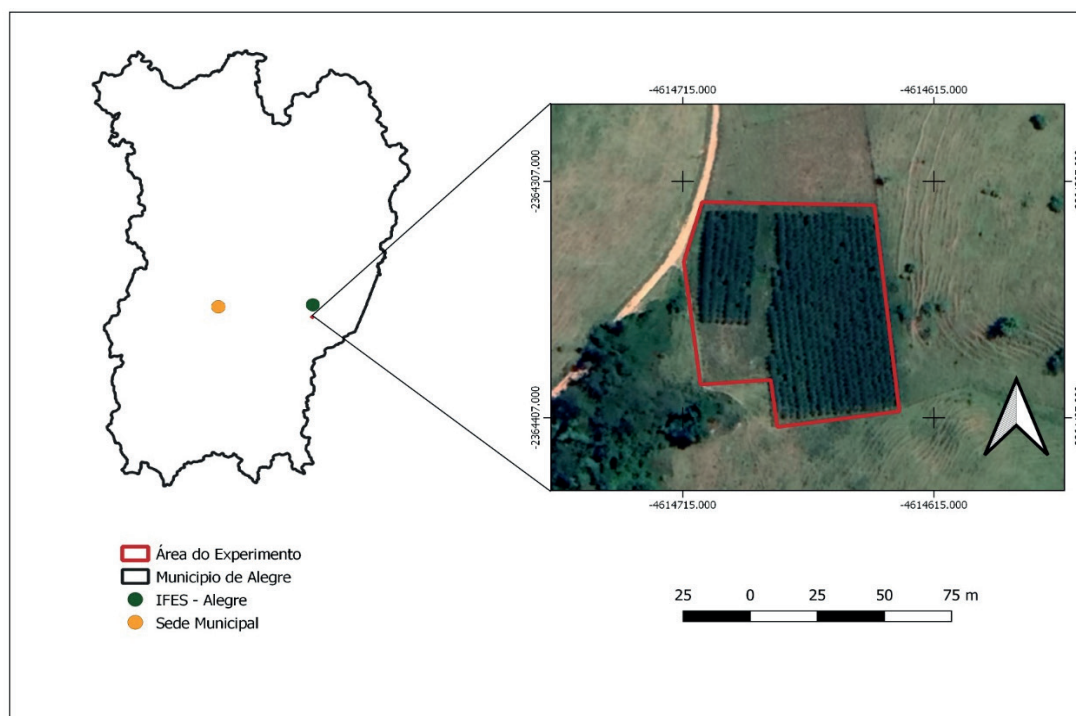
O clima da região é classificado como Aw na classificação climática de Köppen-Geiger, caracterizado por apresentar clima tropical com verão quente e chuvoso e inverno seco. Durante o período de estudo deste trabalho foram contabilizados um total de precipitação de 2.048,27 mm de precipitação e temperatura média de 24,7°C entre o período de 15 de março de 2018 a 28 de fevereiro de 2020 (INMET, 2020). As médias mensais de temperatura e precipitação durante o período estudado são apresentadas na Figura 1.

Figura 1. Temperatura média e precipitação mensal durante o período de estudo no município de Alegre/ES. Período experimental março de 2018 a fevereiro de 2020.



Antes da instalação do experimento ocorreram diferentes usos do solo na área. Em 2011, era utilizada para criação de gado com sistema de piquetes. No ano de 2012 foi inserida a criação de caprinos. A pastagem era conduzida com correção de acidez do solo, adubações de manutenção e irrigação. A figura 2 mostra a localização da área experimental, dentro da área experimental do Ifes – Campus de Alegre.

Figura 2. Mapa da área experimental referente ao ano de 2020, localizada em Rive, distrito de Alegre, Estado do Espírito Santo.



Produção de caracterização dos biocarvões

As cascas de eucalipto foram provenientes de resíduos do beneficiamento de plantios da região do Sul do Estado do Espírito Santo, sendo o material fornecido pela Usina Bragança. As cascas foram picadas para redução do tamanho inicial e então carbonizadas em reator de pirólise, sob duas temperaturas finais (350 °C e 600 °C), com tempo de residência na temperatura final de 60 min.

Para caracterização dos biocarvões, amostras passaram pelas seguintes análises: teores de C, H, O e N em analisador elementar (PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O); teores dos nutrientes P, K, Ca, Mg, pela incineração das amostras (1 g) em forno tipo mufla (550 °C por 4 h), com a solubilização das cinzas em HCl 0,5 mol L⁻¹ e dosagem por espectrofotometria de emissão atômica com plasma induzido (EEA-PI); pH em água (1:20) (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Teores elementares¹ C, H, N e O e relações C/N, H/C e O/C em biocarvões de casca de eucalipto produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 e 600 °C)

Biocarvão/ Temperatura	Teor elementar (%)				C/N	H/C	O/C
	C	H	N	O			
350 °C	54,99	3,12	0,60	41,28	107,01	0,68	0,56
600 °C	65,05	1,44	0,51	34,37	149,80	0,26	0,38

¹Determinados em Analisador Perkin Elmer Serie II 2400; O (%) = 100 - C - H - N.

Tabela 2. pH e teores totais de macronutrientes¹ presentes nos biocarvões de casca de eucalipto produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 °C e 600 °C)

Variável	350 °C	600 °C
pH em água	7,1	8,1
P (dag kg ⁻¹)	0,07	0,09
K (dag kg ⁻¹)	0,57	0,70
Ca (dag kg ⁻¹)	2,64	3,31
Mg (dag kg ⁻¹)	0,41	0,57

¹Obtidos por digestão nitroperclórica (EMBRAPA, 1997).

Delineamento experimental

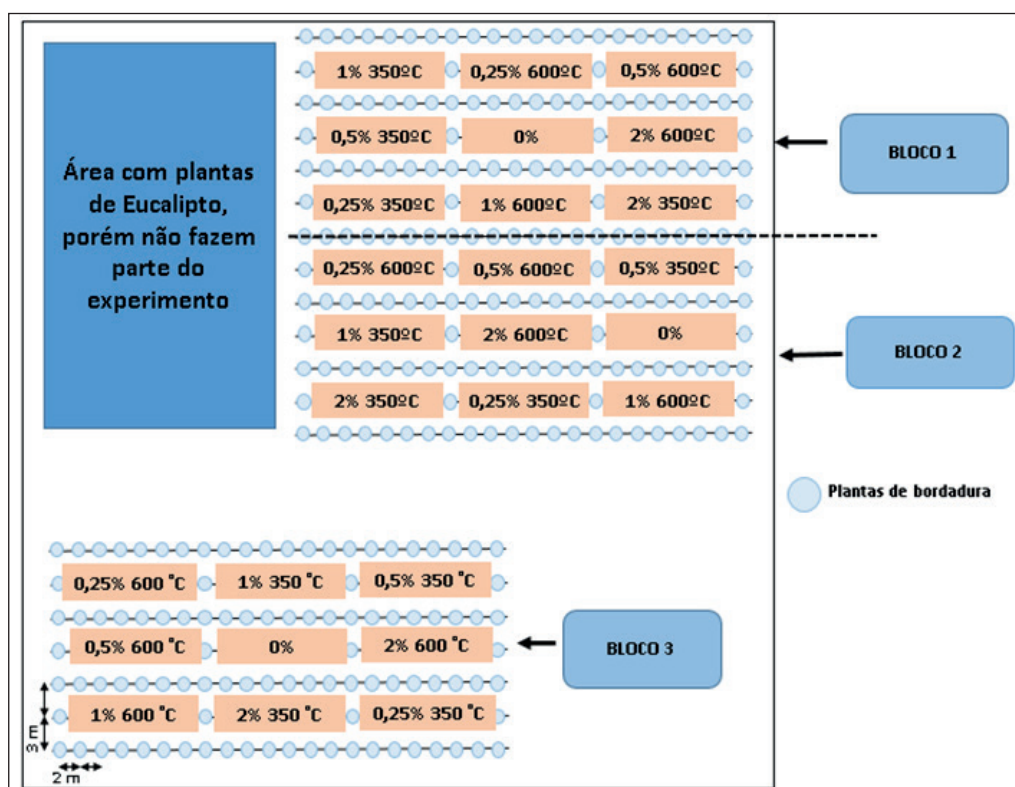
Em março de 2018, o ensaio de campo foi estabelecido distribuindo os tratamentos sob um delineamento em blocos casualizados em um esquema fatorial 2 x 5, com três repetições. Os fatores estudados foram: duas temperaturas de pirólise (350 °C e 600 °C) e cinco doses de biocarvão (0; 0,25; 0,5; 1,0 e 2,0 % de volume/volume, considerando-se o volume de solo do sulco de plantio).

Cada tratamento, em cada bloco, foi composto por um total de 6 plantas de *Eucalyptus urograndis*, dispostas em linhas, previamente sorteadas em cada bloco. Os biocarvões foram distribuídos, previamente ao plantio, em sulco, com profundidade de 30 cm e largura de 40 cm (Figura 3). O espaçamento aplicado para o plantio foi de 3 m entre linhas de plantio por 2 m entre plantas. Entre cada tratamento e bloco foi introduzida uma linha de plantio sem a adição de biocarvão, constituindo assim as bordaduras do experimento (Figura 4).

Figura 3. Biocarvões no sulco de plantio.



Figura 4. Croqui da área representando a distribuição espacial dos tratamentos dispostos em cada bloco.



Caracterização química e física do solo

Visando à caracterização química e física do solo, bem como a adequada divisão dos blocos de plantio, antes da implantação do experimento, amostras de solo foram coletadas e analisadas na profundidade de 0-30 cm (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3. Caracterização¹ química do solo utilizado na montagem do experimento.

pH(H ₂ O)	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	T	SB	V
	-----mg/dm ³ -----			-----cmolc/dm ³ -----						%
5,88	13,64	125,00	6,00	2,30	1,01	0,00	2,58	6,25	3,66	58,4

¹pH em H₂O (relação 1:2,5); K, Na = potássio e sódio trocáveis por fotometria de chama, após extração com Mehlich-1; Ca, Mg = cálcio e magnésio trocáveis por extração com cloreto de potássio 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 por colorimetria após extração com Mehlich-1; T (Capacidade de troca de cátions potencial) = (K/390)+(Na/230)+Ca+Mg+(H+Al) (Teixeira et al., 2017).

Tabela 4. Caracterização¹ física do solo utilizado na montagem do experimento.

Areia Total (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação
68	7	25	Textura média

¹Silte e argila: Método da pipeta -agitação lenta

Atividades de manutenção

Durante a condução do experimento, foram realizadas as atividades de manutenção da área de estudos, por meio do controle de pragas e doenças, irrigação, roçagem, adubação e controle de plantas invasoras.

Devido às condições de fertilidade do solo (Tabela 3), já favoráveis à cultura do eucalipto, optou-se pela ausência de correção da acidez do solo. Desta forma, seguiram-se apenas as recomendações de adubação de manutenção. A primeira parcela de adubação ocorreu durante o plantio das mudas de eucalipto, onde a adubação fosfatada foi realizada em dose única no plantio e dividida em duas partes de mesma massa que foram aplicadas em lados adjacentes (10 cm) às mudas na profundidade de 30 cm, e quantidade total equivalente a 20 kg de P_2O_5 ha⁻¹ com base numa camada de 20 cm de solo. As adubações nitrogenada e potássica foram aplicadas em um total equivalente a 40 kg de N ha⁻¹ e 30 kg K₂O ha⁻¹, respectivamente, sendo divididas em 3 parcelas, uma em plantio, juntamente com a adubação fosfatada, e duas em cobertura aos 90 dias e aos 270 dias após o plantio, realizadas na projeção da copa da planta.

As adubações foram realizadas utilizando os formulados N-P-K, 03-17-00 mais 12-00-12, durante o plantio para suprir a demanda dos três nutrientes, e com somente o 12-00-12 para suprir a demanda por N e K durante as adubações de cobertura.

Determinações experimentais

Aos 365 e 730 dias após o plantio do eucalipto, foram realizadas amostragens de solo na linha de plantio, no centro da distância entre duas plantas, na posição média da linha de cada tratamento, nas camadas de 0-10 cm e 10-30 cm para avaliar o efeito dos tratamentos sobre o carbono orgânico e os atributos físicos do solo.

As amostras deformadas foram secas a sombra, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Nestas amostras foram determinados os atributos físicos: densidade de partículas (DP), umidade do solo no potencial mátrico de -10 kPa (Θ_{CC}), umidade do solo no potencial mátrico de -1500 kPa (Θ_{PMP}), água disponível no solo (AD) pela diferença de umidade entre Θ_{CC} e Θ_{PMP} . O conteúdo orgânico foi investigado a partir dos teores de carbono orgânico total (COT) que foi quantificado por oxidação em via úmida com $K_2Cr_2O_7$ 0,167 mol L⁻¹ em meio sulfúrico (H_2SO_4) com aquecimento externo (bloco digestor) (MENDONÇA; MATOS, 2017).

Com auxílio do amostrador de Uhland, coletaram-se amostras indeformadas em anel volumétrico, avaliando-se os seguintes atributos físicos do solo: densidade do solo (DS); porosidade total (PT) pela expressão $PT = 1 - Ds/Dp$; microporosidade (MICRO); macroporosidade (MACRO) pela expressão: $MACRO = PT - MICRO$.

A partir dos dados de teores de COT e densidade do solo (DS) foram calculados os estoques de carbono, em Mg ha⁻¹, em cada profundidade, conforme a seguinte equação: $\text{Estoque de C} = (\text{COT ou } x \text{ DS } \times e) / 10$; onde Estoque de C = estoque de carbono orgânico

total em mg ha^{-1} ; COT = teor de carbono orgânico total da camada amostrada, em g kg^{-1} ; DS = densidade do solo da camada (kg dm^{-3}); e = espessura da camada de solo (cm).

Análises estatísticas

O conjunto de dados de cada atributo avaliado foi submetido à análise de variância para obtenção da soma dos quadrados e graus de liberdade dos resíduos. Seguiu-se então com a análise, via contrastes ortogonais (Tabela 5), onde os contrastes C1 e C2 avaliaram as diferenças entre temperaturas de pirólise em que foram produzidos os biocarvões em uma mesma época de avaliação e os contrastes C3 e C4 avaliam o efeito do tempo (época de avaliação) para os dados obtidos em tratamentos sob aplicação de um mesmo tipo de biocarvão/temperatura de pirólise. Foram também realizadas análises de regressão a fim de investigar a relação entre as doses dos biocarvões sobre o carbono orgânico e os atributos físicos do solo avaliados. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados com o software R (R Core Team, 2021).

Tabela 5. Coeficientes e contrastes ortogonais aplicados ao carbono orgânico e aos atributos físicos do solo estudados

Tratamentos	C1*	C2	C3	C4
350 °C/365 dias	1	0	1	0
600 °C/365 dias	-1	0	0	1
350 °C/730 dias	0	1	-1	0
600 °C/730 dias	0	-1	0	-1

* **C1** = 350°C vs 600°C/365 dias; **C2** = 350°C vs 600°C/730 dias; **C3** = 350°C/365 dias vs 350°C/730 dias; **C4** = 600°C/365 dias vs 600°C/730 dias;

■ RESULTADOS

Teores e estoques de Carbono no Solo

O conteúdo orgânico, sobretudo em solos altamente intemperizados, possui papel chave na expressão do potencial da produção vegetal em áreas agrícolas. Diferentes parâmetros podem ser utilizados para investigar o material orgânico do solo, tais como o teor e estoque de carbono do solo.

O teor de carbono orgânico total expressa o conteúdo de carbono, de origem orgânica, presente em uma determinada massa de solo, e o estoque de carbono expressa o conteúdo de carbono presente em um volume de solo segundo uma área de 100 m x 100 m (hectare) com base na profundidade em que o solo foi amostrado. Estes parâmetros servem, dentre outros aspectos, como indicadores da sustentabilidade do sistema de manejo. Além disso destaca-se que o conteúdo orgânico tem papel chave no comportamento dos atributos físicos do solo.

Os teores médios de carbono orgânico total pouco variaram entre os tratamentos e épocas de avaliação, com valores sempre próximos a 1,0 dag kg⁻¹ (Tabela 6). Contudo, é importante notar que as aparentes pequenas variações nos teores de carbono podem desenvolver diferenças importante nos estoques de carbono, inclusive interessante quando considerado o contexto do mercado de carbono, tais como uma amplitude média de 4 Mg de carbono na camada de 10-30 cm entre os tratamentos sob biocarvões de 350 °C (\cong 26 Mg ha⁻¹) e 600 °C (\cong 30 Mg ha⁻¹), ainda que os valores observados não tenham surtido em diferenças estatisticamente significativas (Tabela 7).

Tabela 6. Teores de Carbono Orgânico Total (COT) e Estoque de Carbono nas camadas de 0-10 cm e 10-30 cm, em função das temperaturas de pirólise em que foram produzidos os biocarvões (350°C e 600°C) e épocas de avaliação (365 dias e 730 dias)

Variável	365 dias		730 dias	
	350°C	600°C	350 °C	600°C
----- 0-10 cm -----				
COT (dag kg ⁻¹)	1,097	1,054	0,983	0,951
Estoque C (Mg ha ⁻¹)	15,137	14,549	13,185	13,600
----- 10-30 cm -----				
COT (dag kg ⁻¹)	0,980	1,031	0,978	1,097
Estoque C (Mg ha ⁻¹)	28,315	30,786	25,951	30,024

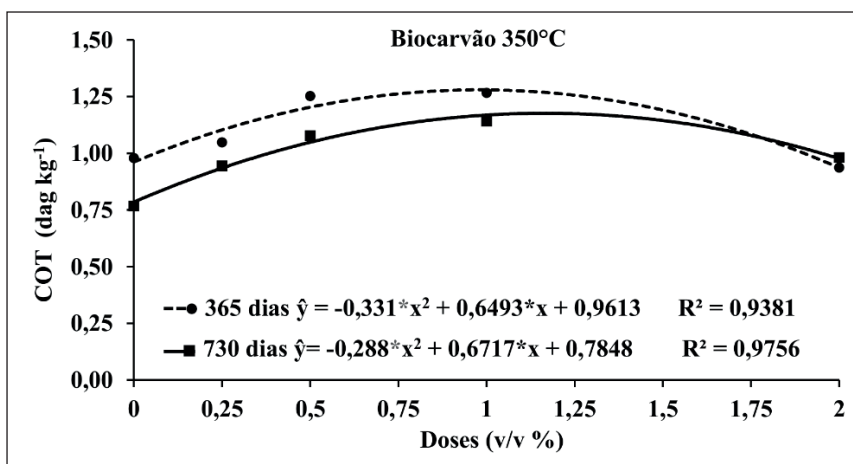
Tabela 7. Contrastes ortogonais obtidos e suas significâncias, para os teores de Carbono Orgânico Total (COT) e Estoque de Carbono nas camadas de 0-10 cm e 10-30 cm.

Variável	C1*	C2	C3	C4
	----- 0-10 cm -----			
COT (dag kg ⁻¹)	0,0430 ^{ns}	0,0316 ^{ns}	0,1140 ^{ns}	0,1026 ^{ns}
Estoque C (Mg ha ⁻¹)	0,5884 ^{ns}	-0,4155 ^{ns}	1,952 ^{ns}	0,9483 ^{ns}
----- 10-30 cm -----				
COT (dag kg ⁻¹)	-0,0507 ^{ns}	-0,1196 ^{ns}	0,0020 ^{ns}	-0,0668 ^{ns}
Estoque C (Mg ha ⁻¹)	-2,4708 ^{ns}	-4,0731 ^{ns}	2,3637 ^{ns}	0,7614 ^{ns}

* C1 = 350 °C vs 600 °C/365 dias; C2 = 350 °C vs 600 °C/730 dias; C3 = 350 °C/365 dias vs 350 °C /730 dias; C4 = 600 °C/365 dias vs 600 °C/730 dias; ns: Não significativo pelo teste F.

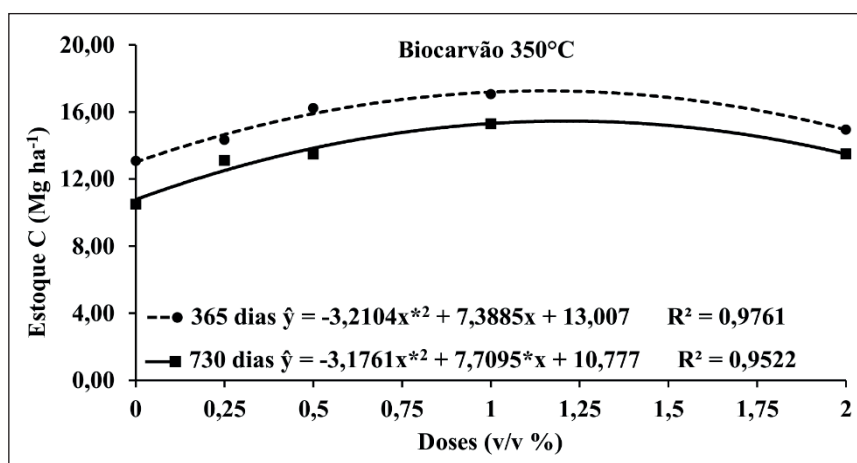
Apesar dos contrastes avaliados indicarem ausência de diferenças significativas, foram obtidos ajustes quadráticos de regressão para os teores e estoques de carbono nos tratamentos sob biocarvões de 350 °C na camada de 0-10 cm, em ambas épocas de avaliação (Figuras 5 e 6). Tal comportamento indica aumento dos teores e estoques de carbono orgânico com estimativa de valores máximos próximos à dose equivalente de 1% v/v.

Figura 5. Valores de carbono orgânico total (COT) na profundidade de 0 – 10 cm em função das doses de biocarvão obtido na temperatura de pirólise de 350°C, após 365 e 730 dias.



*: significativo a 5% pelo teste t.

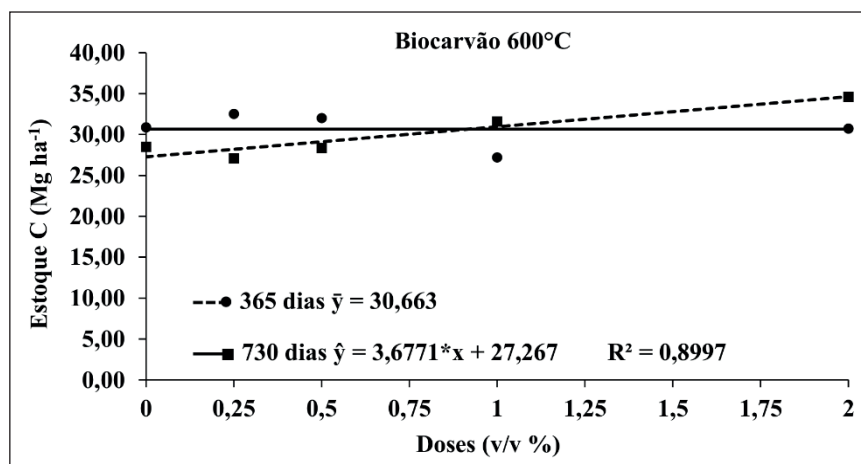
Figura 6. Valores de estoque de carbono na profundidade de 0 – 10 cm, em função das doses de biocarvão obtido na temperatura de pirólise de 350°C, após 365 e 730 dias.



*: significativo a 5% pelo teste t.

Outro ajuste de regressão foi obtido para os tratamentos sob biocarvões de 600 °C na camada de 10-30 cm na amostragem aos 730 dias após plantio, neste caso apresentando um comportamento linear (Figuras 7), indicando com isso aumentos proporcionais dos estoques de C segundo as doses do biocarvão aplicado.

Figura 7. Valores de estoque de carbono na profundidade de 10 – 30 cm em função das doses de biocarvão obtido na temperatura de pirólise de 600°C, após 365 e 730 dias.



*: significativo a 5% pelo teste t.

Densidade do Solo (DS) e Porosidades (PT, MACRO e MICRO)

A densidade do solo (DS), a porosidade total (PT), a macro (MACRO) e microporosidade (MICRO) são parte de um conjunto de atributos físicos que possuem o papel de indicadores da alteração de manejo do solo.

Os valores médios de DS dos tratamentos estudados variaram entre 1,325 e 1,506 kg dm⁻³ (Tabela 8) e não foram identificadas diferenças estatísticas nos contrastes avaliados em ambas camadas amostradas (Tabela 9). Também não foram identificadas diferenças significativas para microporosidade, cujos valores variaram 0,196 m³ m⁻³ a 0,217 m³ m⁻³.

A PT expressa o volume disponível a ser ocupados pela solução (água do solo) e/ou gases do solo (ar do solo). A MACRO, neste estudo, representa a proporção de poros em relação à PT responsável principalmente pela infiltração de água e areação do solo, e a MICRO representa a proporção de poros em relação à PT responsável pela retenção de água no solo. Neste estudo foram obtidos valores de PT correspondentes à aproximadamente 50 % do volume total do solo, assim como valores equilibrados de MACRO e MICRO correspondentes à aproximadamente 50 % do volume total da PT (Tabela 8).

Tabela 8. Densidade do Solo (DS), Porosidade total (PT), Macro (MACRO) e Microporosidade (MICRO) nas camadas de 0-10 cm e 10-30 cm, em função das temperaturas de pirólise em que foram produzidos os biocarvões (350 °C e 600 °C) e épocas de avaliação (365 dias e 730 dias)

Variável	365 dias		730 dias	
	350°C	600°C	350°C	600°C
----- 0-10 cm -----				
DS (kg dm ⁻³)	1,391	1,387	1,341	1,419
PT (m ³ m ⁻³)	0,488	0,509	0,515	0,489
MACRO (m ³ m ⁻³)	0,234	0,233	0,265	0,271
MICRO (m ³ m ⁻³)	0,254	0,276	0,245	0,237
----- 10-30 cm -----				
DS (kg dm ⁻³)	1,447	1,506	1,325	1,367
PT (m ³ m ⁻³)	0,451	0,428	0,492	0,482
MACRO (m ³ m ⁻³)	0,237	0,232	0,267	0,252
MICRO (m ³ m ⁻³)	0,214	0,196	0,223	0,233

Tabela 9. Contrastes ortogonais obtidos e suas significâncias, para os atributos Densidade do Solo (DS), Porosidade total (PT), Macro (MACRO) e Microporosidade (MICRO) nas camadas de 0-10 cm e 10-30 cm

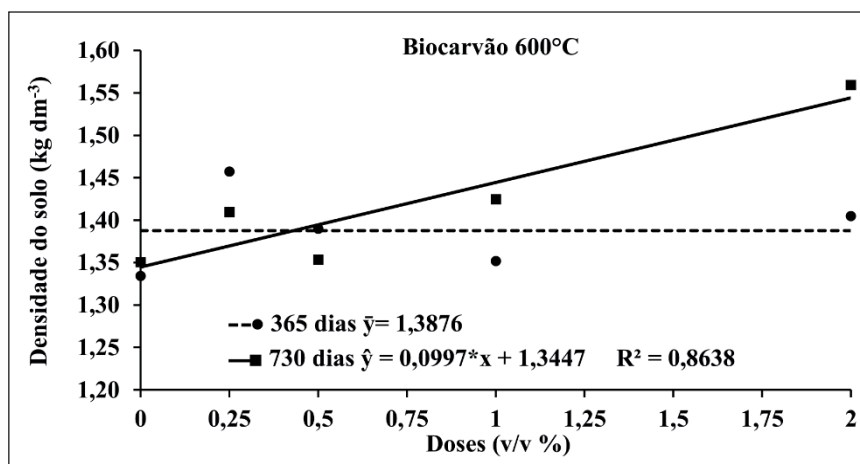
Variável	C1*	C2	C3	C4
	----- 0-10 cm -----			
DS (kg dm ⁻³)	0,0033 ^{ns}	-0,0774 ^{ns}	0,0490 ^{ns}	-0,0317 ^{ns}
PT (m ³ m ⁻³)	-0,0211 ^{ns}	0,0257 ^{ns}	-0,0272 ^{ns}	0,0196 ^{ns}
MACRO (m ³ m ⁻³)	-0,0213 ^{ns}	0,0082 ^{ns}	0,0092 ^{ns}	0,0388 ^{ns}
MICRO (m ³ m ⁻³)	0,0002 ^{ns}	-0,0054 ^{ns}	-0,0321***	-0,0378***
----- 10-30 cm -----				
DS (kg dm ⁻³)	-0,0211 ^{ns}	0,0257 ^{ns}	-0,0272 ^{ns}	0,0196 ^{ns}
PT (m ³ m ⁻³)	0,0232 ^{ns}	0,0100 ^{ns}	-0,0412**	-0,0544***
MACRO (m ³ m ⁻³)	0,0182 ^{ns}	-0,0098 ^{ns}	-0,0094 ^{ns}	-0,0375 ^{ns}
MICRO (m ³ m ⁻³)	0,0049 ^{ns}	0,0044 ^{ns}	-0,0249*	-0,0254*

* C1 = 350°C vs 600°C/365 dias; C2 = 350°C vs 600°C/730 dias; C3 = 350°C/365 dias vs 350°C/730 dias; C4 = 600°C/365 dias vs 600°C/730 dias; ***significativo a 0,1% pelo teste F; ** significativo a 1% pelo teste F; * significativo a 5% pelo teste F; e ns: Não significativo pelo teste F.

Diferenças significativas foram identificadas entre as épocas de avaliação no sentido de aumento do volume de MICRO em ambas camadas avaliadas e também de aumento da PT na camada de 10-30 cm. Diferenças significativas também foram identificadas para a porosidade total na camada de 10-30 cm com um aumento dos valores deste parâmetro entre as épocas de avaliação (Tabela 9).

Foi ainda obtido ajuste de regressão linear aos 730 dias na camada de 0-10 cm indicando aumentos proporcionais da DS em relação as doses de biocarvões aplicadas nos tratamentos sob biocarvões de 600 °C (Figura 8).

Figura 8. Valores de densidade do solo na profundidade de 0 – 10 cm, (DS) em função das doses de biocarvão obtido na temperatura de pirólise de 600 °C, após 365 e 730 dias de sua aplicação no solo.



*: significativo a 5% pelo teste t

Conteúdo de água no solo (Θ_{CC} , Θ_{PMP} e Θ_{AD})

O conteúdo de água na capacidade de campo (Θ_{CC}) expressa o conteúdo de água retido no solo por forças capilares, sob potencial mátrico de -10 kPa, cuja movimentação no sentido vertical é significativamente reduzida. O conteúdo de água no ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}), por sua vez expressa o teor de água retido no solo sob potencial mátrico equivalente a -1500 kPa, conteúdo esse considerado inacessível à plantas. Já a água disponível (Θ_{AD}) expressa o volume de água teoricamente disponível para a absorção por plantas que compreende o conteúdo de água entre o Θ_{CC} e Θ_{PMP} .

O Θ_{CC} apresentou valores entre 0,228 e 0,275 m³ m⁻³, valores estes correspondentes a cerca de 50% da porosidade total. O Θ_{PMP} , por sua vez, com valores variando entre 0,117 e 0,133 m³ m⁻³, e o Θ_{AD} com valores variando entre 0,101 e 0,152 m³ m⁻³ (Tabela 10).

Não foram identificadas diferenças significativas entre os tratamentos para as temperaturas de pirólise em que foram produzidos os biocarvões numa mesma época de avaliação (C1 e C2) para todos os conteúdos de água avaliados (Tabela 11). Contudo, foram identificados aumentos significativos do primeiro para o segundo ano de avaliação no Θ_{PMP} na camada de 0-10 cm na sob tratamentos com biocarvões de 600 °C, e redução do Θ_{CC} na camada de 10-30 cm na sob tratamentos com biocarvões de 350 °C.

Tabela 10. Valores médios dos atributos umidade na capacidade de campo (Θ_{cc} umidade no ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}) e água disponível (Θ_{AD}) nas camadas de 0-10 cm e 10-30 cm, em função das temperaturas de pirólise em que foram produzidos os biocarvões (350°C e 600°C) e épocas de avaliação (365 dias e 730 dias)

Variável	365 dias		730 dias	
	350°C	600°C	350°C	600°C
----- 0-10 cm -----				
$\Theta_{CC} (m^3 m^{-3})$	0,248	0,262	0,235	0,250
$\Theta_{PMP} (m^3 m^{-3})$	0,117	0,118	0,129	0,133
$\Theta_{AD} (m^3 m^{-3})$	0,130	0,144	0,105	0,117
----- 10-30 cm -----				
$\Theta_{CC} (m^3 m^{-3})$	0,275	0,279	0,228	0,248
$\Theta_{PMP} (m^3 m^{-3})$	0,133	0,127	0,126	0,129
$\Theta_{AD} (m^3 m^{-3})$	0,142	0,152	0,101	0,118

Tabela 11. Contrastes ortogonais obtidos e suas significâncias, para os atributos teor de água na capacidade de campo (Θ_{cc}), teor de água no ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}) e teores de água disponível (Θ_{AD}) nas camadas de 0-10 cm e 10-30 cm.

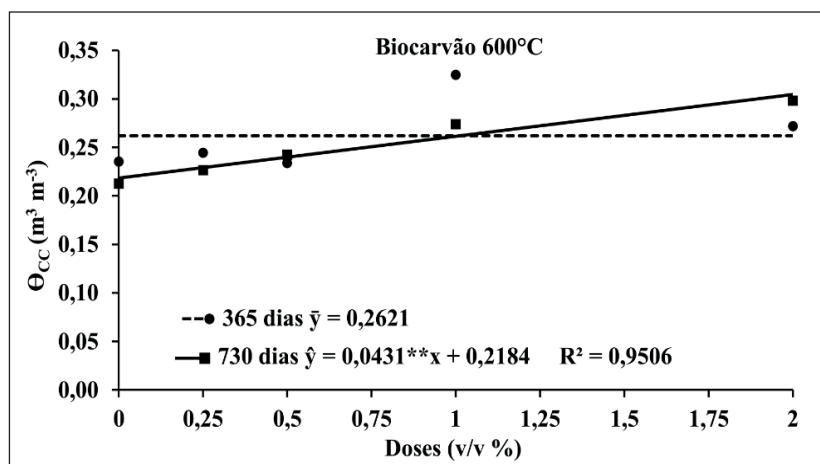
Variável	C1*	C2	C3	C4
	----- 0-10 cm -----			
$\Theta_{CC} (m^3 m^{-3})$	-0,0141 ^{ns}	-0,0154 ^{ns}	0,0127 ^{ns}	0,0114 ^{ns}
$\Theta_{PMP} (m^3 m^{-3})$	-0,0004 ^{ns}	-0,0038 ^{ns}	-0,0119 ^{ns}	-0,0153*
$\Theta_{AD} (m^3 m^{-3})$	-0,0136 ^{ns}	-0,0116 ^{ns}	0,0247*	0,0267*
----- 10-30 cm -----				
$\Theta_{CC} (m^3 m^{-3})$	-0,0034 ^{ns}	-0,0196 ^{ns}	0,0473*	0,0311 ^{ns}
$\Theta_{PMP} (m^3 m^{-3})$	0,0061 ^{ns}	-0,0028 ^{ns}	0,0066 ^{ns}	-0,0023 ^{ns}
$\Theta_{AD} (m^3 m^{-3})$	-0,0095 ^{ns}	-0,0167 ^{ns}	0,0406**	0,0334*

* C1 = 350°C vs 600°C/365 dias; C2 = 350°C vs 600°C/730 dias; C3 = 350°C/365 dias vs 350°C /730 dias; C4 = 600°C/365 dias vs 600°C/730 dias; ** significativo a 1% pelo teste F; * significativo a 5% pelo teste F; e ns: Não significativo pelo teste F.

Foram identificadas redução significativa do primeiro para o segundo ano de avaliação no Θ_{AD} em ambas camadas de solo avaliadas, tanto sob tratamentos com biocarvões de 350 °C quanto com biocarvões de 600 °C (Tabela 11).

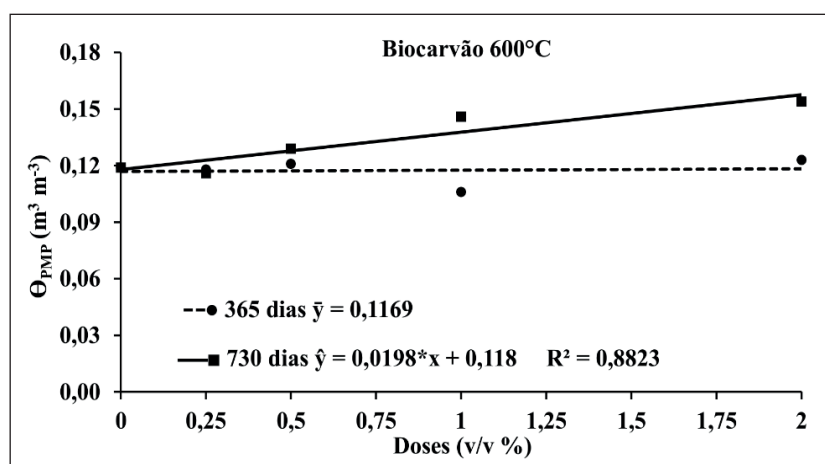
Ao se avaliarem os efeitos das doses dos biocarvões sobre os atributos relacionados ao conteúdo de água no solo, foram identificados efeitos significativos, obtendo-se ajustes de equações lineares, expressando uma relação direta entre de aumento do Θ_{cc} com o aumento das doses de biocarvões de 600 °C aos 730 dias na camada de 10-30 cm e também de aumento do Θ_{PMP} como aumento das doses de biocarvões de 600 °C aos 730 dias em ambas camadas de solo avaliadas.

Figura 9. Valores de umidade do solo na capacidade de campo na profundidade de 10 – 30 cm, (Θ_{cc}) em função das doses de biocarvão obtido na temperatura de pirólise de 600°C, após 365 e 730 dias de sua aplicação no solo.



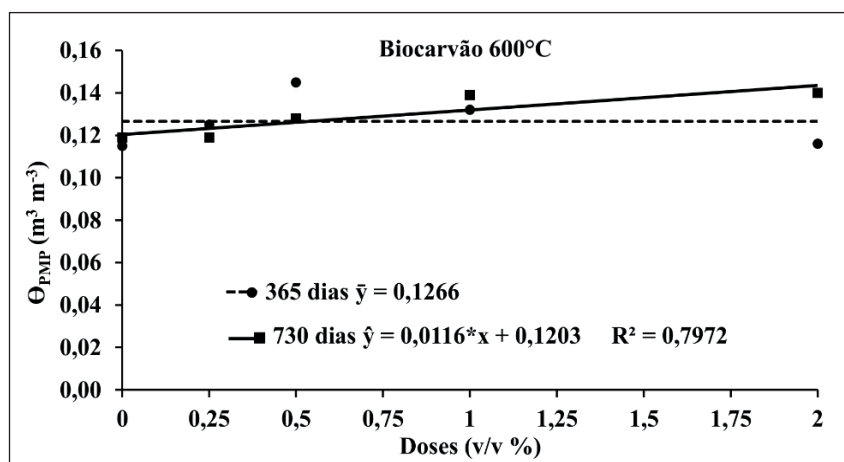
*: significativo a 5% pelo teste t.

Figura 10. Valores de umidade do solo o ponto de murcha permanente na profundidade de 0 – 10 cm, (Θ_{PMP}) em função das doses de biocarvão obtido na temperatura de pirólise de 600°C, após 365 e 730 dias de sua aplicação no solo.



*: significativo a 5% pelo teste t.

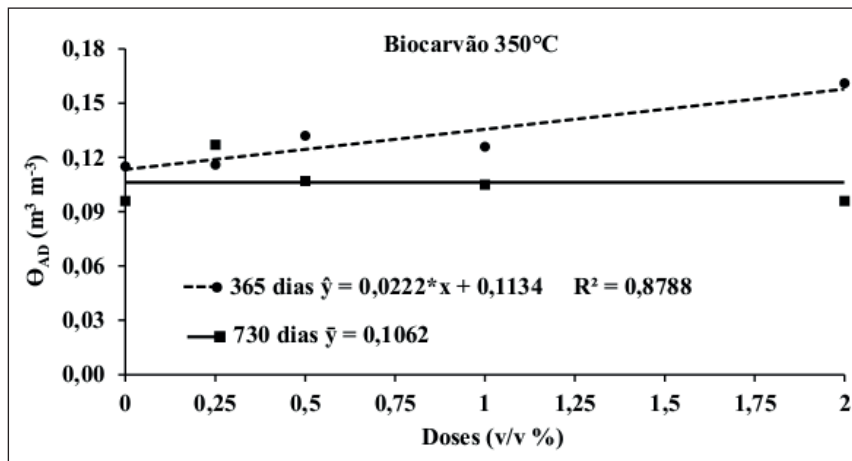
Figura 11. Valores de umidade do solo o ponto de murcha permanente na profundidade de 10 - 30 cm, (Θ_{PMP}) em função das doses de biocarvão obtido na temperatura de pirólise de 600°C, após 365 e 730 dias de sua aplicação no solo.



*: significativo a 5% pelo teste t.

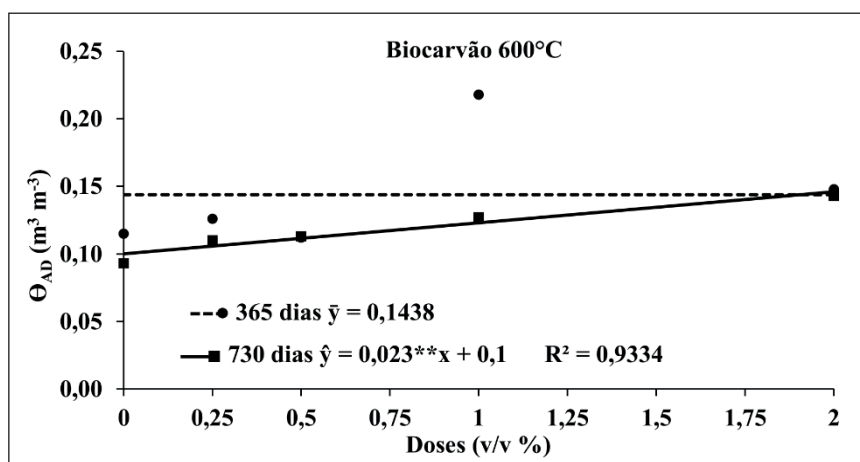
Por último, também foram identificados ajustes de regressão linear para o Θ_{AD} sob tratamentos com biocarvões de 350 °C aos 365 dias e sob tratamentos com biocarvões de 600 °C aos 730 dias, ambos na camada de 0-10 cm.

Figura 12. Conteúdo de água disponível (Θ_{AD}) na profundidade de 0 -10 cm, em função das doses de biocarvão obtido na temperatura de pirólise de 350°C, após 365 e 730 dias de sua aplicação no solo.



*: significativo a 5% pelo teste t.

Figura 13. Valores de água disponível na profundidade de 0 - 10 cm, (Θ_{AD}) em função das doses de biocarvão obtido na temperatura de pirólise de 600 °C, após 365 e 730 dias de sua aplicação no solo.



**: significativo a 1% pelo teste t.

■ DISCUSSÃO

Apesar da igualdade estatística nos atributos avaliados, entre os tratamentos sob os dois diferentes biocarvões, esperasse diferenças estatísticas sejam verificadas em avaliações futuras em função do efeito da estabilidade observada em biocarvões produzidos sob maior temperatura e de menor estabilidade em biocarvões produzidos sob menor temperatura (SINGH *et al.*, 2012).

De forma geral, os resultados aqui obtidos chamam a atenção principalmente no que se relaciona ao comportamento das variáveis, COT, Estoque de C, DS, PT, MICRO, Θ_{PMP} , Θ_{CC} e Θ_{AD} . O aumento de densidade do solo com o aumento das doses de biocarvões, como

observado para a camada de 0-10 cm, não é um efeito esperado, dado que biocarvões por um lado são materiais mais leves (MUKHERJEE; LAL, 2013) e por outro foram observados aumentos dos teores de carbono do solo nesta mesma camada avaliada indicando aumento do conteúdo de material orgânico, este por sua vez também é mais leve que o conteúdo mineral do solo, tendendo assim para a redução da massa média de sólidos do solo.

Deve-se ressaltar que valores acima de 1,55 kg/dm³ para densidade do solo podem ser um indicativo de limitações para o crescimento de raízes em solos de textura média (REICHERT *et al.*, 2003) tais como o solo do presente estudo.

O aumento da MICRO no segundo ano de avaliação pode ser consequência da aproximação das partículas do solo, proporcionado por um lado pelo crescimento de raízes e por outro devido ao solo da linha de plantio ter sido movimento para a abertura do sulco deixando assim, em um primeiro momento, as partículas mais soltas e em seguida estas partículas tendem a se aproximar com consequência de seu próprio peso.

Já alterações no sentido de aumento do Θ_{CC} (na camada de 10-30 cm), Θ_{PMP} (nas camadas de 0-10 cm e 10-30 cm) e Θ_{AD} (na camada de 0-10 cm), acompanhado do aumento das doses de biocarvões, pode ser consequência de efeitos de adsorção proporcionados pelo maior conteúdo orgânico identificado nos tratamentos. Para tal constatação é importante destacar que tais conteúdos de água foram avaliados a partir amostras desestruturadas, excluindo-se assim os efeitos relacionado à estrutura do solo.

Ao se considerarem os efeitos dos biocarvões isoladamente deve-se levar em consideração que por um lado a porosidade dos biocarvões adicionados contribui com novos compartimentos para a retenção de água e por outro as cargas elétricas adicionadas via biocarvões interagem com as moléculas polares da água permitindo a ligação destas últimas na matriz sólida dos biocarvões (LEHMANN e JOSEPH, 2015).

Avaliações ao longo do tempo devem ser encorajadas a fim de avaliar a presença ou ausência de efeitos diferenciado entre os biocarvões aplicados, dados que biocarvões obtidos a maiores temperaturas de pirólise tendem a ser menos reativos e mais recalcitrantes nas primeiras avaliações após aplicação no solo que biocarvões obtidos a menores temperaturas de pirólise. Os mesmos podem aumentar a quantidade de cargas negativas quando adicionados ao solo, por degradação das estruturas orgânicas com o decorrer do tempo (LEHMANN *et al.*, 2011).

■ CONCLUSÕES

Não são verificados efeitos de temperatura de biocarvão sobre os atributos avaliados. Contudo há efeito do tempo de avaliação e doses dos biocarvões de casca de eucalipto, com

destaque para os efeitos de dose promovendo o aumento do COT e estoques de carbono até a dose de 1%v/v e também o aumento do Θ_{CC} , Θ_{PMP} e Θ_{AD} .

Tais ocorrências são fundamentais para elevar os níveis de sustentabilidade para a produção silvícola do eucalipto, contribuindo com a segurança hídrica do processo de produção e sequestro de carbono no solo, combinando conversão energética com o aproveitamento da casca do eucalipto, um resíduo do próprio processo de produção.

■ AGRADECIMENTOS

À FAPES pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto via Edital PPE-AGRO FAPES/SEAG Nº 06/2015. Ao IFES e à UFES pelo apoio na implantação e manutenção do projeto.

■ REFERÊNCIAS

1. ABEL, S.; PETERS, A.; TRINKS, S.; SCHONSKY, H.; FACKLAM, M.; WESSOLEK, G. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil, **Geoderma**, 202-203:183-191, 2013.
2. ANDRADE, M. C. N.; MINHONI, M. T. A.; SANSÍGOLO, C. A.; ZIED, D. C. Análise química da madeira e casca de diferentes tipos de eucalipto antes e durante o cultivo de shiitake em toras. **Revista Árvore**, v. 35, p. 183-192, 2010.
3. AWAD, Y. M.; BLAGODATSKAYA, E.; OK, Y. S.; KUZYAKOV, Y. Effects of polyacrylamide, biopolymer and biochar on the decomposition of ^{14}C -labelled maize residues and on their stabilization in soil aggregates. **European Journal of Soil Science**, v. 64, p. 488-499, 2013.
4. BLANCO-CANQUI, H. Biochar and Soil Physical Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 4, p. 687-711, 2017.
5. BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.) **Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 221-278, 2011.
6. BRODOWSKI, S.; B. JOHN, H.; FLESSA, W.; AMELUNG, Aggregate occluded black carbon in soil. **European Journal of Soil Science**, v. 57, p. 539-546, 2006.
7. GLASER, B.; BALASHOV, E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. **Organic Geochemistry**, v. 31, p. 669-678, 2000.
8. GUL, S.; WHALEN, J. K.; THOMAS, B.W.; SACHDEVA, V.; DENG, H. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 206, p. 46-59, 2015.

9. HERATH, H. M. S. K.; CAMPS-ARBESTAIN, M.; HEDLEY, M. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. **Geoderma**, v. 209, p. 188-197, 2013.
10. INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Dados de precipitação. 2020. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/sobre>>. **Acesso em:** 05 de Ago. 2020.
11. JIEN, S. H.; WANG, C. S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. **Catena**, v. 110, p. 225-233, 2013.
12. LEHMANN, J.; RILLIG, M. C.; THIES, J.; MASIELLO, C. A.; HOCKADAY, W. C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota - A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 9, p. 1812-1836, 2011.
13. LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. 2 ed. London: Earthscan, 2015, 976 p.
14. LEHMANN, J.; RONDON, M. Biochar soil management on highly weathered soils in the humid tropics. In: UPHOFF, N.; BALL, A.S.; PALM, C.; FERNANDES, E.; PRETTY, J.; HERRREN, H.; SANCHEZ, P.; HUSSON, O.; SANGINGA, N.; LAING, M.; THIES, J. (Editors). **Biological Approaches to Sustainable Soil Systems**. Boca Raton, FL: CRC Press; p. 517-530. 2006.
15. MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: Métodos de análises**. 2º Edição. Viçosa, MG: UFV – Gefert, 2017.
16. MIRANDA, G. M.; SILVA, M. L.; MACHADO, C. C.; LEITE, H. G. Contribuição da casca na composição do custo de transporte da madeira de eucalipto. **Revista árvore**, v. 26, n. 2, p. 145-8, 2002.
17. MUKHERJEE, A.; LAL, R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. **Agronomy**, v. 3, p. 313-339, 2013.
18. PEREIRA, F. B.; SANTOS, R. C.; LOMBARDI, K. C.; DIAS, A. N.; MAIA, C. M. B. F. Soil oxidizable organic carbon fractions under organic management with industrial residue of roasted mate tea. In: **FUNCTIONS of natural organic matter in changing environment**. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 295-299, 2013.
19. PRONK, G. J.; HEISTER, K.; DING, G. C.; SMALLA, K.; KÖGEL-KNABNER, I. Development of biogeochemical interfaces in an artificial soil incubation experiment; aggregation and formation of organo-mineral associations. **Geoderma**, v. 189-190, p. 585-594, 2012.
20. R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Áustria, 2021.
21. REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, v.27, p. 29-48, 2003.
22. SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. de O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, p. 636, 2008.
23. SEIXAS, F.; BAUCH, S. C.; OLIVEIRA, J. E. D. Balanço energético e econômico de duas alternativas de descascamento de madeira de eucalipto. **Scientia Forestalis**, n.67, p.37-43, 2005.

24. SILVA, H. K. P.; BRAGATTO, J.; LABATE, C. A. Caracterização da Composição Química da Casca de Cinco Clones Comerciais de Eucalipto. In: **18º Simpósio Internacional de Iniciação Científica**, 2010, Piracicaba. 18º Simpósio Internacional de Iniciação Científica, 2010.
25. SINGH, B. P.; COWIE, A. L.; SMERNIK, R. J. Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. **Environmental Science & Technology**, v. 46, p.11770–11778, 2012.
26. YADAV, K. R.; SHARMA, R. K; KOTHARI, R. M. Bioconversion of eucalyptus bark waste into soil conditioner. **Bioresource Technology**, New York, v.81 p. 163-165, 2002.