

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

DANILO ANDRADE SANTOS

**BIOCARVÕES COMO CONDICIONADORES DO SOLO E SEUS
EFEITOS SOBRE O CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE *Eucalyptus*
*urograndis***

ALEGRE-ES
2020

DANILO ANDRADE SANTOS

**BIOCARVÕES COMO CONDICIONADORES DO SOLO E SEUS
EFEITOS SOBRE O CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE *Eucalyptus*
*urograndis***

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Renato Ribeiro Passos

ALEGRE-ES
2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

S237b Santos, Danilo Andrade, 1987-
Biocarvões como condicionadores do solo e seus efeitos sobre
o crescimento e nutrição de *Eucalyptus urograndis* / Danilo Andrade
Santos. - 2020.
117 f. : il.

Orientador: Renato Ribeiro Passos.

Coorientador: Otacílio José Passos Rangel.

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

1. Matéria orgânica carbonizada. 2. Nutrição mineral de
plantas. 3. Fertilidade do solo. 4. Eucalyptus urograndis. I.
Passos, Renato Ribeiro. II. Rangel, Otacílio José Passos. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências
Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 63

Aos meus pais, Crescêncio Sales de Andrade (in memoriam) e Maria Elza dos Santos;

À minha irmã; Patrícia Andrade Santo;

À minha namorada, Amanda Gomes Silva.

Dedico

"Bendito seja o Senhor, a minha Rocha, que treina as minhas mãos para a guerra e os meus dedos para a batalha" - Salmos 144

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas lições;

Ao meu Orientador, professor Dr. Renato Ribeiro Passos e ao meu Coorientador Prof. Dr. Otacílio José Passos Rangel pelo apoio nas atividades, contribuição com as ideias de trabalho, diálogos, sugestões e ensinamentos;

Aos professores Dr. Diego Lang Burak, Dra. Lorena Abdalla de Oliveira Prata Guimarães e Jéferson Luiz Ferrari, pelas valiosas sugestões;

Ao Prof. Dr. Felipe Vaz Andrade pelas contribuições nas ideias de desenvolvimento das pesquisas;

Ao Alex, amigo, e apoio técnico dos experimentos, fundamental para os andamentos dos trabalhos;

Aos amigos e parceiros de trabalho, Laís Lemos, Lázaro Lounge, Carla Cristina e Iohara Mendonça, que em muito contribuíram com o andamento das atividades e na produção da tese;

Aos amigos Aymbire Angeletti, Ronaldo, Yago, que também deram sua contribuição intelectual e física para o desenvolvimento dos experimentos;

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

Aos meus pais e irmãos, pela inspiração;

À minha namorada, Amanda Gomes, pela recente presença, companheirismo e carinho nestes últimos meses.

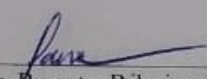
DANILO ANDRADE SANTOS

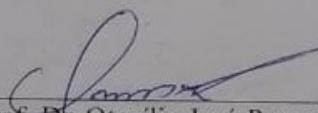
**BIOCARVÕES COMO CONDICIONADORES DO SOLO E SEUS
EFEITOS SOBRE O CRESCIMENTO E A NUTRIÇÃO DE *Eucalyptus*
*urograndis***

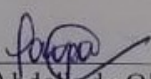
Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal.

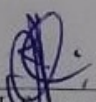
Aprovado:

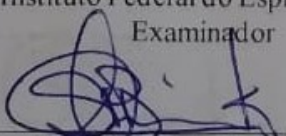
COMISSÃO EXAMINADORA


Prof. Dr. Renato Ribeiro Passos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador


Prof. Dr. Otacílio José Passos Rangel
Instituto Federal do Espírito Santo
Coorientador


Prof. Dr. Lorena Abdalla de Oliveira Prata Guimarães
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinadora


Prof. Dr. Jorgerson Luiz Ferrari
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador


Prof. Dr. Diego Lang Burak
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	13
INTRODUÇÃO GERAL	7
REFERÊNCIAS	22
CAPÍTULO I - POTÁSSIO E FÓSFORO EM AGREGADOS DO SOLO SOB INFLUÊNCIA DE BIOCÁRVÕES DE PALHA DE CAFÉ CONILON	26
RESUMO	26
1 INTRODUÇÃO	28
2 MATERIAL e MÉTODOS	32
2.1 Delineamento experimental.....	32
2.2 Produção e preparo dos biocárvoes.....	33
2.3 Solo utilizado.....	34
2.4 Montagem e condução do experimento	35
2.5 Determinações experimentais.....	36
2.6 Análises estatísticas.....	37
3 RESULTADOS e DISCUSSÃO	37
3.1 Potássio disponível em macro e microagregados	37
3.2 Fósforo disponível em macro e microagregados	44
4 CONCLUSÕES	52
5 REFERÊNCIAS	53
CAPÍTULO II - TEMPERATURAS DE PIRÓLISE, DOSES E GRANULOMETRIAS DE BIOCÁRVÕES DE PALHA DE CAFÉ: EFEITOS SOBRE A AGREGAÇÃO DO SOLO	57
RESUMO	57
1 INTRODUÇÃO	59
2 MATERIAL e MÉTODOS	61
2.1 Delineamento experimental.....	61

2.2	Produção e preparo dos biocarvões.....	61
2.3	Solo utilizado.....	63
2.4	Montagem e Condução do Experimento.....	63
2.5	Determinações experimentais.....	64
2.6	Análises estatísticas.....	66
3	RESULTADOS e DISCUSSÃO.....	66
3.1	Distribuição das classes de agregados por tamanho	66
3.2	Diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado obtidos por separações via seca e via úmida.....	72
3.3	Índice de estabilidade de agregados em água (IEA).....	84
4	CONCLUSÕES.....	88
5	REFERÊNCIAS.....	89
CAPÍTULO III - EFEITO DO BIOCÁRVÃO DE CASCA DE EUCALIPTO NO DESENVOLVIMENTO INICIAL E NA NUTRIÇÃO E DE <i>Eucalyptus urograndis</i> CULTIVADO EM UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO		92
RESUMO		92
1	INTRODUÇÃO.....	94
2	MATERIAL e MÉTODOS	96
2.1	Produção de caracterização dos biocarvões	96
2.2	Delineamento experimental.....	97
2.3	Determinações experimentais.....	99
2.4	Análises estatísticas.....	100
3	RESULTADOS e DISCUSSÃO.....	101
3.1	Atributos químicos do solo.....	101
3.2	Nutrição mineral e biometria de plantas	107
4	CONCLUSÕES.....	114
5	REFERÊNCIAS.....	115
CONCLUSÕES GERAIS		117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reator de Pirolise Lenta, Modelo SPPT V60.....	33
Figura 2 - Amostras antes da separação via seca em conjunto de peneiras	36
Figura 3 - Disponibilidade de K em macro e microagregados em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes nas classes de agregados indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,001$).....	39
Figura 4 – Teor de K no solo em função de doses de biocarvão de palha de café conilon de diferentes granulometrias, produzidos a temperatura de 350 °C em macro e microagregados do solo. *, ** e ***, significativo à 5, 1 e 0,1 %, respectivamente, pelo teste t	41
Figura 5 - Teor de K em macro e microagregados do solo em função de doses de biocarvão de palha de café conilon de diferentes granulometrias, produzidos a temperatura de 600 °C. *, ** e ***, significativo à 5, 1 e 0,1 %, respectivamente, pelo teste t	42
Figura 6 - Disponibilidade de P em macro e microagregados em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes nas classes de agregados indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,001$).....	46
Figura 7 – Teor de P em macro e microagregados do solo em função de doses de biocarvão de palha de café conilon com diferentes granulometrias, produzidos a temperatura de 350 °C. *, ** e ***, significativo à 5, 1 e 0,1 %, respectivamente, pelo teste t	48
Figura 8 - Teor de P no solo em função de doses de biocarvão de diferentes granulometrias, a uma temperatura de pirólise de 600 °C em macro e microagregados do solo. *, ** e ***, significativo à 5, 1 e 0,1 %, respectivamente, pelo teste t	49
Figura 9 - Distribuição das classes de agregados, obtidas por separação via seca, em função de diferentes doses e granulometrias de biocarvões produzidos a 350 °C.....	68
Figura 10 - Distribuição das classes de agregados, obtidas por separação via seca, em função de diferentes doses e granulometrias de biocarvões produzidos a 600 °C.....	69
Figura 11 - Distribuição das classes de agregados, obtidas por separação via úmida, em função de diferentes doses e granulometrias de biocarvões produzidos a 350 °C.....	70
Figura 12 - Distribuição das classes de agregados, obtidas por separação via úmida, em função de diferentes doses e granulometrias de biocarvões produzidos a 600 °C.....	71

- Figura 13** – Diâmetro Médio Geométrico (DMG) dos agregados nas diferentes separações, em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes entre classes de agregados indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,001$)..... 75
- Figura 14** – Diâmetro Médio Ponderado (DMP) dos agregados nas diferentes separações, em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes entre classes de agregados indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,001$)..... 75
- Figura 15** – Diâmetro Médio Geométrico (DMG) dos agregados obtidos em separação via seca, em função das doses de biocarvão em diferentes granulometrias. Valores sobrescritos entre parênteses correspondem à significância para os coeficientes, obtidas pelo teste t..... 77
- Figura 16** – Diâmetro Médio Ponderado (DMP) dos agregados obtidos em separação via seca em função das doses de biocarvão em diferentes granulometrias. Valores sobrescritos entre parênteses correspondem à significância para os coeficientes, obtidas pelo teste t 78
- Figura 17** – Diâmetro Médio Geométrico (DMG) dos agregados obtidos em separação via úmida, em função das doses de biocarvão em diferentes granulometrias. Valores sobrescritos entre parênteses correspondem à significância para os coeficientes, obtidas pelo teste t..... 79
- Figura 18** – Diâmetro Médio Ponderado (DMP) dos agregados obtidos em separação via úmida em função das doses de biocarvão em diferentes granulometrias. Valores sobrescritos entre parênteses correspondem à significância para os coeficientes, obtidas pelo teste t..... 80
- Figura 19** – Distribuição de agregados, obtidos via seca e úmida, para as doses de 10 e 40 t/ha de biocarvão, para as granulometrias de biocarvões menores que 0,25 mm e de 2,0 – 1,0 mm, ambos produzidos a 350 °C..... 83
- Figura 20** - Índices de estabilidade de agregados em água (IEA), em agregados do solo obtidos em separação via úmida, em função das doses de biocarvão em diferentes granulometrias. Valores sobrescritos entre parênteses correspondem a significância para os coeficientes, obtidas pelo teste t..... 87
- Figura 21** - Croqui da área representando a distribuição espacial dos tratamentos dispostos em cada bloco..... 98
- Figura 22** –Nitrogênio total no solo em função de doses e temperaturas de biocarvões. *, significativo à 5% pelo teste t..... 105

Figura 23 – Valores médios de estoque de N em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,05$)	107
Figura 24 – Valores médios dos teores de potássio foliares em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,05$)	111
Figura 25 – Valores médios dos teores de nitrogênio foliares em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,05$).....	111
Figura 26 – Zinco foliar em função de doses biocarvões. **, significativo à 1% pelo teste t.	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores elementares ¹ de C, H, N e O e relações C/N, H/C e O/C em biocarvões de palha de café conilon, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 e 600 °C)	33
Tabela 2 – Teores totais ¹ de macro e micronutrientes presentes nos biocarvões de palha de café, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 e 600 °C).....	34
Tabela 3 - Caracterização física ¹ do solo	34
Tabela 4 - Caracterização química ¹ do solo	35
Tabela 5 – Conteúdos de água base gravimétrica, em kg kg ⁻¹ , relacionados aos tratamentos sob potencial matricial equivalente a -20 kPa	35
Tabela 6 – Teores médios de K em macro e microagregados do solo para as diferentes combinações de temperatura de pirólise, granulometria e dose dos biocarvões de palha de café conilon	38
Tabela 7 - Teores médios de P em macro e microagregados do solo para as diferentes combinações de temperatura de pirólise, granulometria e doses dos biocarvões de palha de café conilon.....	45
Tabela 8 - Teores elementares C, H, N e O e relações C/N, H/C e O/C dos biocarvões de palha de café, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 °C e 600 °C)....	62
Tabela 9 – Teores totais de macro e micronutrientes ¹ presentes nos biocarvões de palha de café, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 e 600 °C).....	62
Tabela 10 - Caracterização física ¹ do solo	63
Tabela 11 - Caracterização química ¹ do solo	63
Tabela 12 – Conteúdo de água em base gravimétrica, em kg kg ⁻¹ , retida nos tratamentos sob potencial equivalente a -20 kPa.....	64
Tabela 13 - Valores médios dos índices DMG e DMP, obtidos a partir das separações em via seca, considerando as diferentes doses de biocarvões, os intervalos granulométricos de biocarvões utilizados e as temperaturas de pirólise	72
Tabela 14 - Valores médios dos índices DMG e DMP, obtidos a partir das separações em via úmida, considerando as diferentes doses de biocarvões, os intervalos granulométricos de biocarvões utilizados e as temperaturas de pirólise	73
Tabela 15 - Índices de estabilidade de agregados (IEA).....	84

Tabela 16 - Teores elementares 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).	97
Tabela 17 – Teores totais de macro e micronutrientes ¹ presentes nos biocarvões de casca de eucalipto, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 e 600 °C).....	97
Tabela 18 – Caracterização ¹ química do solo utilizado na montagem do experimento.	99
Tabela 19 – Caracterização ¹ física do solo utilizado na montagem do experimento.....	99
Tabela 20 - Valores médios dos atributos químicos do solo após a aplicação de biocarvão produzidos a 350 e 600 °C, na profundidade de 0-10 cm	101
Tabela 21 - Valores médios dos atributos químicos do solo após a aplicação de biocarvão produzidos a 350 e 600 °C, na profundidade de 10-30 cm	102
Tabela 22 - Valores médios dos índices de fertilidade do solo após a aplicação de biocarvão produzidos a 350 e 600 °C, na profundidade de 0-10 cm.....	102
Tabela 23 - Valores médios dos índices de fertilidade do solo após a aplicação de biocarvão produzidos a 350 e 600 °C, na profundidade de 10-30 cm.....	103
Tabela 24 - Valores médios dos estoques de C e N após a aplicação de biocarvões produzidos a 300 e 600 °C, na profundidade de 0-10 cm	103
Tabela 25 - Valores médios dos estoques de C e N após a aplicação de biocarvões produzidos a 300 e 600°C, na profundidade de 10-30 cm	104
Tabela 26 - Quadrado médio da análise de variância e significância do teste F para a interação entre os fatores na profundidade de 0-10 cm	104
Tabela 27 - Valores médios dos teores de nitrogênio total no solo a 0-10 cm.....	104
Tabela 28 - Quadrado médio da análise de variância dos fatores estudados e da significância do teste F para a interação entre os fatores, na profundidade de 0-10 cm	105
Tabela 29 - Valores médios dos estoques de nitrogênio no solo na camada de 0-10 cm	106
Tabela 30 - Quadrado médio da análise de variância dos fatores estudados e da significância do teste F para a interação entre os fatores, na profundidade de 10-30 cm	106
Tabela 31 - Quadrado médio da análise de variância dos fatores estudados e da significância do teste F para a interação entre os fatores, na profundidade de 10-30 cm	106

Tabela 32 - Teores de nutrientes foliares correspondentes às doses de biocarvões aos seus macro e micronutrientes para a temperatura de pirólise de 350 °C.....	107
Tabela 33 - Teores de nutrientes foliares correspondentes às doses de biocarvões e aos seus macro e micronutrientes a temperatura de pirólise de 600 °C.....	108
Tabela 34 - Dados biométricos de altura e diâmetro a altura do peito do eucalipto no período de 6 e 12 meses após o plantio, para as temperaturas de pirólise de 350 °C e 600 °C	109
Tabela 35 - Quadrado médio da análise de variância e significância do teste F para a interação entre os teores foliares dos macronutrientes	110
Tabela 36 - Quadrado médio da análise de variância e significância do teste F para a interação entre os teores foliares dos micronutrientes	110
Tabela 37 - Valores médios dos teores de Ca na planta em função das doses e temperaturas dos biocarvões.....	110
Tabela 38 - Quadrado médio da análise de variância dos fatores estudados e da significância do teste F para a interação entre dados biométricos de altura e diâmetro a altura do peito de 6 e 12 meses.....	113

RESUMO GERAL

O Estado do Espírito Santo possui, dentro de sua produção agrária, materiais que são gerados em grande volume e com potencial para serem utilizados para conversão energética e consequente produção de biocarvões para retornarem ao campo como condicionadores de solo. Nesta pesquisa são apresentados três estudos com o objetivo de entender como biocarvões afetam a estrutura do solo, a disponibilidade de nutrientes e a nutrição e desenvolvimento de plantas de eucalipto. No primeiro capítulo, objetivou-se avaliar a disponibilidade de P e K em macro e microagregados do solo, formados a partir da adição de doses de biocarvões de diferentes granulometrias, obtidos em duas temperaturas de pirólise em amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo. O experimento foi conduzido em laboratório, sob delineamento em blocos casualizados em ambiente controlado com temperatura de $\pm 25^{\circ}\text{C}$, durante um período de 119 dias. O ensaio experimental foi disposto em esquema fatorial $(2 \times 4 \times 4) + 1$, com três repetições e um tratamento adicional. Os fatores em estudo foram: biocarvões de palha de café produzidos a partir de duas temperaturas finais de pirólise, 350 e 600°C; quatro doses de biocarvões, correspondentes a 10, 20, 40 e 80 t ha⁻¹; quatro granulometrias de biocarvões (2,0-1,0 mm; 1,0-0,5 mm; 0,5-0,25 mm; 0,25-0 mm); e um tratamento adicional sem adição de biocarvões. No segundo capítulo, objetivou-se avaliar os efeitos na agregação e estabilidade de agregados promovidos pela adição de doses crescentes de biocarvão de diferentes granulometrias, produzidos a partir de palha de café conilon, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, após 119 dias de incubação, utilizando os agregados obtidos, após peneiramento via seca, no experimento do primeiro capítulo. Sendo assim, aos 119 dias de incubação foram avaliados os agregados em separações em via seca e em via úmida, e a partir dos dados alcançados em ambos os métodos de separação foram estudados os índices de agregação, diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), e também calculado o índice de estabilidade de agregados (IEA) para os macroagregados (>0,25 mm) obtidos por via seca e peneirados em via úmida. No último capítulo, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de doses de biocarvão de casca de eucalipto produzidos sob duas temperaturas de carbonização sobre os atributos químicos do solo, desenvolvimento inicial e nutrição de plantas de eucalipto. (*Eucalyptus urograndis*). Um ensaio de campo foi estabelecido com um esquema fatorial 2 x 5: duas temperaturas de pirólise (350 e 600 °C) cinco doses de biocarvão (0; 0,25; 0,5; 1 e 2%). Aos 365 dias, foram realizadas as seguintes análises químicas de solo: pH, Al, Ca, Mg,

Na, K, H+Al, carbono orgânico total, nitrogênio total e estoques de COT e NT, em duas profundidades: 0-10 e 10-30 cm. Aos 180 e 365 dias após o plantio, foram obtidos dados biométricos de altura e diâmetro do caule das plantas, e aos 365 dias foram coletadas amostragem de folhas para análises de nutrientes foliares. No primeiro capítulo, verificou-se que biocarvões de palha de café conilon, independente da temperatura final de pirólise, dose e granulometria aumentam a disponibilidade de P e K em macro e microagregados do solo, chegando à ordem de 5 vezes os valores de K considerados adequados para a maioria das culturas, com a dose mais baixa de biocarvão. Para o P, a disponibilidade aumentou entre 100% e 600%. A maior disponibilidade de P em macroagregados foi verificada para tratamentos sob biocarvão de 600 °C e a maior disponibilidade de P para microagregados foi alcançada para tratamentos sob biocarvão de 350 °C. Constatou-se que o K apresenta maior disponibilidade em ambos os agregados do solo, sob biocarvão de 600 °C. A ação conjunta de granulometria e/ou efeitos em agregação, promovida pelos biocarvões, tende a desenvolver teores mais elevados de K em macroagregados, independente da temperatura em que os biocarvões foram produzidos. Biocarvões de 600 °C e de maior granulometria proporcionam maiores teores de P disponível nos macroagregados, ao passo que biocarvões de menor granulometria, independente da temperatura de produção do biocarvão, promovem maior disponibilidade de fósforo nos microagregados. No segundo capítulo, verificou-se que a temperatura de pirólise de 600 °C promoveu maior agregação do solo (6 %), observado pelos maiores valores de DMG e DMP, em relação a 350 °C, nos agregados separados por via seca. Contudo, por via úmida, não foram observadas diferenças entre temperaturas de pirólise sobre a agregação. A agregação do solo tendeu a ser favorecida nos tratamentos que receberam biocarvões menores que 0,25 mm de 350 °C, e de 0,25-0,5 mm de 600 °C. A estabilidade dos macroagregados secos tende a ser perdida quando em presença de água pela dissolução de materiais, que agiam como cimentantes, que possivelmente tenham sido precipitados nos agregados, obtidos por peneiramento via seca. A perda em estabilidade de macroagregados na presença de água se dá no sentido do aumento da temperatura e granulometria de biocarvões. No terceiro capítulo, verificou-se que os efeitos sobre os atributos químicos do solo em cultivo de eucalipto foram identificados nos teores de nitrogênio total e estoque de nitrogênio, sem, contudo, apresentar um padrão de comportamento em função dos tratamentos estudados. O enriquecimento nutricional na cultura do eucalipto foi identificado para os teores N e K, em tratamentos sob biocarvões de 600 °C, e efeito de redução dos teores de Zn em função do aumento das

doses de biocarvões. Não foram observados efeitos significativos sobre a biometria das plantas de eucalipto. Os resultados obtidos, para a cultura e tratamentos testados, indicam a necessidade de um período experimental mais extenso para melhor avaliação dos efeitos sobre os atributos do solo e nutrição e desenvolvimento de plantas.

Palavras-chave: Matéria orgânica carbonizada. Nutrição mineral de plantas. Fertilidade do solo. *Eucalyptus urograndis*.

GENERAL ABSTRACT

The State of Espírito Santo – Brazil – has, within its agrarian production, materials that are generated in great volume and with the potential to be used for energy conversion and consequent production of biochars to return to the field as soil conditioners. In this research three studies are presented in order to understand how biochars affect the soil structure, the availability of nutrients and the nutrition and development of eucalyptus plants. In the first chapter, the objective was to evaluate the availability of P and K in macro and microaggregates of the soil, formed from the addition of doses of biochars of different granulometries, obtained in two pyrolysis temperatures in samples of a Oxisol. The experiment was conducted in a laboratory, under a randomized block design in a controlled environment with a temperature of $\pm 25^{\circ}\text{C}$, for a period of 119 days. The experimental test was arranged in a factorial scheme $(2 \times 4 \times 4) + 1$, with three replicates and an additional treatment. The factors under study were: coffee straw biochars produced from two final pyrolysis temperatures, 350 and 600°C; four doses of biochars, corresponding to 10, 20, 40 and 80 t ha⁻¹; four particle sizes of biochars (2,0-1,0 mm; 1,0-0,5 mm; 0,5-0,25 mm; 0,25-0 mm); and additional treatment without adding biochars. In the second chapter, the objective was to evaluate the effects on aggregation and stability of aggregates promoted by the addition of increasing doses of biochar of different granulometries, produced from Conilon coffee straw, in a Oxisol, after 119 days of incubation, using the aggregates obtained, after dry screening, in the experiment of the first chapter. Thus, at 119 days of incubation, the aggregates were evaluated in dry and wet separations, and from the data obtained in both separation methods, the aggregation indexes, geometric mean diameter (DMG) and average diameter were studied. weighted (DMP), and also calculated the aggregate stability index (IEA) for macroaggregates (> 0,25 mm) obtained by dry process and sieved in wet process. In the last chapter, the objective was to evaluate the effect of applying doses of eucalyptus bark biochar produced under two carbonization temperatures on the chemical attributes of the soil, initial development and nutrition of eucalyptus plants. (*Eucalyptus urograndis*). A field trial was established with a 2 x 5 factorial scheme: two pyrolysis temperatures (350 and 600 ° C) and five doses of biochar (0; 0,25; 0,5; 1 and 2% v/v). At 365 days, the following chemical soil analyzes were performed: pH, Al, Ca, Mg, Na, K, H + Al, total organic carbon, total nitrogen and COT and NT stocks, in two depths: 0-10 and 10-30 cm. At 180 and 365 days after planting, biometric data on height and stem diameter of the plants were obtained, and at 365 days leaf sampling was performed for leaf nutrient analysis. In the first chapter,

it was found that conilon coffee straw biochars, regardless of the final pyrolysis temperature, dose and granulometry increase the availability of P and K in macro and microaggregates of the soil, reaching the order of 5 times the K values considered suitable for most cultures, with the lowest dose of biochar. For P, availability increased between 100% and 600%. The highest availability of P in macroaggregates was found for treatments under biochar of 600 °C and the highest availability of P for microaggregates was achieved for treatments under biochar of 350 °C. It was found that K has a higher availability in both soil aggregates, under 600 °C biochar. The joint action of granulometry and / or effects in aggregation, promoted by biochars, tends to develop higher levels of K in macroaggregates, regardless of the temperature at which the biochars were produced. Biochars of 600 °C and of greater granulometry provide greater contents of P available in the macroaggregates, whereas biochars of smaller granulometry, regardless of the temperature of production of the biochar, promote greater availability of phosphorus in the microaggregates. In the second chapter, it was found that the pyrolysis temperature of 600 °C promoted greater soil aggregation (6%), observed by the higher values of DMG and DMP, in relation to 350 °C, in the aggregates separated by dry route. However, in the wet way, no differences were observed between pyrolysis temperatures on aggregation. Soil aggregation tended to be favored in treatments that received biochars smaller than 0,25 mm at 350 °C, and 0,25-0,5 mm at 600 °C. The stability of the dry macroaggregates tends to be lost when in the presence of water by the dissolution of materials, which acted as cement, which possibly had been precipitated in the aggregates, obtained by sieving through dry. The loss in stability of macroaggregates in the presence of water occurs in the sense of increasing the temperature and granulometry of biochars. In the third chapter, it was found that the effects on the chemical attributes of the soil in eucalyptus cultivation were identified in the levels of total nitrogen and nitrogen stock, without, however, showing a pattern of behavior depending on the treatments studied. Nutritional enrichment in the eucalyptus culture was identified for the levels N and K, in treatments under 600 °C biochars, and the effect of reducing the Zn levels due to the increase in the doses of biochars. There were no significant effects on the biometrics of eucalyptus plants. The results obtained, for the Eucalyptus and treatments tested, indicate the need for a more extensive experimental period to better assess the effects on soil attributes and plant nutrition and development.

Keywords: Carbonized organic matter. Mineral plant nutrition. Soil fertility. *Eucalyptus urograndis*.

INTRODUÇÃO GERAL

A pirólise, a gaseificação e a carbonização são processos caracterizados pela degradação da biomassa sob elevadas temperaturas e ausência ou deficiente fornecimento de oxigênio. Estes três processos têm, nos últimos anos, ganhado importância industrial, por ser uma interessante alternativa para a geração de produtos com maior valor energético agregado, caracterizados basicamente por um produto líquido, um sólido e um gasoso. O produto líquido, denominado por bio-óleo, é o de principal interesse para a indústria por apresentar características semelhantes ao petróleo; o sólido refere-se aos materiais carbonizados que sob processos térmicos apresentam um elevado potencial para uso como condicionador de solo; e o gás pode ser aproveitado para outros processos que envolvam sua queima e aproveitamento como energia térmica (LEHMANN e JOSEPH, 2015).

De modo particular, o produto sólido carbonizado tem chamado a atenção dos cientistas do solo como uma alternativa para melhorar as condições químicas, físicas e biológicas dos solos, e, conseqüentemente, o desenvolvimento das plantas (LEHMANN; GAUNT; RONDON, 2006). Esse produto é comumente denominado pelo termo biochar ou biocarvão e tem sido genericamente definido como o produto oriundo da biomassa carbonizada para uso no manejo ambiental (LEHMANN e JOSEPH, 2015).

As principais características que potencializam o uso de biocarvões como condicionador de solos são sua alta porosidade e superfície específica associada à presença de cargas eletroquímicas e à estrutura aromática das moléculas orgânicas carbonizadas. Tais características conduzem, quando aplicados aos solos, efeitos sobre a biota (LEHMANN et al., 2011), atributos físicos (MUKHERJEE; LAL, 2013) e químicos do solo (GUL et al., 2015).

Diversos têm sido os materiais utilizados para o preparo e estudo dos efeitos dos biocarvões sobre os atributos dos solos e o desenvolvimento de plantas, desde resíduos da agricultura e resíduos da atividade urbana ou doméstica até os finos de carvão, considerado material de pouco valor agregado, nas carvoarias.

Iniciativas de uso e avaliação da aplicação de biocarvões, misturados a solos e substratos, nos processos de produção de eucalipto têm sido apresentadas em estudos científicos (PETTER et al., 2012; WRÓBEL-TOBISZEWSKA, 2014). Contudo, pouca ênfase tem sido dada à exposição e discussão das diferentes características que estes materiais podem apresentar em função do material que lhe deu origem e da dinâmica do

processo de carbonização, além da complexa interação dos biocarvões com o ambiente, inclusive os efeitos sobre a planta.

No Estado do Espírito Santo, a palha de café e a casca de eucalipto apresentam potencial para uso como biocarvões pelo volume com que são gerados e pelas peculiaridades de descarte que cada um destes materiais sofre atualmente.

É importante destacar que o Brasil é considerado o maior produtor mundial de café e, de acordo com Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2018), a produção anual de café no Espírito Santo é de 12,8 milhões de sacas, com estimativas de resíduos de palha gerados na ordem de 1,5 milhões de toneladas por ano (PASSOS et al., 2016). Além disso, o beneficiamento dos grãos de café no Estado do Espírito Santo é sujeito a Portaria N° 23-R, de 2 de dezembro de 2003, que estabelece a proibição do uso de palha de café, e outro materiais listados, em fase de decomposição como fonte de material orgânico, sem a implementação do uso de técnicas que controlem a mosca-dos-estábulo (*Stomoxys calcitrans* L.). A utilização dos resíduos orgânicos mencionados na referida Portaria só poderá ser realizada após o completo processo de fermentação ou com o uso de técnicas de controle da mosca. Para casos como esses, a estabilização destes materiais na forma de biocarvão propõe a produção de um condicionador do solo, e a destinação correta e eficiente do resíduo da palha de café.

A casca de eucalipto é um resíduo gerado principalmente nos processos de colheita silvícola e/ou da fabricação de celulose que apresenta composição orgânica semelhante à própria madeira do eucalipto, segundo os teores de holocelulose e lignina, se diferenciando por um maior teor de extrativos totais (ANDRADE et al., 2011). Em função de sua composição, quando deixada sobre o solo, a casca de eucalipto possui um tempo de decomposição intermediário entre o tempo de decomposição das galhadas e folhas, que são comumente deixadas sob o solo em processos de colheita industrial (MARTINS et al., 2015).

O conteúdo e teor das substâncias do material que dará origem ao biocarvão fundamentará a dinâmica do processo de carbonização, bem como a característica final dos biocarvões gerados (LEHMANN e JOSEPH, 2015).

É importante salientar que a transformação de biomassa em carbono pirogênico (produtos da biomassa carbonizada) é uma ótima estratégia para o sequestro de carbono, dada a alta estabilidade das estruturas orgânicas presentes neste material. O carbono contido nos biocarvões é composto principalmente de estruturas aromáticas, sobretudo para aqueles sob maior conteúdo de lignina, as quais são caracterizadas por ligações sob

a forma de anéis de benzeno de átomos de carbono com o oxigênio (O) ou hidrogênio (H) (LEHMANN e JOSEPH, 2015), conferindo maior estabilidade física ao material.

Em função destas características, os biocarvões no solo podem contribuir para o sequestro de carbono devido à sua alta estabilidade estrutural, natureza recalcitrante e refratária (PETTER; MADARI, 2012). Neste contexto, a conversão de biomassa para biocarvões, seguida pela sua aplicação no solo, aumenta o tempo de residência do carbono quando comparado à aplicação direta da biomassa orgânica (MACHADO, 2005; SOHI et al., 2010; PETTER; MADARI, 2012).

Destaca-se ainda que o território do Estado do Espírito Santo é em sua maior parte formado por solos altamente intemperizados, ácidos, com reduzido teor de nutrientes e com problemas de adsorção de fósforo. Ressalta-se ainda que o manejo inadequado dos solos torna os mesmos suscetíveis à degradação física, e nesse contexto o núcleo de preocupação é a estrutura do solo. Um solo bem estruturado condiciona proteção física à fração orgânica do solo, sendo a estrutura do mesmo um dos principais atributos afetados por processos de degradação, com consequentes efeitos negativos sobre a ciclagem de nutrientes dos sistemas agrícolas, com destaque, em solos tropicais, sobre os compartimentos de fósforo (FONTE et al., 2014; NESPER et al., 2015).

Em se tratando de estrutura e agregação do solo, a fração orgânica do mesmo atua como componente importante na formação dos agregados, sendo um agente de destaque em diferentes modelos de agregação já propostos (EMERSON, 1959; EDWARDS; BREMNER, 1967; OADES, 1984; TISDALL e OADES, 1982 FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999).

Resultados de pesquisas sugerem que práticas de manejos que favoreçam a agregação podem potencializar a disponibilidade de fósforo para a nutrição de plantas (MCDOWELL et al., 2007; MARGENOT et al., 2017; GARLAND et al., 2017). Wang et al. (2000) e Wang; Yost; Linqvist, (2001) observaram que a agregação pode limitar a adsorção de fósforo à superfície dos minerais. Aparentemente a disponibilidade do fósforo para as culturas parece estar relacionada com o tamanho dos agregados, cujas concentrações das frações de labilidade do P são variáveis segundo a dimensão dos agregados estudados (LINQUIST et al., 1997; SHEKLABADI et al., 2014; WRIGHT, 2009; LI et al., 2016).

Apesar de estudos que envolvem a relação em agregação promovida por biocarvões e a disponibilidade de nutrientes em macro e microagregados serem escassos, alguns dos efeitos sobre a disponibilidade de nutrientes nos solos, independente dos

efeitos em agregação, são citados. Por exemplo, para o fósforo, os biocarvões melhoram a sua disponibilidade, segundo seu potencial em: (i) ser fonte de fósforo, já que os mesmos possuem compostos fosfatados de diferentes frações de labilidade (XU et al., 2016); (ii) aumentar o pH de solos ácidos (SCHNEIDER; HADERLEIN, 2016; DAI et al., 2017); (iii) agir como matriz para o crescimento de fungos micorrizos (HAMMER et al., 2014; SHEN et al., 2016); (iv) reduzir a adsorção de fósforo por óxidos (CUI et al., 2011), devido à competição de ânions orgânicos e inorgânicos, presentes em biocarvões, pelos sítios de adsorção de fosfatos (SCHNEIDER; HADERLEIN, 2016).

O íon potássio (K^+), por sua vez, mais facilmente disponível para a nutrição de plantas que os íons fosfatos, se relaciona com a agregação do solo por interferir diretamente sobre os processos e fenômenos de agregação e estabilidade de agregados do solo (REEVE et al., 1954; QUIRK; SCHOFIELD, 1955; GARDNER et al., 1959; MARTIN; RICHARDS, 1959; LEVY; TORRENTO, 1995; FARAHANI; EMAMI; KELLER, 2018; PHOCHAROEN et al., 2018; FARAHANI et al., 2018), sendo raros os trabalhos que relacionem a agregação do solo com a respectiva disponibilidade deste elemento para a nutrição de plantas.

Além disso, diversos são os materiais ricos carbonizados ricos em potássio que podem interferir diretamente nos processos de agregação em função da presença deste íon, quando biocarvões são adicionados ao solo (PRAKONGKEP; GILKES; WIRIYAKITNATEEKUL, 2015; TAN et al., 2017; TIAN et al., 2017).

Nesta pesquisa são apresentados três estudos desenvolvidos com o objetivo geral de entender como biocarvões afetam a estrutura do solo, a disponibilidade de nutrientes em função dos agregados formados e a nutrição e desenvolvimento de plantas de eucalipto.

No primeiro capítulo, objetivou-se avaliar a disponibilidade de P e K em macro e microagregados do solo formados a partir da adição de doses de biocarvões de diferentes granulometrias, obtidos em duas temperaturas de pirólise em amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo. No segundo capítulo, objetivou-se avaliar os efeitos na agregação do solo promovidos pela mesma adição de doses crescentes de biocarvão de diferentes granulometrias produzidos a partir de palha de café Conilon em um Latossolo Vermelho-Amarelo, após 119 dias de incubação, utilizando os materiais obtidos no experimento do primeiro capítulo. E, no terceiro e último capítulo, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de diferentes doses e tipos (temperaturas de produção) de biocarvão de casca de eucalipto, a fim de identificar a temperatura ideal de pirólise e a dose do biocarvão que

melhoram os atributos químicos do solo, nutrição de plantas e o crescimento inicial de plantas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*).

REFERÊNCIAS

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, 2011.

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DO AGRONEGÓCIO — CEDAGRO. Dimensionamento do Mercado Capixaba de Produtos Florestais Madeiráveis. Vitória, 2011. (**Relatório final**)

CUI, H.-J.; WANG, M.K.; FU, M.-L.; CI, E. Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, n. 7, p. 1135, 2011.

EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Microaggregates in Soils¹. **Journal of Soil Science**, v. 18, n. 1, p. 64–73, 1967.

EMERSON, W. W. The Structure of Soil Crumbs. **Journal of Soil Science**, v. 10, n. 2, p. 235–244, 1959.

FARAHANI, E., EMAMI, H., KELLER, T. Impact of monovalent cations on soil structure. Part I. Results of an Iranian soil. **International Agrophysics**, v. 32, n. 1, p. 57–67, 2018.

FARAHANI, E.; EMAMI, H.; KELLER, T. Impact of monovalent cations on soil structure. Part II. Results of two Swiss soils. **International Agrophysics**, v. 32, n. 1, p. 69–80, 2018.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURTI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 507–514, 1999.

FONTE, S.J., NESPER, M., HEGGLIN, D., VELÁSQUEZ, J.E., RAMIREZ, B., RAO, I.M., BERNASCONI, S.M., BÜNEMANN, E.K., FROSSARD, E., OBERSON, A.. Pasture degradation impacts soil phosphorus storage via changes to aggregate-associated soil organic matter in highly weathered tropical soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. 150–157, 2014.

GARDNER, W.R., MAYHUGH, M.S., GOERTZEN, J.O., BOWER, C.A. Effect of electrolyte concentration and exchangeable sodium percentage on diffusivity of water in soils. **Soil Science**, v. 88, n. 5, p. 270, nov. 1959.

GARLAND, G., BÜNEMANN, E.K., OBERSON, A., FROSSARD, E., SIX, J. Plant-mediated rhizospheric interactions in maize-pigeon pea intercropping enhance soil aggregation and organic phosphorus storage. **Plant and Soil**, v. 415, n. 1–2, p. 37–55, 2017.

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.

LEHMANN, J., JOSEPH, S. (Eds.), **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**, second ed. Routledge, New York, pp. 1–15. Taylor & Francis Group.

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.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, p. 403-427, 2006.

LEVY, G. J.; TORRENTO, J. R. Clay dispersion and macroaggregate stability as affected by exchangeable potassium and sodium. **Soil Science**, v. 160, n. 5, p. 352, nov. 1995.

LI, B., GE, T., XIAO, H., ZHU, Z., LI, Y., SHIBISTOVA, O., LIU, S., WU, J., INUBUSHI, K., GUGGENBERGER, G. Phosphorus content as a function of soil aggregate size and paddy cultivation in highly weathered soils. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 8, p. 7494–7503, 2016.

LINQUIST, B.A., SINGLETON, P.W., YOST, R.S., CASSMAN, K.G. Aggregate size effects on the sorption and release of phosphorus in an ultisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 160–166, 1997

MACHADO, P. L. O de A. Carbono fazed e a solo de mitigação da Mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, p. 329-334, 2005.

MARGENOT, A.J., PAUL, B.K., SOMMER, R.R., PULLEMAN, M.M., PARIKH, S.J., JACKSON, L.E., FONTE, S.J. Can conservation agriculture improve phosphorus (P) availability in weathered soils? Effects of tillage and residue management on soil P status after 9 years in a Kenyan Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 157–166, 2017.

MARTIN, J. P.; RICHARDS, S. J. Influence of Exchangeable Hydrogen and Calcium, and of Sodium, Potassium and Ammonium at Different Hydrogen Levels on Certain Physical Properties of Soils 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 5, p. 335–338, 10/01 1959.

MARTINS, N. P.; PRADO, P. K. B.; PEREIRA, D. M.; PIMENTEL, S. M.; BLEICH, M. E. Decomposição de folhas, galhos e cascas de Eucalyptus urograndis na borda sul da Amazônia. In: III Seminário de biodiversidade e agroecossistemas amazônicos - Conservação de solos na Amazônia Meridional, 2015, Alta Floresta. **Resumos...** Cáceres: Cáceres, 2015. v. 2, n. 1, 5 p.

MCDOWELL, R.W., SCOTT, J.T., STEWART, I., CONDRON, L.M. Influence of aggregate size on phosphorus changes in a soil cultivated intermittently: analysis by ³¹P nuclear magnetic resonance. **Biology and Fertility of Soils**, v. 43, n. 4, p. 409–415, 2007.

NESPER, M., BÜNEMANN, E.K., FONTE, S.J., RAO, I.M., VELÁSQUEZ, J.E., RAMIREZ, B., HEGGLIN, D., FROSSARD, E., OBERSON, A. Pasture degradation decreases organic P content of tropical soils due to soil structural decline. **Geoderma**, Special issue on developments in soil organic phosphorus cycling in natural and agricultural ecosystems. v. 257–258, p. 123–133, 2015.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, v. 76, n. 1–3, p. 319–337, 1984.

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.

PETTER, F. A., JUNIOR, B. H. M., ANDRADE, F. R., SCHOSSLER, T. R., GONÇALVES, L. G. Biochar como condicionador de substrato para a produção de mudas de eucalipto. **Revista Caatinga**, v. 25, p. 44-51, 2012.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: Agronomic and Environmental Potential in Braziliansavannahsoils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 761–768, 2012.

PHOCHAROEN, Y., ARAMRAK, S., CHITTAMART, N., WISAWAPIPAT, W. Potassium influence on soil aggregate stability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 17, p. 2162–2174, 2018.

PRAKONGKEP, N.; GILKES, R. J.; WIRIYAKITNATEEKUL, W. Forms and solubility of plant nutrient elements in tropical plant waste biochars. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 178, n. 5, p. 732–740, 2015.

QUIRK, J. P.; SCHOFIELD, R. K. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. **Journal of Soil Science**, v. 6, n. 2, p. 163–178, 1955.

REEVE, R.C., BOWER, C.A., BROOKS, R.H., GSCHWEND, F.B. A Comparison of the Effects of Exchangeable Sodium and Potassium upon the Physical Condition of Soils 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 18, n. 2, p. 130–132, 1954.

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

SHEKLABADI, M., MAHMOUDZADEH, H., MAHBOUBI, A.A., GHARABAGHI, B., AHRENS, B. Land use effects on phosphorus sequestration in soil aggregates in western Iran. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, n. 10, p. 6493–6503, 2014.

SHEN, Q., HEDLEY, M., CAMPS ARBESTAIN, M., KIRSCHBAUM, M.U.F. Can biochar increase the bioavailability of phosphorus? **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 16, n. 2, p. 268–286, 2016.

SOHI, S., KRULL, E., LÓPEZ-CAPEL, E., BOL, R. A review of biochar and its use and function in soil. In: **Advances in Agronomy**, San Diego: Publisher Elsevier Academic, p. 47-82, 2010.

TAN, Z., LIU, L., ZHANG, L., HUANG, Q. Mechanistic study of the influence of pyrolysis conditions on potassium speciation in biochar “preparation-application” process. **The Science of the Total Environment**, v. 599–600, p. 207–216, 2017.

TIAN, S., TAN, Z., KASIULIENĖ, A., AI, P. Transformation mechanism of nutrient elements in the process of biochar preparation for returning biochar to soil. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 4, p. 477–486, 2017.

TISDALL, J. M., OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141–163, 1982.

WANG, X., JACKMAN, J.M., YOST, R.S., LINQUIST, B.A. Predicting Soil Phosphorus Buffer Coefficients Using Potential Sorption Site Density and Soil Aggregation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 1, p. 240–246, 2000.

WANG, X.; YOST, R. S.; LINQUIST, B. A. Soil aggregate size affects phosphorus desorption from highly weathered soils and plant growth. **Soil Science Society of America journal**, v. 65, n. 1, p. 139–146, 2001.

WRIGHT, A. L. Phosphorus sequestration in soil aggregates after long-term tillage and cropping. **Soil and Tillage Research**, Contains papers from HighLand 2006: Land Degradation and Soil and Water Conservation in Tropical Highlands, Mekelle, Ethiopia, 21-25 September 2006. v. 103, n. 2, p. 406–411, 2009.

WRÓBEL-TOBISZEWSKA, A. Biochar as a soil amendment and productivity stimulus for Eucalyptus nitens plantations. 2014. 175 p. (PhD thesis) - University of Tasmania, 2014.

XU, G., ZHANG, Y., SHAO, H., SUN, J. Pyrolysis temperature affects phosphorus transformation in biochar: Chemical fractionation and ³¹P NMR analysis. **Science of The Total Environment**, v. 569–570, p. 65–72, 2016.

CAPÍTULO I

POTÁSSIO E FÓSFORO EM AGREGADOS DO SOLO SOB INFLUÊNCIA DE BIOCARVÕES DE PALHA DE CAFÉ CONILON

RESUMO

A degradação da estrutura do solo é um dos principais processos de redução do potencial produtivo de áreas agrícolas, tendo como resultante de suas alterações o efeito cascata sobre os demais atributos do solo, inclusive efeitos negativos sobre a agregação, estabilidade de agregados e consequentes perdas de importantes compartimentos de macronutrientes. Biocarvões possuem potencial em afetar positivamente tanto a agregação e estabilidade de agregados do solo quanto ainda a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Diante disso, o presente trabalho objetivou avaliar a disponibilidade de P e K em macro e microagregados do solo formados a partir da adição de doses de biocarvões de diferentes granulometrias, obtidos em duas temperaturas de pirólise em amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo. O experimento foi conduzido em laboratório, sob delineamento em blocos casualizados em ambiente controlado com temperatura de ± 25 °C durante um período de 119 dias. O ensaio experimental foi disposto em esquema fatorial $(2 \times 4 \times 4) + 1$, com três repetições. Os fatores em estudo foram: biocarvões de palha de café produzidos a partir de duas temperaturas finais de pirólise, 350 e 600 °C; quatro doses de biocarvões, correspondente a 10, 20, 40 e 80 t ha⁻¹; quatro granulometrias de biocarvões: 2,0-1,0 mm; 1,0-0,5 mm; 0,5-0,25 mm; e 0,25-0 mm; e um tratamento adicional sem adição de biocarvões. Os resultados experimentais mostraram que à medida que se aumentou a dose de biocarvão, ocorreu um aumento da disponibilidade tanto para P quanto para K, independente da temperatura e granulometria dos biocarvões. Numericamente, o teor de K disponível nos tratamentos sob biocarvões de 600 °C tende a ser maior que nos tratamentos sob biocarvões de 350 °C. Dentre as classes de agregados, os macroagregados apresentam maiores teores de K que os microagregados. Biocarvões de maior granulometria contribuem para maior disponibilidade de K. Os tratamentos que receberam os biocarvões de menor granulometria (<0,25 mm) apresentaram tendência à maior disponibilidade de P comparados a outras granulometrias, independente da temperatura de pirólise, para ambos os tipos de agregados. Contudo, há uma tendência, nas maiores granulometrias, dos

tratamentos que receberam biocarvões produzidos a 600 °C apresentarem uma maior disponibilidade de P em macroagregados. Independente da temperatura final de pirólise, dose e granulometria, a aplicação de biocarvões de palha de café promove maior disponibilidade de P e K em macro e microagregados do solo. Os biocarvões de maior granulometria, obtidos na temperatura de pirólise de 600 °C, promovem maiores teores de P disponível em macroagregados, ao passo que biocarvões de menor granulometria, independente da temperatura de produção do biocarvão, promovem maior disponibilidade de fósforo nos microagregados. Os resultados aqui obtidos indicam que processos de preparo de biocarvões que envolvam a seleção de frações granulométricas podem afetar o papel fonte de nutrientes destes materiais pela presença preferencial de determinados tipos e quantidade de compostos orgânicos e inorgânicos conduzindo a respostas diferenciadas sobre disponibilidade de nutrientes e nutrição de plantas.

Palavras-chave: Estrutura do solo. Materiais orgânicos carbonizados. Fertilidade do solo.

ABSTRACT

Soil structure degradation is one of the main processes of reducing the productive potential of agricultural areas, resulting in its changes the cascade effect on other soil attributes, including negative effects on aggregation, aggregate stability and consequent losses of important macronutrient compartments. Biocarbons have the potential to positively affect both aggregation and stability of soil aggregates as well as the availability of nutrients for plants. Therefore, the present study aimed to evaluate the availability of P and K in macro and microaggregates of the soil formed from the addition of doses of biochars of different granulometries, obtained in two pyrolysis temperatures in samples of a Red-Yellow Latosol. The experiment was conducted in the laboratory, under a randomized block design in a controlled environment with a temperature of ± 25 °C for a period of 119 days. The experimental test was arranged in a factorial scheme (2 x 4 x 4) + 1, with three replications. The factors under study were: coffee straw biocarbons produced from two pyrolysis final temperatures, 350 and 600 °C; four doses of biocarbons, corresponding to 10, 20, 40 and 80 t ha⁻¹; four particle sizes of biocarbons: 2.0-1.0 mm; 1.0-0.5 mm; 0.5-0.25 mm; and 0.25-0 mm; and additional treatment without adding biocarbons. The experimental results showed that as the dose of biochar increased, there was an increase in availability for both P and K, regardless of the temperature and particle size of the biochars. Numerically, the K content available in treatments under 600 °C biocarbons tends to be higher than in treatments under 350 °C biocarbons. Among aggregate classes, macroaggregates have higher K contents than microaggregates. Biocarbons of greater particle size contribute to greater availability of K. The treatments that received the biocarbons of smaller particle size (<0.25 mm) showed a tendency to greater availability of P compared to other particle sizes, regardless of pyrolysis temperature, for both types of aggregates. . However, there is a tendency, in the largest granulometries, for treatments that received biochars produced at 600 °C to present a greater availability of P in macroaggregates. Regardless of the final pyrolysis temperature, dose and granulometry, the application of coffee straw biocarbons promotes greater availability of P and K in macro and microaggregates of the soil. The biochars of greater granulometry, obtained at the pyrolysis temperature of 600 °C, promote higher levels of P available in macroaggregates, while biocharges of smaller granulometry, regardless of the temperature of production of the biochar, promote greater availability of phosphorus in the microaggregates. The results obtained here indicate that biocarbon

preparation processes that involve the selection of granulometric fractions can affect the nutrient source role of these materials by the preferential presence of certain types and quantity of organic and inorganic compounds leading to differentiated responses on nutrient availability and nutrition of plants.

Keywords: Soil structure. Carbonized organic materials. Soil fertility.

1 INTRODUÇÃO

Os efeitos negativos sobre a agregação e estabilidade de agregados do solo (pouca estabilidade, quebra de agregados) conduzem a perdas de importantes compartimentos de macronutrientes, com destaque para N, P e K. Enquanto os estudos sobre a dinâmica de N em agregados do solo têm tido um longo avanço e importantes informações têm sido reunidas, o efeito da agregação do solo sobre a dinâmica do fósforo e potássio tem sido objeto de poucos estudos.

A respeito da relação entre a estrutura do solo e a dinâmica do P, a literatura tem indicado que manejos que beneficiem a agregação podem também favorecer concomitantemente a conservação e disponibilidade deste nutriente (MCDOWELL et al., 2007; FONTE et al., 2014; NESPER et al., 2015; GARLAND et al., 2017; MARGENOT et al., 2017), de tal forma que aparentemente a disponibilidade do P para a nutrição de plantas parece estar relacionada com o tamanho dos agregados ainda que os resultados em grau de disponibilidade e teor das diferentes frações do P do solo em função do tamanho dos agregados sejam variáveis (LINQUIST et al., 1997; LINQUIST, 2001; WRIGHT, 2009; LI et al., 2016; SHEKLABADI et al., 2014; WANG; YOST, LINQUIST, 2001).

O potássio (K^+) íon mais facilmente disponível para a nutrição de plantas, se relaciona com a agregação do solo por interferir diretamente sobre os processos e fenômenos de agregação e estabilidade de agregados do solo, seja por efeitos de dispersão, afastamento das argilas, e redução da estabilidade de macroagregados (QUIRK; SCHOFIELD, 1955; LEVY e TORRENTO, 1995; FARAHANI et al., 2018;), ou por aumentar a floculação de partículas, estabilidade e agregação no solo (REEVE et al., 1954; MARTIN; RICHARDS, 1959; GARDNER et al., 1959; FARAHANI; EMAMI; KELLER, 2018; PHOCHAROEN et al., 2018), sendo raros os trabalhos que relacionem a agregação do solo com a respectiva disponibilidade deste elemento para a nutrição de plantas.

Independente do nutriente, melhorias em agregação são favoráveis à conservação dos compartimentos de nutrientes no solo (JIEN e WANG, 2013), principalmente para aqueles mais limitantes à produção vegetal, como é o caso do P (FONTE et al., 2014; NESPER et al., 2015, GARLAND et al., 2017).

Os biocarvões, quando aplicados ao solo, possuem potencial em afetar positivamente tanto a agregação e estabilidade de agregados do solo quanto a

disponibilidade de fósforo, potássio e outros nutrientes para as plantas. As melhorias em agregação e estabilidade de agregados do solo pela presença de biocarvões são variáveis e dependerão principalmente do grau de presença de cargas na superfície dos biocarvões, da porosidade e da área superficial específica, e do conteúdo mineral e orgânico destes materiais (MUKHERJEE; LAL, 2013, BLANCO-CANQUI, 2017). Além disso, apesar do tamanho e formato das partículas de biocarvões serem um fator potencialmente capaz de afetar os atributos relacionados com a estrutura do solo, (ESMAEELNEJAD et al., 2016, 2017; LIM; SPOKAS, 2018; LIU et al., 2017; TRIFUNOVIC et al., 2018), os efeitos sobre a agregação do solo têm sido raramente explorados, tomando o tamanho das partículas como um fator experimental (ESMAEELNEJAD et al., 2016).

Apesar de estudos que envolvam a relação em agregação promovida por biocarvões e a disponibilidade de nutrientes em macro e microagregados serem escassos, alguns dos efeitos sobre a disponibilidade de nutriente no solo, independente dos efeitos em agregação, são citados: melhoria da disponibilidade de P dado seu potencial em ser fonte de P, já que os mesmos possuem compostos fosfatados de diferentes frações de labilidade (XU et al., 2016); aumento do pH de solos ácidos (SCHNEIDER; HADERLEIN, 2016; DAI et al., 2017); matriz para o crescimento de fungos micorrizos (HAMMER et al., 2014, SHEN et al., 2016); e, a redução da adsorção de fósforo por óxidos de ferro (CUI et al., 2011), devido à competição de ânions orgânicos e inorgânicos, presentes em biocarvões, pelos sítios de adsorção de fosfatos (SCHNEIDER; HADERLEIN, 2016).

No caso específico do K, a maior disponibilidade deste nutriente pela adição de biocarvões, está melhor relacionada com o grau de solubilidade das substâncias potássicas presentes nos mesmos (PRAKONGKEP; GILKES; WIRIYAKITNATEEKUL, 2015; TAN et al., 2017; TIAN et al., 2017) e com a redução das perdas por lixiviação deste elemento pelo aumento de cargas no solo que servem de sítio de ligação para o mesmo (LI et al., 2014).

Diversas são as matérias-primas potenciais para a produção de biocarvão. No Estado do Espírito Santo, tem-se por exemplo a palha de café. O Estado é considerado o maior produtor de café conilon e o segundo maior produtor de café arábica do Brasil. De acordo com a CONAB (2018), a produção de café no Espírito Santo chegou a 12,8 milhões de sacas, com 8,3 milhões para café conilon e 4,5 milhões para o café arábica. No processo de produção, estima-se que sejam geradas, após o beneficiamento, cerca de 1,5 milhões de toneladas de resíduos de palha por ano (PASSOS et al., 2016).

Sabe-se ainda que no Espírito Santo, por meio da Portaria N° 23-R, de 2 de dezembro de 2003, fica proibido 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 a implementação do uso de técnicas que controlem a mosca-dos-estábulo (*Stomoxys calcitrans* L.). A utilização dos resíduos orgânicos mencionados na Portaria só poderá ser realizada após o completo processo de fermentação ou com o uso de técnicas de controle da mosca. Sendo assim, a estabilização destes materiais na forma de biocarvão propõe a produção de um condicionador do solo, e a destinação correta e eficiente do resíduo da palha de café.

A temperatura de pirólise tem influência na CTC dos biocarvões, em temperaturas mais baixas ($\leq 500^{\circ}\text{C}$) caracterizam-se em valores mais altos de CTC (MELO et al., 2013). A elevação da temperatura de pirólise não só aumenta o teor de C elementar e a porção de C recalcitrante resistente à oxidação, mas também o teor de cinzas (TAG et al., 2016). Esse aumento no teor de cinzas influencia o aumento do pH do biocarvão (CELY et al., 2015).

Diante do exposto, o presente trabalho objetivou avaliar a disponibilidade de P e K em macro e microagregados do solo formados a partir da adição e incubação de doses crescentes de biocarvões, produzidos a partir de palha de café conilon em duas temperaturas de pirólise e diferentes granulometrias.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido no Laboratório de Solos do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, Campus de Alegre, sob delineamento experimental em blocos casualizados, em ambiente controlado com temperatura de $\pm 25^{\circ}\text{C}$, durante um período de 119 dias. Para tanto, o ensaio experimental foi disposto em esquema fatorial ($2 \times 4 \times 4$) +1, com três repetições. Os fatores em estudo foram: biocarvões de palha de café produzidos em duas temperaturas finais de pirólise, 350 e 600°C; quatro doses dos biocarvões, correspondentes a 10, 20, 40 e 80 t ha⁻¹; quatro granulometrias de biocarvão (2,0-1,0 mm; 1,0-0,5 mm; 0,5-0,25 mm; < 0,25 mm); e um tratamento adicional sem adição de biocarvão.

2.2 Produção e preparo dos biocarvões

Para a produção dos biocarvões foram utilizadas palha de café conilon (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner), composta pela casca, pergaminho e grãos perdidos durante o beneficiamento dos frutos, que por sua vez foi conduzido no Instituto Federal do Espírito Santo, Campus de Alegre - ES. O resíduo foi seco ao ar até apresentar teor de umidade entre 11 e 12%.

A palha de café foi submetida ao processo de pirólise lenta em duas temperaturas (350 e 600 °C), com tempo de permanência de 60 min. A pirólise foi conduzida em um reator metálico, modelo SPPT-V60, com taxa de aquecimento de 12 °C min⁻¹ (Figura 1). Após o término do processo de pirólise, o biocarvão permaneceu no reator até que o mesmo atingisse a temperatura ambiente. O material carbonizado foi caracterizado quanto às concentrações de C, H, N e O, em analisador elementar, (Tabela 1) e teores de macronutrientes, por digestão nitroperclórica (Tabela 2).



Figura 1 - Reator de Pirólise Lenta, Modelo SPPT V60

Tabela 1 - Teores elementares¹ de C, H, N e O e relações C/N, H/C e O/C em biocarvões de palha de café conilon, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 e 600 °C)

Biocarvão	Teor elementar (%)				C/N	H/C	O/C
	C	H	N	O			
350 °C	59,87	4,57	2,54	33,02	23,57	0,08	0,55
600 °C	76,66	2,17	2,44	18,73	31,42	0,03	0,24

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

Tabela 2 – Teores totais¹ de macro e micronutrientes presentes nos biocarvões de palha de café, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 e 600 °C)

Nutriente	350 °C	600 °C
	----- dag/kg -----	
P	0,20	0,30
K	4,46	5,66
Ca	1,67	2,32
Mg	0,32	0,42
S	0,22	0,32
	----- mg/kg -----	
Cu	23,70	36,35
Fe	451,55	724,75
Zn	12,20	17,20
Mn	109,65	151,80
B	81,92	109,36

¹Obtidos por digestão nitroperclórica (EMBRAPA, 1997).

O material foi levemente macerado com o intuito de facilitar a passagem pelo conjunto de peneiras, bem como aumentar o rendimento dos intervalos granulométricos estudados. A separação foi feita em um conjunto de peneiras de malhas distintas (2 mm; 1 mm; 0,5 mm; e 0,25 mm) que são acopladas em um aparelho do tipo mesa vibratória para obtenção das seguintes classes granulométricas: 2,0-1,0; 1,0-0,5; 0,5-0,25; e < 0,25 mm. Após colocadas as quantidades de biocarvão no topo do conjunto de peneiras, a massa do material foi peneirada, durante 5 min, na graduação nº 5 do aparelho.

2.3 Solo utilizado

Coletaram-se amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo na profundidade de 0-20 cm, localizado no município de Alegre, Espírito Santo. O solo foi seco ao ar e passado em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), retirando-se uma amostra para caracterização química e física (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3 - Caracterização física¹ do solo

Areia	Silte	Argila
----- g/kg -----		
170,0	60,0	770,0

¹Silte e argila: Método da pipeta -agitação lenta

Tabela 4 - Caracterização química¹ do solo

pH H ₂ O	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	T	M.O.
	-----mg dm ⁻³ -----			-----cmol _c dm ⁻³ -----					gkg ¹
6,44	15,59	8,00	4,00	0,83	0,81	0,00	1,81	3,50	11,43

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) (EMBRAPA, 1997) e M.O: Matéria orgânica (YEOMANS & BREMMER, 1988).

2.4 Montagem e condução do experimento

Para cada parcela experimental foram pesados 200 g de solo e a massa de 2, 4, 8 e 16 g, equivalente às respectivas doses 10, 20, 40 e 80 t ha⁻¹ de biocarvões. O solo e os biocarvões foram misturados, homogeneizados e, posteriormente, acondicionados em potes plásticos de 250 ml abertos. Em seguida, adicionou-se água deionizada em teor equivalente à retenção de água a um potencial de -20 kPa, previamente determinado, em extrator de placa porosa, para cada tratamento (Tabela 5).

Tabela 5 – Conteúdos de água base gravimétrica, em kg kg⁻¹, relacionados aos tratamentos sob potencial matricial equivalente a -20 kPa

Dose (t/ha)	----- Granulometrias do biocarvão -----			
	1,0 - 2,0 mm	0,5 - 1,0 mm	0,25 - 0,5 mm	<0,25 mm
	----- 350 °C -----			
0				0,4871
10	0,4581	0,4809	0,4349	0,4310
20	0,4581	0,4655	0,4558	0,4556
40	0,4872	0,4479	0,4686	0,4555
80	0,4828	0,4642	0,4932	0,4875
	----- 600 °C -----			
0				0,4871
10	0,4634	0,4628	0,4899	0,4653
20	0,5090	0,4535	0,5154	0,4320
40	0,5106	0,4762	0,5121	0,4693
80	0,4997	0,4985	0,4772	0,5136

As parcelas experimentais permaneceram abertas permitindo assim a perda de água por evaporação, sendo que a cada 7 dias, a massa de água perdida era repostada por meio de pesagens. A cada nova pesagem foram anotados os valores em peso que cada amostra apresentava ao final do ciclo, a fim de se monitorar as perdas de água de cada

amostra, bem como o comportamento de perda de água em cada bloco, ou ainda, em zonas diferentes do mesmo bloco. A condução do experimento durou 119 dias, tendo sido completos 17 ciclos de umedecimento e secagem.

Após os 119 dias cessou-se a reposição de água. Aguardou-se então que as amostras secassem ao ar, por um período de 15 dias.

2.5 Determinações experimentais

Após o período de incubação e secagem ao ar, as amostras foram levemente fragmentadas em torrões menores para que fossem levadas ao conjunto de peneiras e então submetidas à separação em via seca em agitador de peneiras (Figura 2).



Figura 2 - Amostras antes da separação via seca em conjunto de peneiras

Após as separações, foram obtidas 6 classes granulométricas de agregados: 4,0 – 2,0 mm; 2,0 – 1,0 mm; 1,0 – 0,5 mm; 0,5 – 0,25 mm; 0,25 – 0,106, e <0,106 mm. Os materiais obtidos em peneira de malha de 4-2 mm foram descartados devido à reduzida representatividade percentual da massa obtida.

Foram preparadas amostras de 10 g de agregados em duas classes distintas, macro (>0,25 mm) e microagregados (<0,25 mm), a partir das classes de agregados obtidos previamente nas separações por via seca, para a posterior determinação dos teores de P e K disponíveis. As massas de 10 g de agregados foram obtidas, levando-se em consideração o peso ponderado de cada classe dos agregados em relação ao somatório total da massa das classes que compunham separadamente o conjunto dos macro e

microagregados. Assim, para os 10 g de macroagregados, foram consideradas as massas ponderadas das classes de agregados maiores que 0,25 mm (2,0-1,0 mm; 1,0-0,5 mm; e 0,5-0,25 mm) e para os 10 g de microagregados foram consideradas as massas ponderadas as classes de agregados menores que 0,25 mm (0,25 – 0,106 mm e <0,106 mm).

As amostras de 10 g de macro e microagregados de cada tratamento foram então submetidas às determinações de P e K, com extração com Mehlich-1 e determinação via espectrofotometria no ultravioleta visível (UV/VIS) e fotometria de chama, respectivamente (EMBRAPA, 1997).

2.6 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Para as avaliações do efeito de temperatura sobre os teores de P e K obtidos foram observadas as significâncias pelo teste F da análise de variância. Foram ainda testados ajustes dos modelos de regressão em função das doses de biocarvões para cada combinação de granulometria e tipo de biocarvão. Os modelos foram escolhidos com base nas avaliações do comportamento gráfico das variáveis, da soma dos quadrados dos modelos completos, do coeficiente de determinação (R^2) e significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste t de Student. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados em Ambiente R (R CORE TEAM, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Potássio disponível em macro e microagregados

A elevação dos teores médios de K nos macro e microagregados do solo já sob a primeira dose de biocarvão, chegou a um valor correspondente a 37,0 (sob biocarvões de 350 °C) e 46,7 (sob biocarvões de 600 °C) vezes maior, respectivamente, quando comparados com a testemunha (Tabela 6). É possível observar que quanto maiores as doses de biocarvão aplicadas aos tratamentos houve também um aumento nos teores de K disponível, independente da granulometria dos biocarvões e temperatura de pirólise.

Tabela 6 – Teores médios de K em macro e microagregados do solo para as diferentes combinações de temperatura de pirólise, granulometria e dose dos biocarvões de palha de café conilon

Granulometrias do biocarvão (mm)	Doses (t/ha)	Macroagregados		Microagregados	
		350 °C	600 °C	350 °C	600 °C
----- K (mg/kg) -----					
<0,25	10	740,0	713,3	487,7	513,3
	20	1946,7	1478,7	1015,7	1089,0
	40	2958,7	2801,3	2068,0	2163,3
	80	3964,0	5947,3	4546,7	4139,7
0,5 - 0,25	10	658,7	597,3	377,7	432,7
	20	1065,3	1213,3	777,3	891,0
	40	2140,0	2438,7	1562,0	1840,7
	80	3078,7	3604,0	2885,7	3743,7
1,0 - 0,5	10	509,3	672,0	344,7	465,7
	20	980,0	1312,0	715,0	971,7
	40	1949,3	2556,0	1503,3	1859,0
	80	3776,0	3858,7	2680,3	3765,7
2,0 - 1,0	10	493,3	756,0	366,7	498,7
	20	1037,3	1493,3	733,3	1103,7
	40	1981,3	2812,0	1514,3	2174,3
	80	3352,0	6119,7	2731,7	4033,3
Testemunha		20,0		11,0	

Deve-se destacar que os biocarvões de palha de café possuem elevado teor de K (BARBOSA, 2016), com teores que variam de aproximadamente 150 g kg⁻¹, para biocarvões produzidos a 350 °C, a 200 g kg⁻¹, para biocarvões produzidos a 600 °C. Em ambos os agregados do solo, a temperatura de pirólise a 600 °C proporcionou maior disponibilidade de K (Figura 3).

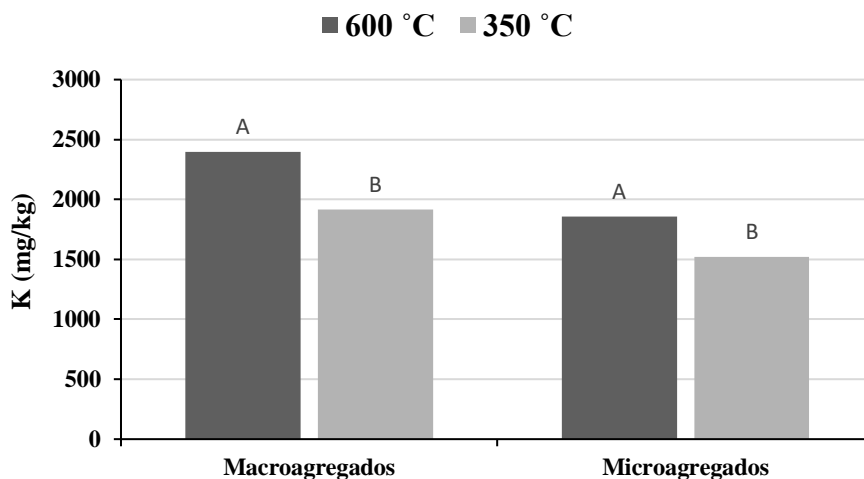


Figura 3 - Disponibilidade de K em macro e microagregados em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes nas classes de agregados indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,001$)

Para tais observações deve-se destacar que a qualidade e quantidade do conteúdo potássico presente nos biocarvões é dependente do tipo de material utilizado e da temperatura de pirólise (PRAKONGKEP; GILKES; WIRIYAKITNATEEKUL, 2015; TAN et al., 2017; TIAN et al., 2017; LIMWIKRAN et al., 2018;). Além disso, a disponibilidade de K no solo após a aplicação dos biocarvões dependerá, dentre outros fatores, das características de reatividade dos compostos potássicos presentes, sobretudo das características que influenciam a solubilidade destes compostos (PRAKONGKEP; GILKES; WIRIYAKITNATEEKUL, 2015).

Dentre as classes de agregados, os macroagregados apresentam maiores teores de K que os microagregados (Figuras 4 e 5). Tal comportamento pode ser explicado em função da granulometria dos biocarvões, da movimentação de K^+ nos diferentes agregados, dos fenômenos de precipitação de minerais potássicos e de ligação dos íons K^+ à superfície negativamente carregada dos biocarvões.

Em biocarvões, a solubilidade das formas de potássio presentes é dependente das formas minerais e da localização nas superfícies internas e externas dos biocarvões (PRAKONGKEP; GILKES; WIRIYAKITNATEEKUL, 2015; LIMWIKRAN et al., 2018). Desta forma, no presente estudo, quando os biocarvões são aplicados ao solo e, em contato com a água do solo, as formas potássicas de mais fácil dissolução podem se distribuir para todo o volume da parcela experimental. Consequentemente, ao final da incubação, e então secagem do solo, pode ter ocorrido a precipitação do excesso de

material potássico, inicialmente dissolvido. Caso parte dos compostos potássicos, adicionados via biocarvão, não sofra solubilidade por inacessibilidade nos poros de biocarvões (LIMWIKRAN et al., 2018) que contenham compostos solúveis, estes acompanharão as partículas de biocarvões onde elas se depositarem.

Assim, por exemplo, a maior disponibilidade de K em macroagregados, quando aplicados biocarvões maiores que 0,25 mm (Figuras 5 e 6), pode estar relacionada tanto com a facilidade do K se distribuir por toda a mistura solo + biocarvões, quando umedecido, podendo assim precipitar-se, quando a unidade experimental tem a sua umidade reduzida, se associando a diferentes classes de agregados.

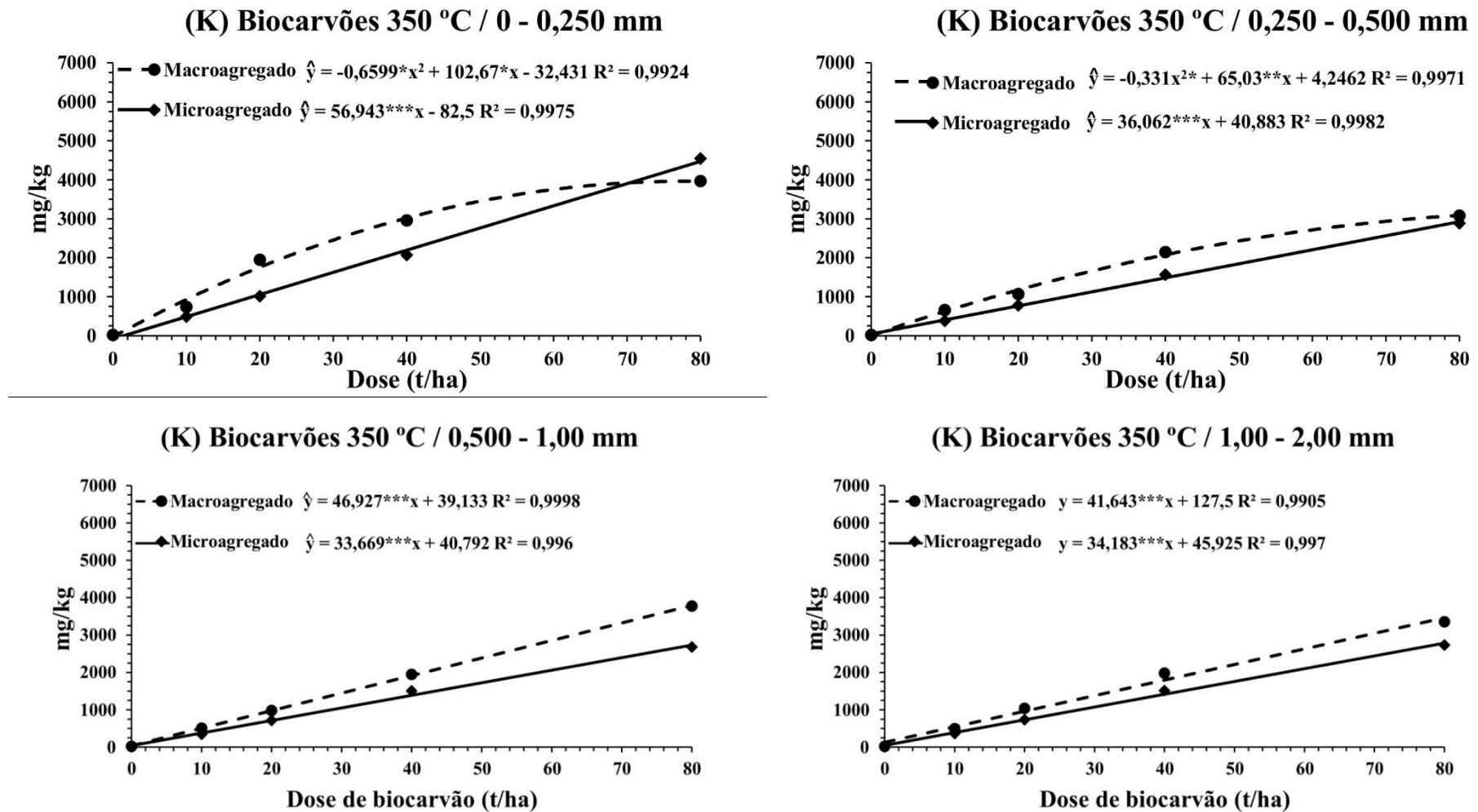


Figura 4 – Teor de K no solo em função de doses de biocarvão de palha de café conilon de diferentes granulometrias, produzidos a temperatura de 350 °C em macro e microagregados do solo. *, ** e ***, significativo à 5, 1 e 0,1 %, respectivamente, pelo teste t

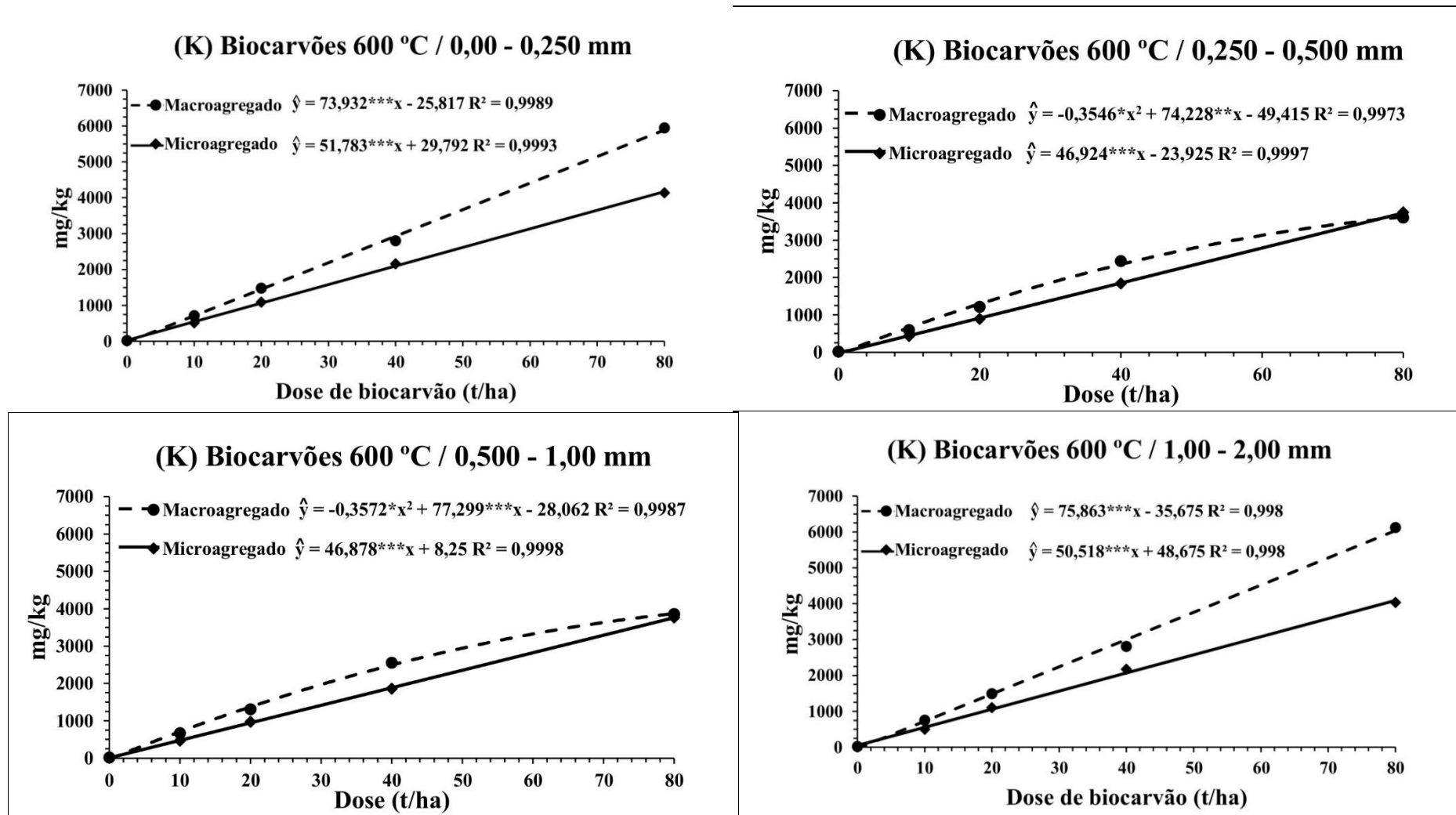


Figura 5 - Teor de K em macro e microagregados do solo em função de doses de biocarvão de palha de café conilon de diferentes granulometrias, produzidos a temperatura de 600 °C. *, ** e ***, significativo à 5, 1 e 0,1 %, respectivamente, pelo teste t

1 Tais partículas, de tamanhos maiores que 0,25 mm, possuem uma
2 predisposição de serem encontradas nas classes dos macroagregados, seja de forma
3 isolada, como partículas individuais, ou ligadas a outras partículas formando
4 agregados maiores. As presenças destas partículas de biocarvões maiores, tendem a
5 aumentar a quantidade de cargas negativas nas classes dos macroagregados em relação
6 à classe dos microagregados, pois se sabe que biocarvões podem promover aumento
7 da CTC do solo por serem fontes de cargas negativas, cargas estas geradas a partir da
8 desprotonação de grupos funcionais presentes nos biocarvões e, conseqüentemente,
9 aumenta-se a probabilidade de se encontrar ions K^+ ligados a CTC dos
10 macroagregados e/ou das partículas individuais de biocarvões presentes nessa classe
11 de agregados.

12 Biocarvões <0,25 mm podem participar tanto das classes dos micro quanto das
13 classes dos macroagregados, desenvolvendo seus efeitos em disponibilidade de
14 potássio e agregação nas diferentes classes de agregados obtidas após a separação de
15 agregados por via seca, sejam eles maiores ou menores que 0,25 mm.

16 Há uma tendência em maior disponibilidade de K em macroagregados, tanto
17 em biocarvões de 350 °C, quanto em biocarvões de 600 °C, podendo ser um efeito do
18 ganho em macroagregação em função da presença das partículas de biocarvões,
19 indicando assim a formação de agregados maiores, de tal forma que o efeito quadrático
20 no teor de K^+ de biocarvões de 350 °C (Figura 4) de granulometria mais fina (<0,25
21 mm e 0,25-0,5 mm) pode possivelmente estar relacionado com o curto período de
22 incubação (119 dias) do experimento, não sendo suficiente para que a excessiva
23 quantidade de biocarvões, nas doses mais altas, proporcionasse a formação de
24 agregados de maior tamanho. Dessa forma, uma parte da massa deste tipo de partícula
25 pode estar presente como partículas individuais dentro dos agregados menores,
26 influenciando para que haja uma maior CTC na classe de microagregados e/ou um
27 maior depósito de minerais potássicos precipitados, aumentando a probabilidade dos
28 íons K^+ serem contabilizados como K disponível nesta última classe de agregados.

29 O teor de K disponível nos tratamentos sob biocarvões de 600 °C tende a ser
30 maior que nos tratamentos sob biocarvões de 350 °C. Tal comportamento pode estar
31 ligado à maior relação entre a massa mineral (cinzas) e a massa orgânica de biocarvões
32 de maior temperatura, em relação aos de menor temperatura, em função de uma maior
33 degradação da palha de café ou resíduo orgânico promovido pela maior temperatura e
34 presença de cinzas.

1 Em Barbosa (2016), é possível verificar que biocarvões de palha de café
2 produzidos a 600 °C apresentam não só um maior conteúdo de cinzas (fração mineral),
3 mas também um maior teor de K. Segundo Matiello et al. (2002), a proporção de K na
4 palha de café em relação a N e P é de, aproximadamente, 2 a 20 vezes maior,
5 respectivamente, além do K não ser constituinte de moléculas orgânicas em biomassa
6 de plantas, conseqüentemente, durante a carbonização da palha de café, este elemento
7 se encontra na forma inorgânica.

8 Assim, para uma mesma massa de biocarvão, há uma predisposição maior de
9 conteúdo de K nos biocarvões de 600 °C do que nos biocarvões de 350 °C. Segue-se
10 ainda que durante o processo de secagem das parcelas, e conseqüente precipitação do
11 K^+ , confere estabilidade aos agregados quando secos podendo assim contribuir para
12 uma maior quantidade de K potássicos em macroagregados do solo.

13 **3.2 Fósforo disponível em macro e microagregados**

14 Verifica-se que todos os tratamentos que receberam doses de biocarvão tiveram
15 maior disponibilidade de P, se comparados ao tratamento testemunha, na ausência de
16 biocarvão (Tabela 7).
17
18
19

1

2

3

4

Tabela 7 - Teores médios de P em macro e microagregados do solo para as diferentes combinações de temperatura de pirólise, granulometria e doses dos biocarvões de palha de café conilon

Granulometrias do biocarvão (mm)	Doses (t/ha)	Macroagregados		Microagregados	
		350 °C	600 °C	350 °C	600 °C
----- P (mg kg ⁻¹) -----					
<0,25	10	14,2	14,8	19,0	15,9
	20	18,7	17,4	23,6	22,2
	40	23,2	21,6	35,9	38,0
	80	36,8	39,1	66,6	49,8
0,5 - 0,25	10	14,1	14,7	16,5	11,1
	20	16,7	16,1	18,5	13,8
	40	19,9	20,5	23,3	18,6
	80	29,2	26,5	33,8	20,4
1,0 - 0,5	10	14,3	15,1	15,8	12,3
	20	16,1	18,2	17,5	15,5
	40	18,9	21,5	21,9	13,4
	80	27,4	29,9	28,0	22,2
2,0 - 1,0	10	14,0	16,1	16,5	12,6
	20	15,1	19,3	16,9	14,6
	40	21,2	22,7	20,5	16,9
	80	31,5	29,9	25,1	21,2
Testemunha		13,4		11,0	

5

6

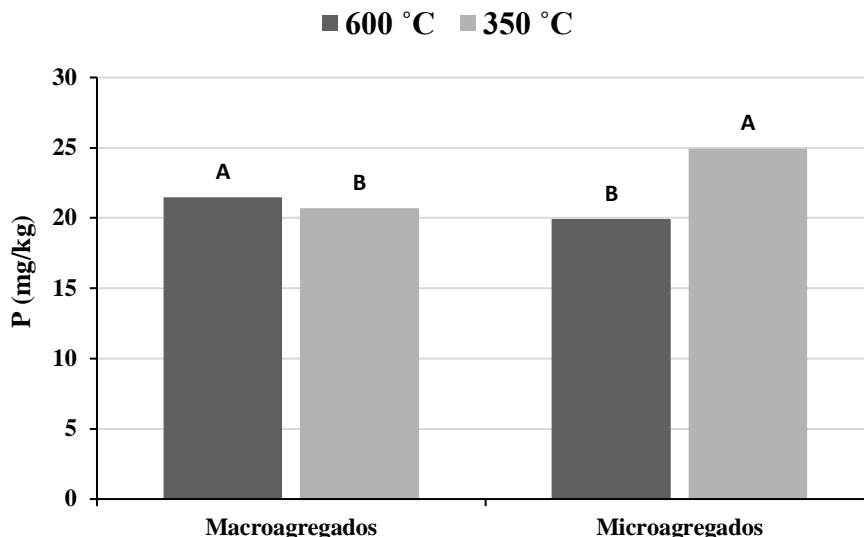
7

8

9

10 6).

Os biocarvões submetidos a temperatura de pirólise de 600 °C proporcionaram significativamente maior disponibilidade de P em macroagregados do que biocarvões de 350 °C, já para microagregados observa-se o inverso, onde a maior disponibilidade de P encontra-se no biocarvão produzido na menor temperatura de pirólise (350 °C) (Figura



1
2 **Figura 6** - Disponibilidade de P em macro e microagregados em
3 função da temperatura de pirólise. Letras diferentes nas classes
4 de agregados indicam diferença entre temperatura segundo teste
5 F ($p < 0,001$)
6

7 A disponibilidade de P por conta da incorporação de biocarvão no solo tem sido
8 atribuída a vários fatores, tais como: (i) a precipitação de ferro (Fe) e de alumínio (Al),
9 através da elevação do pH promovido pelo biocarvão (De LUCA et al., 2015); (ii) a
10 adição de compostos orgânicos solúveis, que podem se ligar aos mesmos sítios de sorção
11 de fosfatos nos coloides do solo (SCHNEIDER; HADERLEIN, 2016); (iii) as forças de
12 repulsão eletrostáticas promovidas por este conteúdo orgânico (SCHNEIDER;
13 HADERLEIN, 2016) e; (iv) os biocarvões contêm P em sua composição, podendo ser
14 parcialmente solubilizado e disponibilizado ao solo (DARI et al., 2016; JIN et al., 2016).

15 A disponibilidade de P mostrou-se crescente com o aumento das doses dos
16 biocarvões, independente da granulometria e temperatura de pirólise, conferindo ajustes
17 lineares às equações testadas, apresentando ajuste quadrático apenas no tratamento com
18 biocarvões de granulometria menor que 0,25 mm, obtido na temperatura de pirólise de
19 600 °C (Figuras 7 e 8).

20 Os tratamentos que receberam os biocarvões de menor granulometria (<0,25 mm)
21 apresentaram maior disponibilidade de P, quando comparados a outras granulometrias,
22 independente da temperatura de pirólise, fato esse manifesto para ambos os tipos de
23 agregados (Figuras 7 e 8).

24 O aumento pronunciado da concentração de P sob tratamentos com biocarvões de
25 menor granulometria (< 0,25 mm) pode estar relacionado com o conteúdo de cinzas mais
26 elevado nesta fração granulométrica de biocarvão, que por sua vez podem atuar como

1 partículas individualizadas ou ainda como constituinte ligado à classe dos
2 microagregados (agregados menores que 0,25 mm).

3 Para a compreensão desses maiores teores de P nos agregados, que receberam as
4 menores granulometrias de biocarvão, deve-se considerar que a fração cinza é uma das
5 principais responsáveis pelo teor de fósforo nos biocarvões (SHEPHERD et al, 2017).
6 Desta forma, dentro de um processo de separação granulométrica, através de
7 peneiramento de uma massa de biocarvão, a fração cinza tende a se concentrar nas
8 peneiras mais finas, ou seja, para uma mesma massa de biocarvão aplicada ao solo, as
9 massas dos biocarvões de menor granulometria tendem a possuir uma maior quantidade
10 de compostos fosfatados. Justifica-se assim o maior teor de P dentro da classe dos macro
11 e microagregados, que receberam aplicação de biocarvões de menor granulometria.

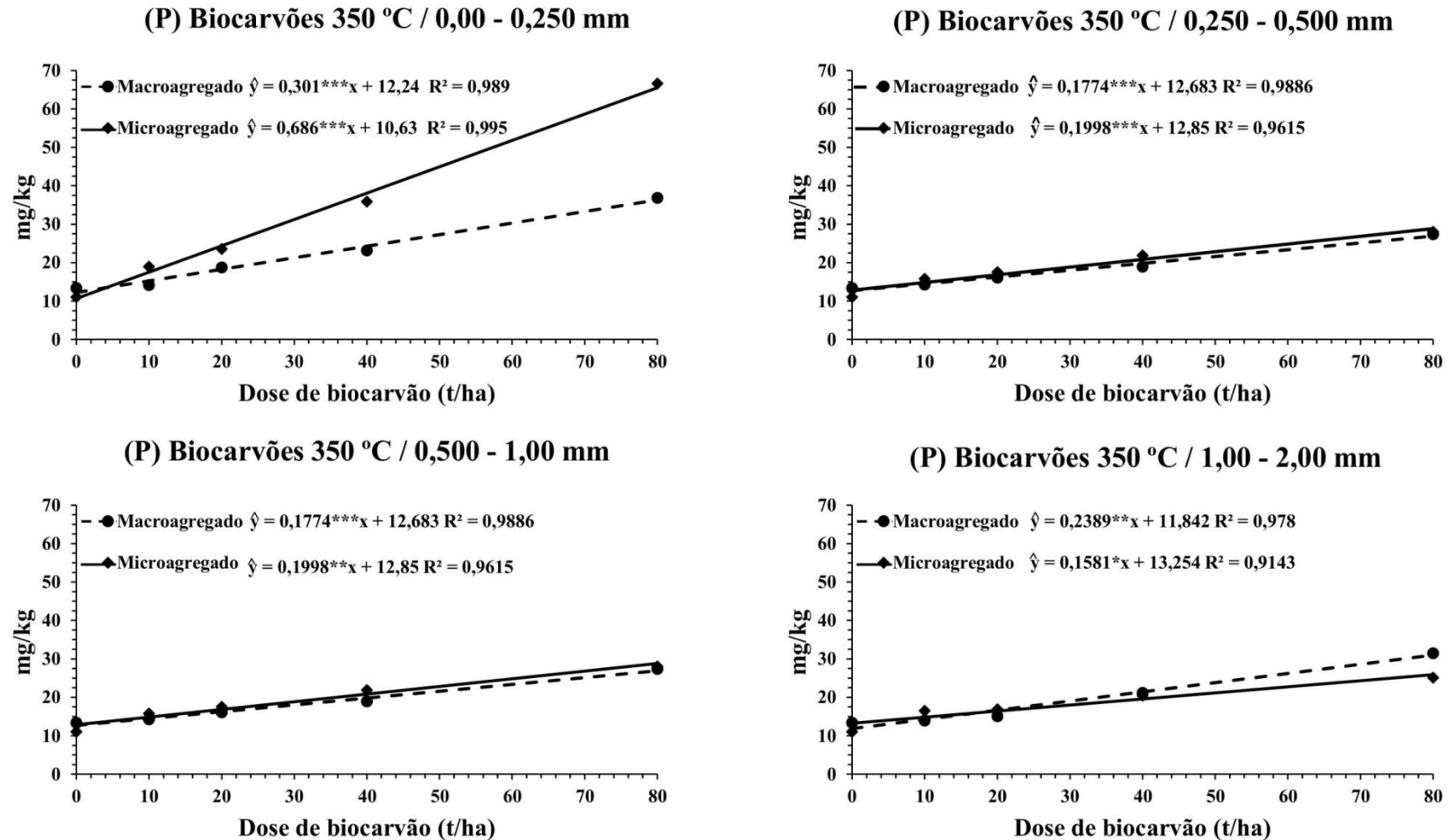


Figura 7 – Teor de P em macro e microagregados do solo em função de doses de biocarvão de palha de café conilon com diferentes granulometrias, produzidos a temperatura de 350 °C. *, ** e ***, significativo à 5, 1 e 0,1 %, respectivamente, pelo teste t

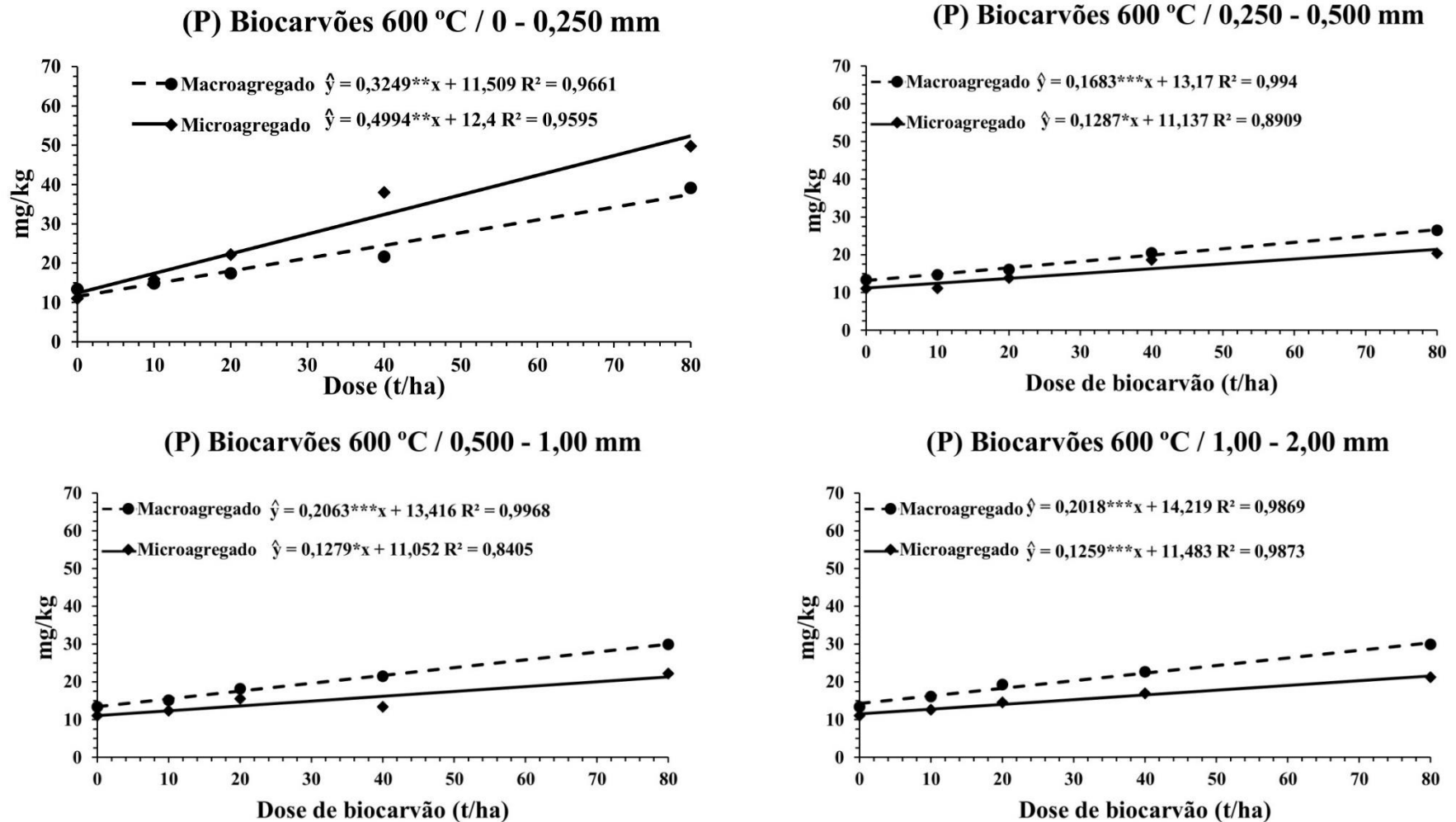


Figura 8 - Teor de P no solo em função de doses de biocarvão de diferentes granulometrias, a uma temperatura de pirólise de 600 °C em macro e microagregados do solo. *, ** e ***, significativo à 5, 1 e 0,1 %, respectivamente, pelo teste t

Para a maior concentração de P em microagregados, nos tratamentos que receberam estes mesmos biocarvões de menor granulometria ($< 0,25$ mm), deve-se considerar que os biocarvões de granulometria menor que 0,25 mm, após o período de incubação e então a separação dos agregados secos, se comportaram como partículas individuais ou agregados, ou seja, após os ciclos de umedecimento e secagem as partículas individuais deste biocarvão podem se associar a outras partículas do solo, e esta associação pode formar partículas maiores que 0,25 mm, vindo a compor os macroagregados.

Ainda para estes tratamentos que receberam biocarvões de menor granulometria ($<0,25$ mm), caso as partículas dos biocarvões não se associem com outras partículas para formarem grânulos maiores, elas serão simplesmente partículas individuais ou grânulos menores que 0,25 mm, e se depositarão, durante a separação de agregados por via seca, nas peneiras menores que 0,25 mm, fazendo parte da denominada massa de microagregados, aumentando assim o teor de P disponível nessa menor classe de agregados.

Quando aplicados biocarvões de maior granulometria observa-se uma menor diferença na disponibilidade de P entre macro e microagregados, para todas as doses aplicadas (Figuras 7 e 8). Contudo, dentro nos tratamentos sob biocarvões de maiores granulometrias, os tratamentos que receberam biocarvões produzidos a 600 °C, apresentaram uma maior disponibilidade de P nos macroagregados em relação aos microagregados, e valores muito próximos entre os teores de P disponível nos macro e microagregados dos tratamentos que receberam biocarvões produzido a 350 °C.

Nos tratamentos sob biocarvões de 600 °C e de maior granulometria, se espera que, os fosfatos estejam de alguma forma ligados/aderidos à estrutura dos biocarvões, permitindo assim que uma maior parte do fosfato aplicado via biocarvão predomine na fração dos macroagregados, uma vez que as partículas de tamanho maior que 0,25 mm não podem participar da fração dos microagregados. Xu et al. (2016), em extrações sequenciais, verificaram que a proporção fósforo orgânico/fósforo total é aumentada com o aumento da temperatura de pirólise, indicando assim uma maior probabilidade da ocorrência de fosfatos ligados à estrutura orgânica em biocarvões de maior temperatura.

Deve-se considerar que biocarvões produzidos a temperaturas mais elevadas têm um aumento na proporção de compostos fosfatados de menor labilidade (XU et al., 2016), e extratores ácidos como Mehlich-1 são capazes de dissolver formas de fosfatos de menor solubilidade (VAN RAIJ; FEITOSA; SILVA, 1984). Portanto, é possível que os maiores

teores de P obtidos nos macroagregados sob biocarvões de 600 °C possam ser uma superestimativa do teor de P disponível em curto prazo.

Contudo, quando utilizados biocarvões de 350 °C, de granulometria maior que 0,25 mm, tais diferenças entre macro e microagregados não são tão evidentes, o que pode estar relacionado com uma possível participação de compostos fosfatados preferencialmente ligados à estrutura orgânica de biocarvões maiores que 0,250 mm e/ou, uma maior proporção de fosfatos mais lábeis, podendo se distribuir mais facilmente nas diferentes classes de agregados. Soma-se a esses fatos a possibilidade de biocarvões produzidos sob menor temperatura possuírem um maior teor de compostos orgânicos solúveis (SMITH et al., 2016) que podem se deslocar mais facilmente no solo, contribuindo na maior disponibilidade de P pela competição pelos sítios de adsorção irreversível de fosfatos no colóides do solo (SCHNEIDER; HADERLEIN, 2016).

4 CONCLUSÕES

Biocarvões de palha de café conilon, independente da temperatura final de pirólise, dose e granulometria aumentam a disponibilidade de P e K em macro e em microagregados do solo, chegando à ordem de 5 vezes os valores de K considerados adequados para a maioria das culturas, já com a dose mais baixa de biocarvão. Já para o P, a disponibilidade aumentou entre 100% e 600%.

A maior disponibilidade de P em macroagregados alcançada para tratamentos sob biocarvão de 600 °C e a maior disponibilidade de P para microagregados é alcançada para tratamentos sob biocarvão de 350 °C. Já o K apresenta maior disponibilidade em ambos os agregados do solo, sob biocarvão de 600 °C.

A ação conjunta de granulometria e/ou efeitos em agregação promovida pelos biocarvões tende a desenvolver teores mais elevados de K em macroagregados, independente da temperatura em que os biocarvões foram produzidos.

Biocarvões de 600 °C de maior granulometria proporcionam maiores teores de P disponível nos macroagregados, ao passo que biocarvões de menor granulometria, independente da temperatura de produção do biocarvão, promovem maior disponibilidade de fósforo nos microagregados.

5 REFERÊNCIAS

- BARBOSA, C. F. **Caracterização de biocarvões produzidos em diferentes temperaturas**. Dissertação de mestrado em Produção Vegetal-CCAUE-UFES. 2016. 76p.
- BLANCO-CANQUI, H. Biochar and Soil Physical Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 4, p. 687–711, 2017.
- CELY, P., GASCÓ, G., PAZ-FERREIRO, J., MÉNDEZ, A. Agronomic properties of biochars from different manure wastes. **J. Anal. Appl. Pyrol.** 111, 173–182, 2015.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira, café safra 2018**. Brasília: MAPA/CONAB, 2018.
- CUI, H.-J.; WANG, M.K.; FU, M.-L.; CI, E. Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, n. 7, p. 1135, 2011.
- 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**, v. 581–582, p. 601–611, 2017.
- 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.
- ESMAEELNEJAD, L., SHORAFSA, M., GORJI, M., HOSSEINI, S. M. Enhancement of physical and hydrological properties of a sandy loam soil via application of different biochar particle sizes during incubation period. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 2, p. 1103, 2016.
- ESMAEELNEJAD, L., SHORAFSA, M., GORJI, M., HOSSEINI, S.M. Impacts of Woody Biochar Particle Size on Porosity and Hydraulic Conductivity of Biochar-Soil Mixtures: An Incubation Study. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 14, p. 1710–1718, 2017.
- FARAHANI, E., EMAMI, H., KELLER, T. Impact of monovalent cations on soil structure. Part I. Results of an Iranian soil. **International Agrophysics**, v. 32, n. 1, p. 57–67, 2018.
- FARAHANI, E.; EMAMI, H.; KELLER, T. Impact of monovalent cations on soil structure. Part II. Results of two Swiss soils. **International Agrophysics**, v. 32, n. 1, p. 69–80, 2018.

- FONTE, S.J., NESPER, M., HEGGLIN, D., VELÁSQUEZ, J.E., RAMIREZ, B., RAO, I.M., BERNASCONI, S.M., BÜNEMANN, E.K., FROSSARD, E., OBERSON, A. Pasture degradation impacts soil phosphorus storage via changes to aggregate-associated soil organic matter in highly weathered tropical soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. 150–157, 2014.
- GARDNER, W.R., MAYHUGH, M.S., GOERTZEN, J.O., BOWER, C.A. Effect of electrolyte concentration and exchangeable sodium percentage on diffusivity of water in soils. **Soil Science**, v. 88, n. 5, p. 270, 1959.
- GARLAND, G., BÜNEMANN, E.K., OBERSON, A., FROSSARD, E., SIX, J. Plant-mediated rhizospheric interactions in maize-pigeon pea intercropping enhance soil aggregation and organic phosphorus storage. **Plant and Soil**, v. 415, n. 1–2, p. 37–55, 2017.
- HAMMER, E.C., BALOGH-BRUNSTAD, Z., JAKOBSEN, I., OLSSON, P.A., STIPP, S.L.S., RILLIG, M.C. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 77, p. 252–260, 2014.
- 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.
- 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.
- LEVY, G. J.; TORRENTO, J. R. Clay dispersion and macroaggregate stability as affected by exchangeable potassium and sodium. **Soil Science**, v. 160, n. 5, p. 352, 1995.
- LI, B., GE, T., XIAO, H., ZHU, Z., LI, Y., SHIBISTOVA, O., LIU, S., WU, J., INUBUSHI, K., GUGGENBERGER, G. Phosphorus content as a function of soil aggregate size and paddy cultivation in highly weathered soils. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 8, p. 7494–7503, 2016
- LI, J., LU, J., LI, X., REN, T., CONG, R., ZHOU, L. Dynamics of Potassium Release and Adsorption on Rice Straw Residue. **PLOS ONE**, v. 9, n. 2, 2014.
- LIM, T.-J.; SPOKAS, K. Impact of Biochar Particle Shape and Size on Saturated Hydraulic Properties of Soil. **Korean Journal of Environmental Agriculture**, v. 37, n. 1, p. 1–8, 30 mar. 2018.
- LIMWIKRAN, T., KHEORUENROMNE, I., SUDDHIPRAKARN, A., PRAKONGKEP, N., GILKES, R.J. Dissolution of K, Ca, and P from biochar grains in tropical soils. **Geoderma**, v. 312, p. 139–150, 2018.
- LINQUIST, B.A., SINGLETON, P.W., YOST, R.S., CASSMAN, K.G. Aggregate size effects on the sorption and release of phosphorus in an ultisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 160–166, 1997
- LIU, Z., DUGAN, B., MASIELLO, C.A., GONNERMANN, H.M. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. **PLOS ONE**, v. 12, n. 6, p. e0179079, 2017.

MARGENOT, A.J., PAUL, B.K., SOMMER, R.R., PULLEMAN, M.M., PARIKH, S.J., JACKSON, L.E., FONTE, S.J. Can conservation agriculture improve phosphorus (P) availability in weathered soils? Effects of tillage and residue management on soil P status after 9 years in a Kenyan Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 157–166, 2017.

MARTIN, J. P.; RICHARDS, S. J. Influence of Exchangeable Hydrogen and Calcium, and of Sodium, Potassium and Ammonium at Different Hydrogen Levels on Certain Physical Properties of Soils 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 23, n. 5, p. 335–338, 1959.

MATIELLO, J.B.; SANTINATO, R; GARCIA, A.W.R.; ALMEIDA; S.R.; FERNANDES, D.R. Cultura do café no Brasil: novo manual de recomendações. Rio de Janeiro/ Varginha: **Mapa - Sarc/Procafé**; Fundação Procafé, 2002. 387p.

MCDOWELL, R.W., SCOTT, J.T., STEWART, I., CONDRON, L.M. Influence of aggregate size on phosphorus changes in a soil cultivated intermittently: analysis by ^{31}P nuclear magnetic resonance. **Biology and Fertility of Soils**, v. 43, n. 4, p. 409–415, 2007

MELO, L. C. A.; COSCIONE, A. R.; ABREU, C. A.; PUGA, A. P.; CAMARGO, O. A. Influence of pyrolysis temperature on cadmium and zinc sorption capacity of sugar cane straw-derived biochar. **BioResources**, v. 8, n. 4, p. 4992–5004, 2013.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Biochar Impacts on Soil Physical Properties and Greenhouse Gas Emissions. **Agronomy**, v. 3, n. 2, p. 313–339, 2013.

NESPER, M., BÜNEMANN, E.K., FONTE, S.J., RAO, I.M., VELÁSQUEZ, J.E., RAMIREZ, B., HEGGLIN, D., FROSSARD, E., OBERSON, A. Pasture degradation decreases organic P content of tropical soils due to soil structural decline. **Geoderma**, Special issue on developments in soil organic phosphorus cycling in natural and agricultural ecosystems. v. 257–258, p. 123–133, 2015.

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.

PHOCHAROEN, Y., ARAMRAK, S., CHITTAMART, N., WISAWAPIPAT, W. Potassium influence on soil aggregate stability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 17, p. 2162–2174, 2018.

PRAKONGKEP, N.; GILKES, R. J.; WIRIYAKITNATEEKUL, W. Forms and solubility of plant nutrient elements in tropical plant waste biochars. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 178, n. 5, p. 732–740, 2015.

QUIRK, J. P.; SCHOFIELD, R. K. THE EFFECT OF ELECTROLYTE CONCENTRATION ON SOIL PERMEABILITY. **Journal of Soil Science**, v. 6, n. 2, p. 163–178, 1955.

R Core Team (2018). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

REEVE, R.C., BOWER, C.A., BROOKS, R.H., GSCHWEND, F.B. A Comparison of the Effects of Exchangeable Sodium and Potassium upon the Physical Condition of Soils 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 18, n. 2, p. 130–132, 1954.

- SCHNEIDER, F.; HADERLEIN, S. B. Potential effects of biochar on the availability of phosphorus — mechanistic insights. **Geoderma**, v. 277, p. 83–90, 2016.
- SHEKLABADI, M., MAHMOUDZADEH, H., MAHBOUBI, A.A., GHARABAGHI, B., AHRENS, B. Land use effects on phosphorus sequestration in soil aggregates in western Iran. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, n. 10, p. 6493–6503, 2014.
- SHEN, Q., HEDLEY, M., CAMPS ARBESTAIN, M., KIRSCHBAUM, M.U.F. Can biochar increase the bioavailability of phosphorus? **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 16, n. 2, p. 268–286, 2016.
- SMITH, C.R., HATCHER, P.G., KUMAR, S., LEE, J.W. Investigation into the Sources of Biochar Water-Soluble Organic Compounds and Their Potential Toxicity on Aquatic Microorganisms. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 4, n. 5, p. 2550–2558, 2016.
- 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**, XX 2016.
- TAN, Z., LIU, L., ZHANG, L., HUANG, Q. Mechanistic study of the influence of pyrolysis conditions on potassium speciation in biochar “preparation-application” process. **The Science of the Total Environment**, v. 599–600, p. 207–216, 2017.
- TIAN, S., TAN, Z., KASIULIENĖ, A., AI, P. Transformation mechanism of nutrient elements in the process of biochar preparation for returning biochar to soil. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 4, p. 477–486, 2017.
- TRIFUNOVIC, B., GONZALES, H.B., RAVI, S., SHARRATT, B.S., MOHANTY, S.K. Dynamic effects of biochar concentration and particle size on hydraulic properties of sand. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 4, p. 884–893, 1 abr. 2018.
- VAN RAIJ, B.; FEITOSA, C. T.; SILVA, N. M. DA. Comparação de quatro extratores de fósforo de solos. **Bragantia**, v. 43, n. 1, p. 17–19, 1984.
- WANG, X.; YOST, R. S.; LINQUIST, B. A. Soil aggregate size affects phosphorus desorption from highly weathered soils and plant growth. **Soil Science Society of America journal**, v. 65, n. 1, p. 139–146, 2001.
- WRIGHT, A. L. Phosphorus sequestration in soil aggregates after long-term tillage and cropping. **Soil and Tillage Research**, Contains papers from HighLand 2006: Land Degradation and Soil and Water Conservation in Tropical Highlands, Mekelle, Ethiopia, 21-25 September 2006. v. 103, n. 2, p. 406–411, 1 maio 2009.
- XU, G., ZHANG, Y., SHAO, H., SUN, J. Pyrolysis temperature affects phosphorus transformation in biochar: Chemical fractionation and ³¹P NMR analysis. **Science of The Total Environment**, v. 569–570, p. 65–72, 2016.
- 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.**, 19:1467-1476, 1988.

CAPÍTULO II

TEMPERATURAS DE PIRÓLISE, DOSES E GRANULOMETRIAS DE BIOCARVÕES DE PALHA DE CAFÉ: EFEITOS SOBRE A AGREGAÇÃO DO SOLO

RESUMO

A presença e a adição de materiais orgânicos carbonizados ao solo, denominados biocarvões, tem sido alvo de pesquisa nos últimos anos, tanto no que se diz respeito à avaliação de suas interações com a fração mineral do solo, quanto em sua participação nas alterações em atributos do solo. O efeito de agregação promovido por tais materiais se dá em função de fatores tais como material de origem, temperatura de produção, variação de doses aplicadas dentre outros. Porém, os efeitos sobre a agregação do solo têm sido raramente explorados, tomando o tamanho das partículas como um fator experimental. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos na agregação e estabilidade de agregados promovidos pela adição de doses crescentes de biocarvão de diferentes granulometrias, produzidos a partir de palha de café Conilon, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, após 119 dias de incubação. Foi utilizado um delineamento em blocos casualizados, com os tratamentos organizados no esquema fatorial (2 x 4 x 4) +1, com três repetições. Os fatores em estudo foram biocarvões de palha de café produzidos em duas temperaturas finais de pirólise (350 °C e 600 °C); quatro granulometrias desses biocarvões distintos (<0,25 mm; 0,25-0,5 mm; 0,5-1,0 mm; 1,0-2,0 mm); quatro doses dos biocarvões equivalentes a 10, 20, 40 e 80 t ha⁻¹; e um tratamento adicional sem adição de biocarvões. Após 119 dias de incubação, foram realizadas separações em via seca e úmida, e para ambos os métodos foram obtidos os índices de agregação diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), e também calculado o índice de estabilidade de agregados (IEA) para os macroagregados (>0,25 mm), obtidos por via seca e peneirados em via úmida. Os resultados experimentais mostraram que os valores de DMG e DMP são variáveis em função do tipo de separação de agregados e das características de cada tratamento. Verificou-se que o tamanho das partículas de biocarvões influencia nos valores dos índices obtidos. A estabilidade de agregados em via úmida é afetada pela granulometria dos biocarvões aplicados. A estabilidade de macroagregados na presença de água é afetada pelo tipo de biocarvão (tipo, segundo as

diferentes temperaturas para produção dos mesmos) e granulometria dos biocarvões. Quanto menor for o tamanho das partículas de biocarvão introduzidas haverá também uma ação mais abrangente dos efeitos em agregação para um maior número de classes de agregados.

Palavras-chave: Matéria orgânica. Estrutura do solo. Materiais orgânicos carbonizados.

ABSTRACT

The presence and addition of carbonized organic materials to the soil, called biocarbons, has been the subject of research in recent years, both with regard to the evaluation of their interactions with the mineral fraction of the soil, and in their participation in changes in attributes from soil. The aggregation effect promoted by such materials is due to factors such as source material, production temperature, variation of applied doses, among others. However, the effects on soil aggregation have rarely been explored, taking particle size as an experimental factor. The present work aimed to evaluate the effects on aggregation and stability of aggregates promoted by the addition of increasing doses of biochar of different granulometries, produced from conilon coffee straw, in a Red-Yellow Latosol, after 119 days of incubation. A randomized block design was used, with the treatments organized in a factorial scheme (2 x 4 x 4) +1, with three replications. The factors under study were coffee straw biocarbons produced in two final pyrolysis temperatures (350 °C and 600 °C); four particle sizes of these distinct biocarbons (<0.25 mm; 0.25-0.5 mm; 0.5-1.0 mm; 1.0-2.0 mm); four doses of biocarbons equivalent to 10, 20, 40 and 80 t ha⁻¹; and additional treatment without adding biocarbons. After 119 days of incubation, separations were performed in dry and wet way, and for both methods the aggregation indexes mean geometric diameter (DMG) and weighted mean diameter (DMP) were obtained, and the aggregate stability index (IEA) for macroaggregates (> 0.25 mm), obtained by dry process and sieved in a wet process. The experimental results showed that the values of DMG and DMP vary according to the type of separation of aggregates and the characteristics of each treatment. It was found that the particle size of biocarbons influences the values of the indexes obtained. The stability of wet aggregates is affected by the granulometry of the applied biocarbons. The stability of macroaggregates in the presence of water is affected by the type of biochar (type, according to the different temperatures for their production) and granulometry of the biochars. The smaller the size of the introduced biochar particles, there will also be a more comprehensive action of the effects on aggregation for a greater number of classes of aggregates.

Keywords: Organic matter. Soil structure. Carbonized organic materials.

1 INTRODUÇÃO

A literatura científica tem comunicado importantes informações sobre os efeitos promovidos pela presença e incorporação de materiais orgânicos carbonizados, mais comumente conhecidos pela denominação de biochars ou biocarvões, tanto com o intuito de entender melhor as interações destes materiais com a fração mineral do solo (GLASER et al., 2000; BRODOWSK et al., 2006; PRONK et al., 2012), quanto para verificar os efeitos que a adição desses materiais exercem sobre a estabilidade e agregação dos solos (BUSSCHER et al., 2010; AWAD et al., 2013; HERART et al., 2013; JIEN e WANG, 2013).

Além do efeito dessa associação sobre atributos e fenômenos relacionados à estrutura do solo tais como: a densidade e porosidade do solo, a resistência do solo à penetração e a dinâmica da água no solo (TRYON, 1948; LEHMANN & JOSEPH, 2009; NOVAK et al., 2009; PEREIRA et al., 2012; MUHKERJEE & LAL, 2013; ABEL et al., 2013).

Apesar do tamanho e formato das partículas de biocarvões serem fatores potencialmente capazes de afetar os atributos relacionados à estrutura do solo, tais como, a macro e microporosidade e a condutividade hidráulica (ESMAEELNEJAD et al., 2016, 2017; LIM; SPOKAS, 2018; LIU et al., 2017; TRIFUNOVIC et al., 2018), os efeitos sobre a agregação do solo têm sido raramente explorados, considerando o tamanho das partículas de biocarvão (ESMAEELNEJAD et al., 2016) e a temperatura de pirólise (PENG et al., 2011; HERATH; CAMPS-ARBESTAIN e HEDLEY, 2013; LEI e ZHANG, 2013), como fatores experimentais.

Trabalhos como os de Herart et al. (2013), Hua et al. (2014), Sun e Lu et al. (2014) geram algumas dúvidas quanto à formação de macro e microagregados em função do tamanho de biocarvões aplicados. Herart et al. (2013), por exemplo, após incubação de solo com biocarvões relatam a não formação de microagregados, onde os autores argumentam que tal formação é dificultada já que os biochars utilizados apresentaram uma predominância granulométrica mais grosseira (>5,0mm), o que dificultaria os mecanismos de interação entre as partículas de solo e o biocarvão.

Ganhos em microagregados são por sua vez relatados por Hua et al. (2014), após aplicação e incubação com biochars, cujo tamanho médio das partículas foram iguais a 0,063 mm. De forma semelhante, Sun e Lu et al. (2014) obtiveram resultados positivos na formação de macroagregados trabalhando com biocarvões cujas partículas

apresentavam tamanho médio entre 0,250 mm e 5,0 mm. Esmaeelnejad et al. (2016) exploram o fator granulometria utilizando dois níveis de classes granulométricas (1,0 – 2,0 mm e < 1,0 mm) em uma única dose de biocarvão 20 t ha⁻¹, obtendo efeitos em agregação e estabilidade de macroagregados.

Assim, explorar mais detalhadamente o fator granulometria de biocarvões associado a diferentes massas adicionadas das classes granulométricas sobre a agregação do solo pode expor importantes conclusões sobre os reais efeitos na formação e estabilidade de agregados. Diante do exposto, o presente trabalho objetivou avaliar os efeitos na agregação e estabilidade de agregados, promovidos pela adição de doses crescentes de biocarvão de diferentes granulometrias e obtidos em duas temperaturas de pirólise, produzidos a partir de palha de café conilon, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, após 119 dias de incubação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delineamento experimental

O experimento foi realizado no Laboratório de Solos do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, Campus de Alegre, sob delineamento experimental em blocos casualizados em ambiente controlado com temperatura de ± 25 °C, durante um período de 119 dias. Para tanto, o ensaio experimental foi disposto em esquema fatorial (2 x 4 x 4) +1, com três repetições para cada tratamento. Os fatores em estudo foram: biocarvões de palha de café produzidos em duas temperaturas finais de pirólise (350 e 600 °C); quatro doses de biocarvão (10, 20, 40 e 80 t/ha); quatro granulometrias de biocarvão (2,0-1,0 mm; 1,0-0,5 mm; 0,5-0,25 mm e < 0,250 mm); e um tratamento adicional sem adição de biocarvão.

2.2 Produção e preparo dos biocarvões

Para produção dos biocarvões foi utilizada palha de café conilon (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner), composta pela casca, pergaminho e grãos perdidos, durante o beneficiamento dos frutos realizado no Instituto Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre-ES. O resíduo foi seco ao ar até apresentar umidade entre 11 % e 12 %.

A palha de café foi então submetida ao processo de pirólise lenta em duas temperaturas (350 e 600 °C), com tempo de permanência de 60 min. A pirólise foi conduzida por um reator metálico do modelo SPPT-V60, com taxa de aquecimento de 12°C min⁻¹. Após o término do processo de pirólise, o biocarvão permaneceu no reator até que o mesmo atingisse a temperatura ambiente. Foram coletadas amostras dos biocarvões para caracterização elementar (Tabela 8) e teores totais de macronutrientes (Tabela 9).

Tabela 8 - Teores elementares C, H, N e O e relações C/N, H/C e O/C dos biocarvões de palha de café, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 °C e 600 °C)

Biochar	Teor elementar (%)				C/N	H/C	O/C
	C	H	N	O			
350 °C	59,87	4,57	2,54	33,02	23,57	0,08	0,55
600 °C	76,66	2,17	2,44	18,73	31,42	0,03	0,24

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

Tabela 9 – Teores totais de macro e micronutrientes¹ presentes nos biocarvões de palha de café, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 e 600 °C)

Nutriente	350 °C	600 °C
		----- dag/kg -----
P	0,20	0,30
K	4,46	5,66
Ca	1,67	2,32
Mg	0,32	0,42
S	0,22	0,32
	----- mg/kg -----	
Cu	23,70	36,35
Fe	451,55	724,75
Zn	12,20	17,20
Mn	109,65	151,80
B	81,92	109,36

¹Obtidos por digestão nitroperclórica (EMBRAPA, 1997).

O material foi levemente macerado com o intuito de facilitar a passagem pelo conjunto de peneiras, bem como aumentar o rendimento dos intervalos granulométricos. A separação foi feita em um conjunto de peneiras de malhas distintas (2 mm; 1mm; 0,5 mm; 0,25 mm) que foram acopladas em um aparelho do tipo mesa vibratória Produstest para obtenção das seguintes granulométricas: 2,0 - 1,0; 1,0 - 0,5; 0,5-0,25; e < 0,25 mm. Após colocadas as quantidades de biocarvão no topo do conjunto de peneiras, o aparelho

era fechado e a massa do material peneirada, agitando-se o conjunto de peneiras, com cada amostra, durante 5 min, na graduação nº 5 do aparelho.

2.3 Solo utilizado

Coletaram-se amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo na profundidade de 0-20 cm, localizada no município de Alegre, Espírito Santo. O solo foi seco ao ar e passado em peneira de 2,0 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), retirando-se uma amostra para caracterização química e física (Tabelas 10 e 11).

Tabela 10 - Caracterização física¹ do solo

Areia	Silte	Argila
-----g/kg-----		
170,0	60,0	770,0

¹Silte e argila: Método da pipeta -agitação lenta

Tabela 11 - Caracterização química¹ do solo

pH H ₂ O	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	T	M.O.
	-----mg/dm-----			-----cmol _c /dm ³ -----				gkg ⁻¹	
6,44	15,59	8,00	4,00	0,83	0,81	0,00	1,81	3,50	11,43

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) (EMBRAPA, 1997) e M.O: Matéria orgânica (Yeomans&Bremmer, 1988).

2.4 Montagem e Condução do Experimento

Para cada parcela experimental foram pesados 200 g de TFSA e a massa equivalente para as respectivas doses de biocarvões (10, 20, 40 e 80 t ha⁻¹). Ambos materiais foram misturados, homogeneizados e posteriormente acondicionados em potes plásticos abertos. Em seguida, adicionou-se água purificada por osmose reversa em teor equivalente à retenção de água a um potencial de -20 kPa, previamente determinados para cada tratamento em extrator de placa porosa. A Tabela 12 traz a quantidade de água correspondente a -20 kPa para cada tratamento.

Tabela 12 – Conteúdo de água em base gravimétrica, em kg kg⁻¹, retida nos tratamentos sob potencial equivalente a -20 kPa

Dose (t/ha)	Granulometria do biocarvão			
	<0,250 mm	0,250 - 0,5 mm	0,5 - 1,0 mm	1,0 - 2,0 mm
	----- 350 °C -----			
0			0,4871	
10	0,4310	0,4349	0,4809	0,4581
20	0,4556	0,4558	0,4655	0,4581
40	0,4555	0,4686	0,4479	0,4872
80	0,4875	0,4932	0,4642	0,4828
	----- 600 °C -----			
0			0,4871	
10	0,4653	0,4899	0,4628	0,4634
20	0,4320	0,5154	0,4535	0,5090
40	0,4693	0,5121	0,4762	0,5106
80	0,5136	0,4772	0,4985	0,4997

As parcelas experimentais permaneceram abertas para permitir a perda de água por evaporação. A cada 7 dias a massa de água perdida foi repostada por meio da aplicação de água equivalente à perda de água verificada via pesagem em balança de precisão. A condução do experimento durou 119 dias, tendo sido completos 17 ciclos de umedecimento e secagem.

Após os 119 dias, cessou-se a reposição de água. Aguardou-se que as amostras secassem ao ar para seguir-se com as determinações experimentais.

2.5 Determinações experimentais

Após o período de incubação e a secagem ao ar, as amostras foram levemente fragmentadas em torrões menores para que fossem levadas a um conjunto de peneiras em um vibrador Produtest e então submetidas à separação em via seca.

Após as separações, foram obtidas 6 classes granulométricas de agregados, sendo: 4,0 – 2,0 mm, 2,0 – 1,0 mm, 1,0 – 0,5 mm, 0,5 – 0,25 mm, 0,250 – 0,106 mm, <0,106 mm. A partir das classes de agregados obtidas foram determinados os índices de agregação: diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), através das seguintes equações:

$$\text{DMG} = 10^{\sum_{i=1}^n x_i \log d_i} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{DMP} = \sum_{i=1}^n x_i d_i \quad \text{Eq. 2}$$

em que,

x_i = quociente da massa de agregados (g) retidos na peneira i sobre a massa total (g); e

d_i = diâmetro médio da fração (mm).

O outro método indireto de avaliação da estabilidade dos agregados utilizado foi o peneiramento por via úmida, ou estabilidade de agregados em via úmida. Para esta análise, foram utilizados um total de 25 g de agregados, utilizando-se para tal os agregados retidos previamente nas peneiras de 1,0 mm; 0,5 mm e 0,250 mm após a separação via seca.

A massa de 25 g de agregados foi obtida, levando-se em consideração o peso ponderado de cada classe dos agregados (2,0 - 1,0 mm; 1,0 - 0,5 mm e 0,5 - 0,250 mm) em relação ao somatório total da massa destas mesmas três classes. As amostras foram pré-umedecidas, seguindo as recomendações de umedecimento lento, descritas por Kemper & Rosenau (1986), e mantidas em repouso sob temperatura ambiente, por 30 min, para permitir a penetração lenta de água nos agregados de modo a minimizar a destruição dos mesmos pela rápida expulsão do ar, quando imerso na água.

Na sequência, a amostra pré-umedecida foi colocada em um aparelho de oscilação vertical sobre um conjunto de peneiras de 1,0 mm; 0,5 mm; 0,25 mm e 0,106 mm de diâmetro, conforme descrito por Yoder (1936). Transcorridos 15 min de oscilação a 32 rotações por minuto, as amostras retidas em cada peneira foram transferidas para cápsulas de alumínio com o auxílio de jatos de água, as quais foram secas em estufa a 105 °C, por um período de 48 h, para posterior pesagem. A partir dos valores das massas obtidos para cada classe foram novamente calculados os índices de agregação: DMP e DMG.

A partir dos índices de agregação citados acima, foi possível determinar um novo índice que demonstra a estabilidade dos agregados formados quando levados a água. O índice de estabilidade de agregados em água (IEA) foi calculado com base na sugerida por Da Silva & Mielniczuk (1997), que originalmente utilizaram os valores de DMP. No presente trabalho, porém, para obtenção do IEA foram utilizados os valores de DMG,

visto que os mesmos estimam melhor o diâmetro médio dos agregados. Sendo assim, foi adaptada a seguinte equação (Equação 3):

$$\text{IEA} = \frac{\text{DMG (via úmida)}}{\text{DMG (Via seca)}} \quad \text{Eq. 3}$$

Para realizar os cálculos do DMG, obtidos por peneiramento em via úmida, aplicado à Equação 3, foram utilizados os dados de massa de todas as classes de agregados obtidas (2,0 – 1,0 mm; 1,0 - 0,5 mm; 0,5 - 0,25 mm; 0,25 - 0,106 mm e menor que 0,106 mm) após o peneiramento no agitador de Yoder. Já para os valores de DMG, obtidos por separação via seca e utilizados na Equação 3, foi realizado um novo cálculo, desta vez utilizando apenas as classes de agregados de diâmetro entre 2,0 – 1,0 mm; 1,0 - 0,5 mm; 0,5 - 0,25 mm. Tal procedimento foi realizado levando em consideração que para a separação por via úmida foram utilizadas estas mesmas classes de agregados para compor as amostras de 25 g que passaram pelo aparelho de Yoder. Ou seja, o IEA aqui avaliado refere-se à estabilidade dos macroagregados (2,0 – 1,0 mm; 1,0 - 0,5 mm; 0,5 - 0,25 mm) obtidos, primeiramente, durante a separação via seca e então submetidos ao peneiramento por via úmida.

2.6 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Para as avaliações do efeito de temperatura sobre os diâmetros médios foram observadas as significâncias do teste F. Foram ainda testados ajustes dos modelos de regressão em função das doses de biocarvão para cada combinação de granulometria e tipo de biocarvão. Os modelos foram escolhidos com base nas avaliações do comportamento gráfico das variáveis, da soma dos quadrados dos modelos completos, do coeficiente de determinação (R^2) e significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste t de Student. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados em Ambiente R (R CORE TEAM, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Distribuição das classes de agregados por tamanho

Nas Figuras 9, 10, 11 e 12 percebe-se que, independente da dose e temperatura de pirólise, do método de separação dos agregados (via seca ou via úmida), houve uma predominância de massa na classe de agregados de 1,0 - 0,5 mm, na maior parte dos tratamentos. Ainda nota-se que, para as distribuições de agregados após as separações em via úmida, há uma maior semelhança nos teores de agregados entre as classes de agregados 2,0 - 1,0 mm e 1,0 - 0,5 mm, e 0,5 - 0,25 mm, nos tratamentos que utilizaram biocarvões produzidos a 350 °C das três maiores granulometrias (Figura 12).

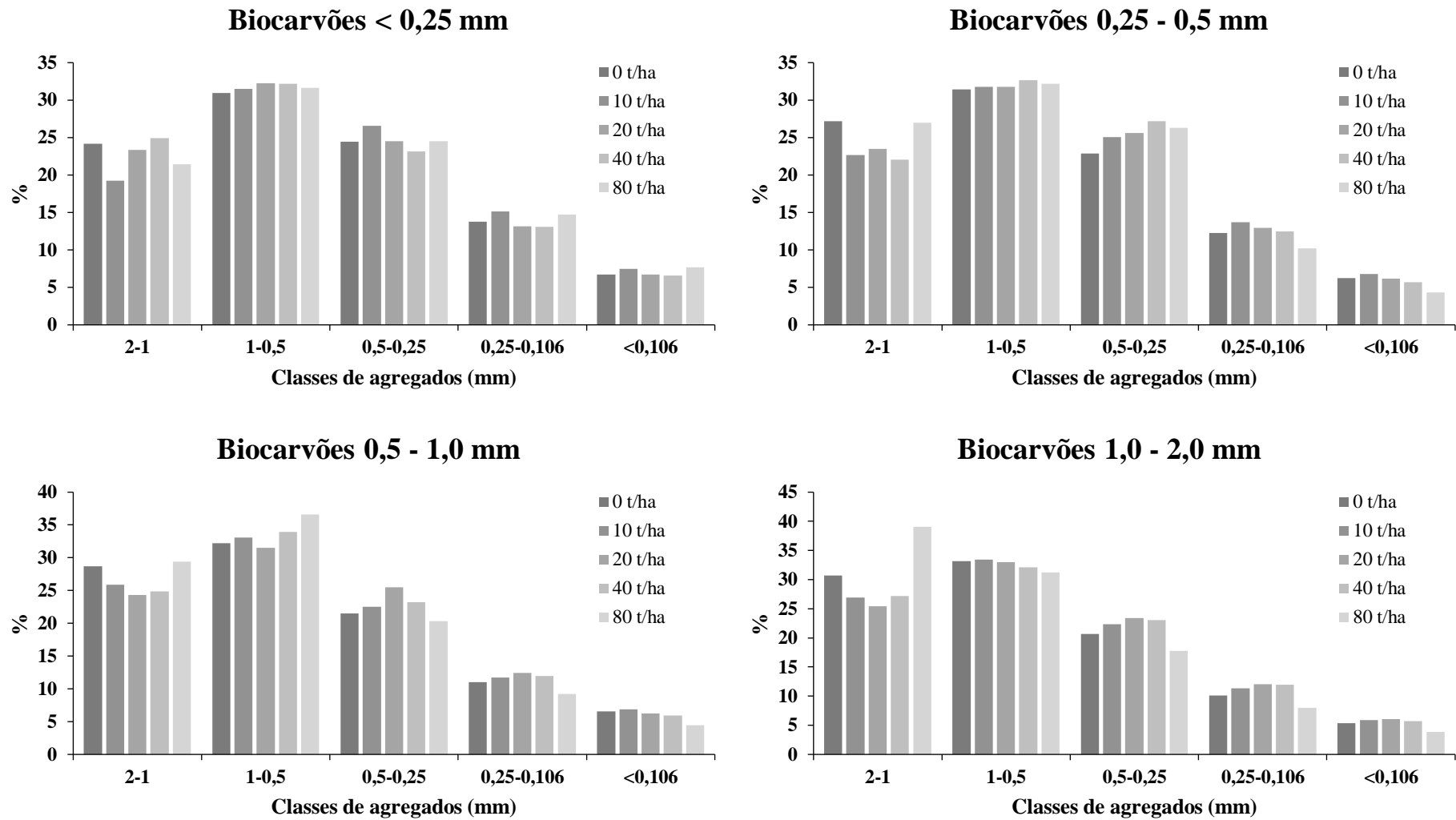


Figura 9 - Distribuição das classes de agregados, obtidas por separação via seca, em função de diferentes doses e granulometrias de biocarvões produzidos a 350 °C

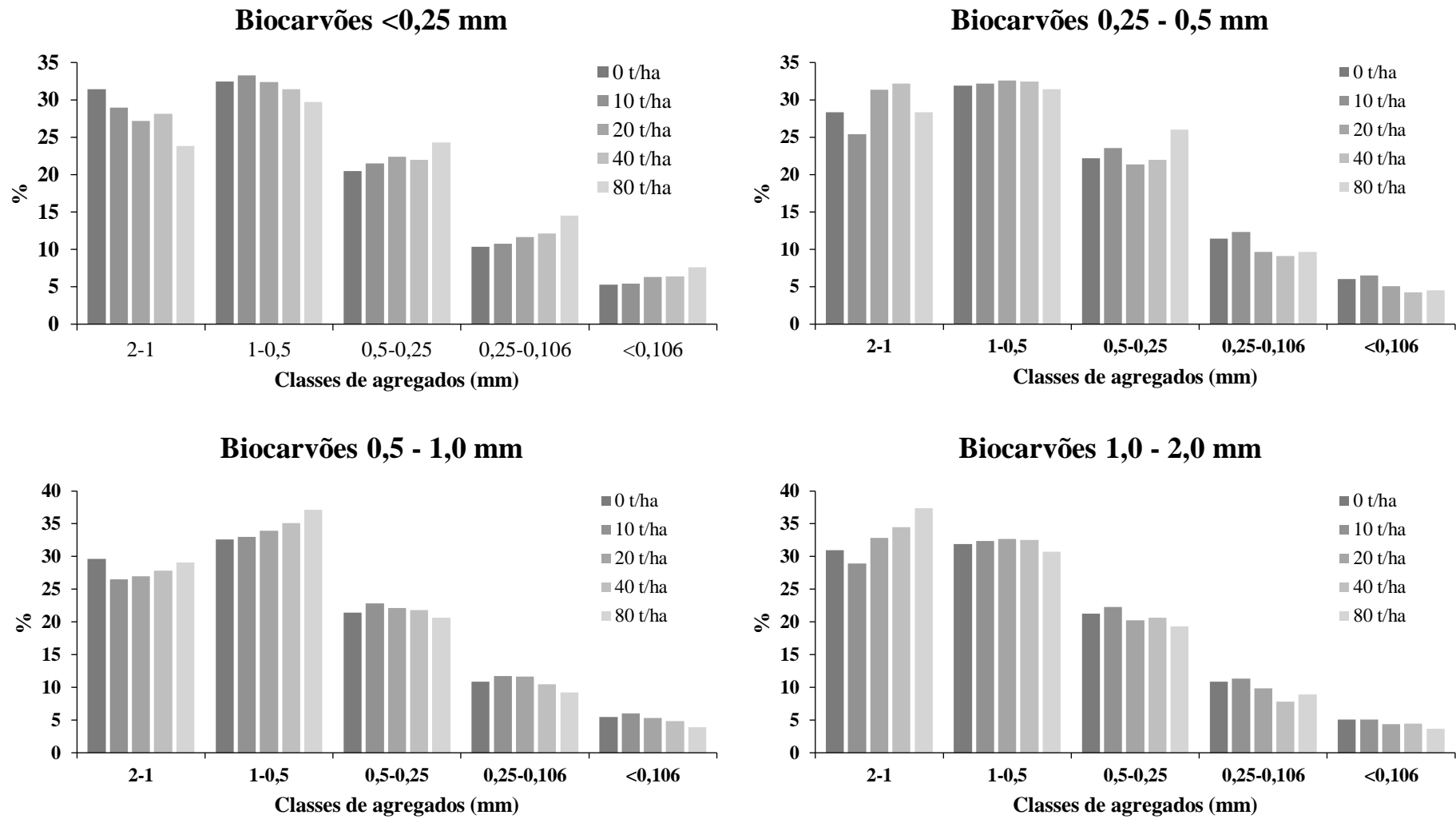


Figura 10 - Distribuição das classes de agregados, obtidas por separação via seca, em função de diferentes doses e granulometrias de biocarvões produzidos a 600 °C

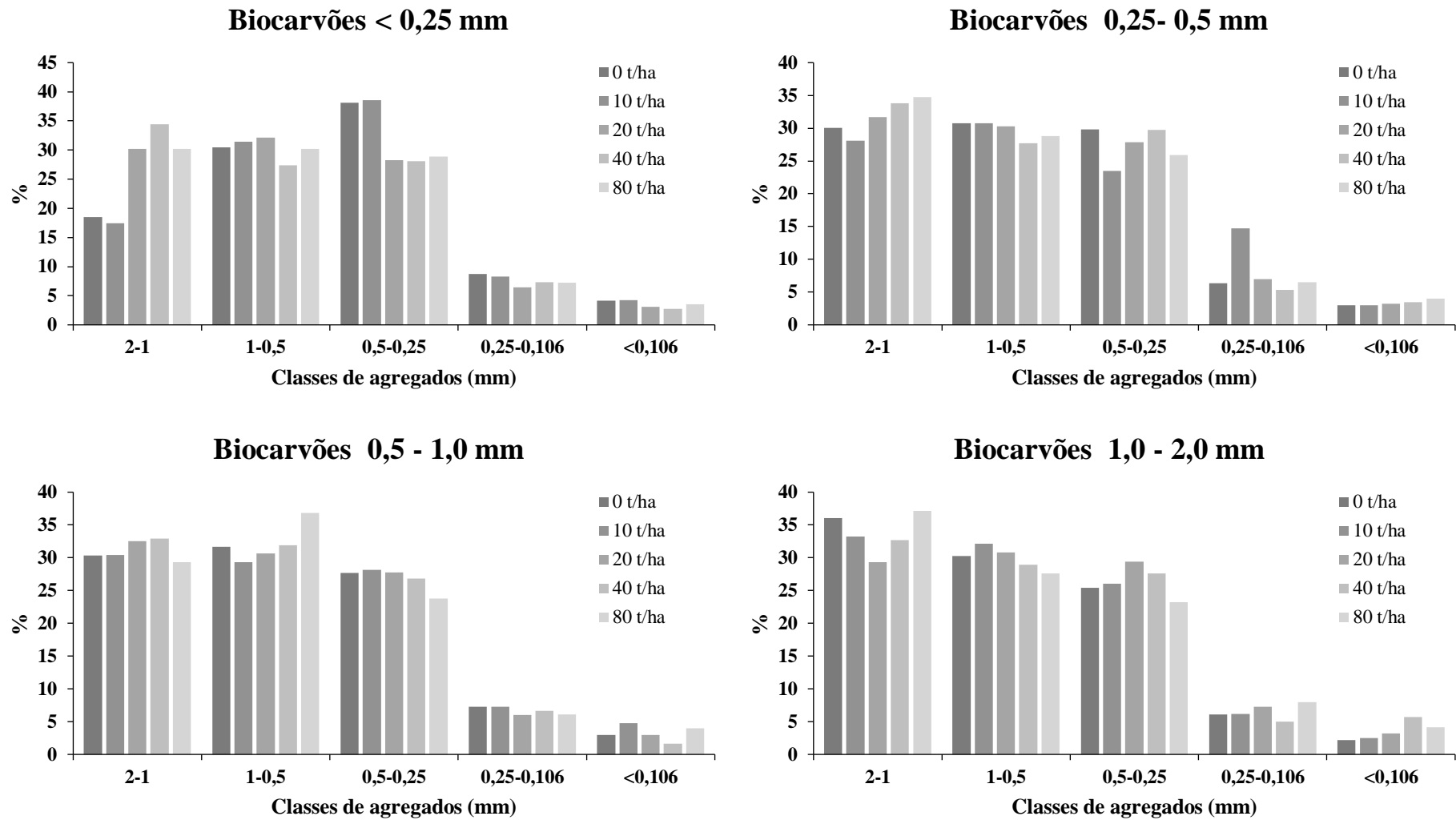


Figura 11 - Distribuição das classes de agregados, obtidas por separação via úmida, em função de diferentes doses e granulometrias de biocarvões produzidos a 350 °C

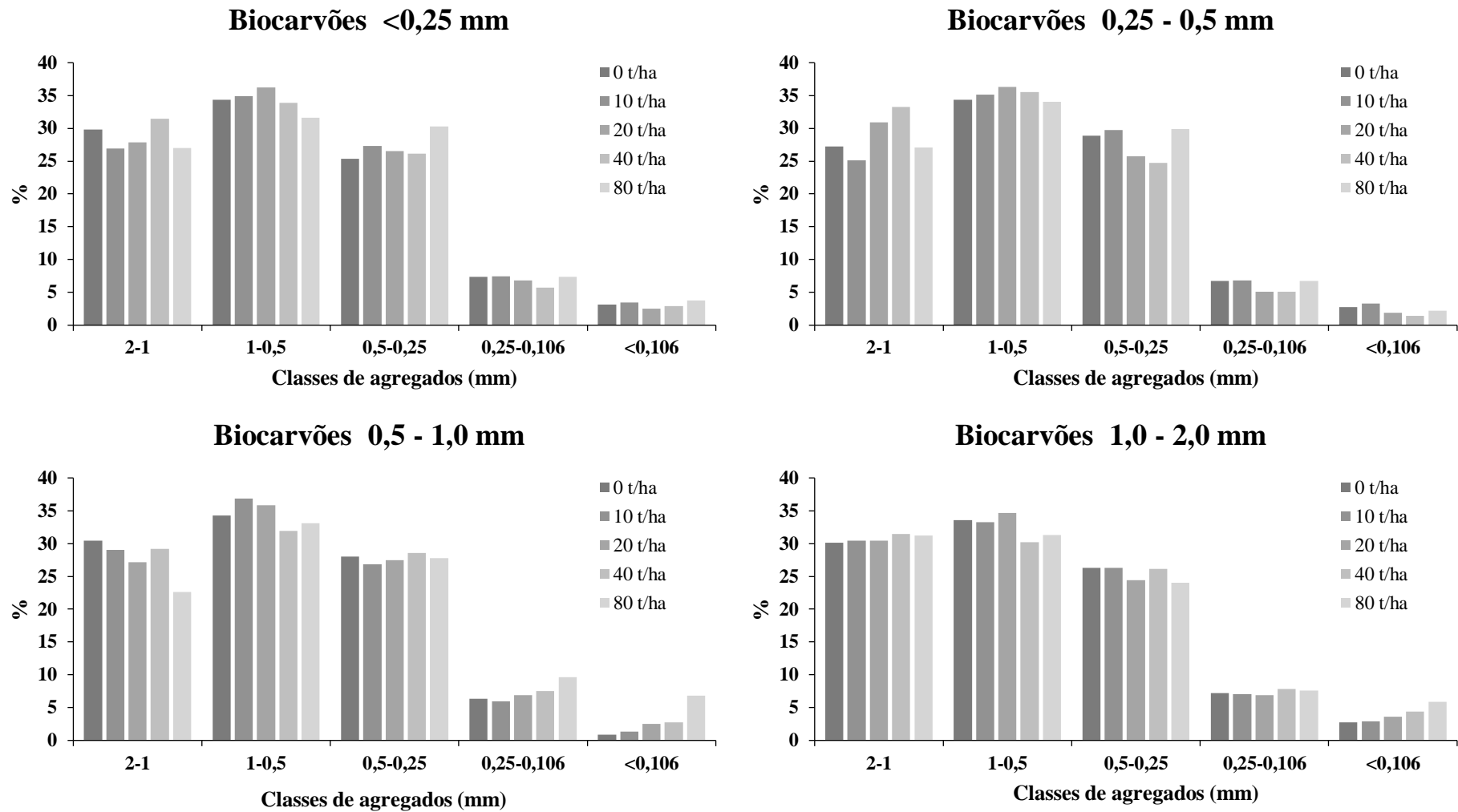


Figura 12 - Distribuição das classes de agregados, obtidas por separação via úmida, em função de diferentes doses e granulometrias de biocarvões produzidos a 600 °C

3.2 Diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado obtidos por separações via seca e via úmida

Após realizadas as separações dos agregados nos conjuntos de peneiras, em via seca e via úmida, foram obtidos os índices de agregação diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) para os tratamentos (Tabelas 13 e 14).

Tabela 13 - Valores médios dos índices DMG e DMP, obtidos a partir das separações em via seca, considerando as diferentes doses de biocarvões, os intervalos granulométricos de biocarvões utilizados e as temperaturas de pirólise

Dose (t/ha)	----- DMG (mm)-----			
	1,0 - 2,0 mm	0,5 - 1,0 mm	0,25 - 0,5 mm	<0,25 mm
	----- 350 °C -----			
0			0,602	
10	0,564	0,543	0,506	0,470
20	0,545	0,527	0,521	0,516
40	0,559	0,546	0,522	0,528
80	0,700	0,621	0,582	0,485
	----- 600 °C -----			
0			0,602	
10	0,584	0,555	0,536	0,585
20	0,633	0,57	0,612	0,555
40	0,656	0,592	0,632	0,555
80	0,679	0,627	0,590	0,496
	----- DMP (mm) -----			
	1,0 - 2,0 mm	0,5 - 1,0 mm	0,25 - 0,5 mm	<0,25 mm
	----- 350 °C -----			
0			0,800	
10	0,763	0,745	0,700	0,656
20	0,742	0,722	0,713	0,711
40	0,759	0,740	0,702	0,729
80	0,903	0,810	0,765	0,681
	----- 600 °C -----			
0			0,800	
10	0,783	0,754	0,737	0,787
20	0,833	0,766	0,814	0,759
40	0,856	0,783	0,827	0,765
80	0,881	0,810	0,778	0,702

Tabela 14 - Valores médios dos índices DMG e DMP, obtidos a partir das separações em via úmida, considerando as diferentes doses de biocarvões, os intervalos granulométricos de biocarvões utilizados e as temperaturas de pirólise

----- DMG (mm) -----				
	1,0 - 2,0 mm	0,5 - 1,0 mm	0,25 - 0,5 mm	<0,25 mm
Dose (t/ha)	----- 350 °C -----			
0	0,626			
10	0,677	0,605	0,581	0,523
20	0,622	0,657	0,640	0,639
40	0,623	0,682	0,654	0,656
80	0,661	0,643	0,653	0,622
	----- 600 °C -----			
0	0,626			
10	0,646	0,674	0,605	0,614
20	0,644	0,634	0,687	0,644
40	0,620	0,629	0,713	0,664
80	0,606	0,527	0,630	0,597
----- DMP (mm) -----				
	1,0 - 2,0 mm	0,5 - 1,0 mm	0,25 - 0,5 mm	<0,25 mm
Dose (t/ha)	----- 350 °C -----			
0	0,807			
10	0,849	0,798	0,768	0,659
20	0,796	0,835	0,821	0,812
40	0,823	0,847	0,837	0,841
80	0,867	0,818	0,848	0,802
	----- 600 °C -----			
0	0,807			
10	0,819	0,823	0,765	0,783
20	0,822	0,793	0,843	0,803
40	0,813	0,800	0,868	0,835
80	0,810	0,713	0,787	0,770

Os valores obtidos para o DMP variaram de 0,659 a 0,868 mm nas separações via seca e 0,656 a 0,903 mm nas separações via úmida, e, de forma geral, foram maiores do que os valores obtidos para o DMG, que por sua vez variaram de 0,523 a 0,713 mm nas separações via seca e 0,470 a 0,700 mm nas separações via úmida (Tabelas 13 e 14).

Tais comportamentos condizem com as observações de Castro Filho et al. (1998), de que o DMP aumenta à medida que a maior classe de agregados aumenta, enquanto o DMG estima o tamanho da classe de agregados de maior ocorrência.

Além disso, os valores obtidos para os índices de agregação foram maiores nas separações de agregados por via úmida, quando comparados às separações por via seca. Isso se dá pelo fato de que para as análises em via úmida foram produzidas amostras a partir de agregados maiores que 0,25 mm, inicialmente separados pelo método via seca, o que pode ter favorecido a ocorrência dos maiores valores de DMP e DMG pelo método via úmida, em relação ao método via seca.

É possível perceber que os índices de agregação foram ora maiores e ora menores no tratamento que não recebeu biocarvão (testemunha), quando comparados aos tratamentos que receberam as doses de biocarvões.

Além do efeito potencial da agregação nos tratamentos sob doses de biocarvões, este comportamento variável entre a testemunha e as doses de biocarvões, se justifica pelo somatório de dois outros fatos: (i) as testemunhas não tiveram seu percentual de massa de solo reduzido pela adição de biocarvão; e conseqüentemente, (ii) a distribuição inicial das classes de partículas presentes, sejam elas partículas individuais ou agregados, não é inicialmente alterada pela massa adicionada de específicas classes de tamanho de partículas, onde, por exemplo, a massa de biocarvões de menores que 0,25 mm afetaria a distribuição de classes de partículas da mistura solo + biocarvão elevando o percentual de partículas <0,25 mm.

Ao se compararem os diâmetros médios (DMG e DMP), segundo as temperaturas de pirólise dos biocarvões, observa-se que houve diferença estatística, segundo teste F, para agregados separados por via seca onde os agregados sob biocarvões de 600 °C proporcionaram maiores valores de DMG e DMP, enquanto para as separações por via úmida não foram observadas diferenças significativas entre as temperaturas testadas (Figuras 13 e 14).

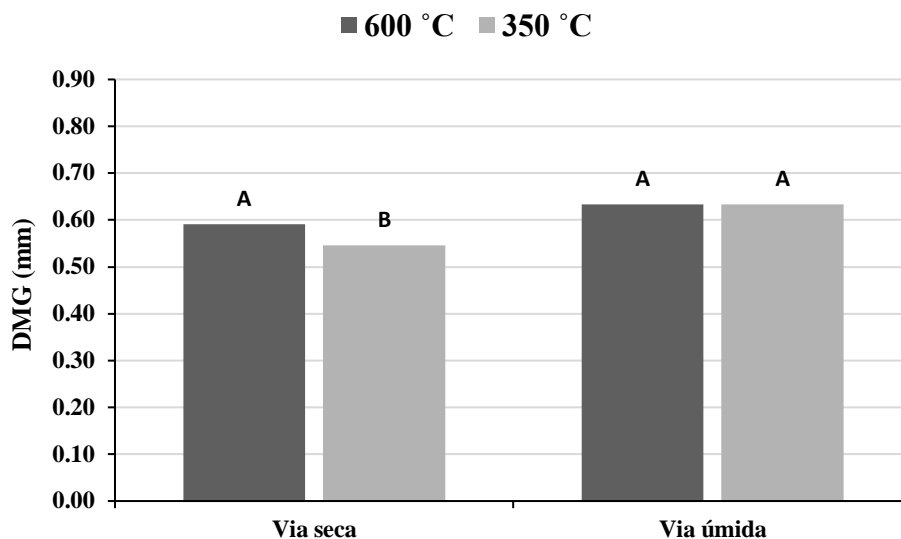


Figura 13 – Diâmetro Médio Geométrico (DMG) dos agregados nas diferentes separações, em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes entre classes de agregados indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,001$)

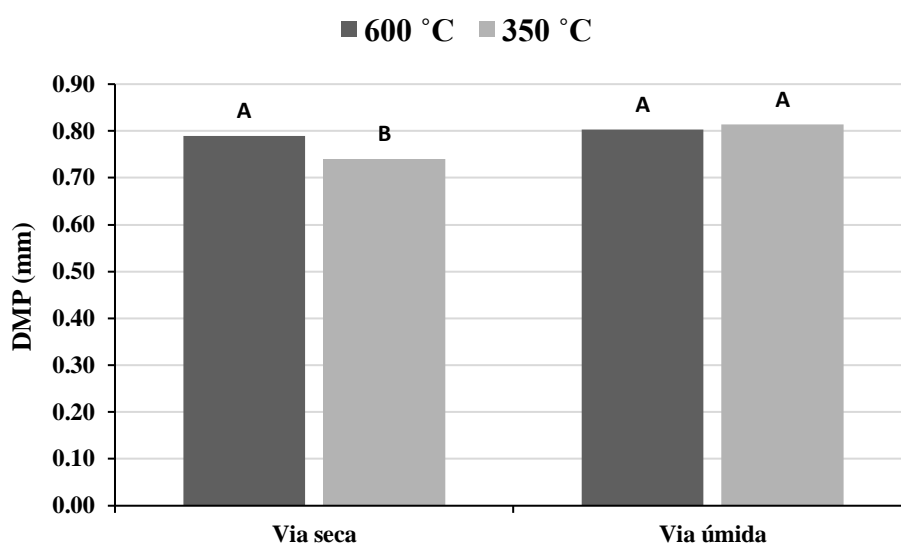


Figura 14 – Diâmetro Médio Ponderado (DMP) dos agregados nas diferentes separações, em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes entre classes de agregados indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,001$)

Um exame mais detalhado dos fatores em estudo é necessário. A exemplo disto há o tempo de incubação aplicado ao experimento, que pode não ter sido suficiente para desenvolver efeitos evidentes ou mais pronunciados na formação de agregados. Ressalta-se ainda que efeitos de redução ou aumento nos valores de DMG e DMP com o aumento das doses de biocarvões podem estar associados à presença de partículas de biocarvões

individualizadas, ou seja, partículas de biocarvões que não se associaram a outras partículas para formação de agregados maiores, o que induzem a um acúmulo destas partículas individuais nas respectivas peneiras, de cada tipo de classe granulométrica dos biocarvões aplicados, que definem o seu limite inferior de tamanho.

Assim, por exemplo, um excesso de partículas individualizadas de dimensões menores que 0,25 mm, tendem a se acumular nas classes de agregados menores que 0,25 mm e, portanto, induzem à redução dos valores de DMG e DMP, à proporção que as doses aplicadas, deste tipo de partícula, forem maiores. Tal efeito pode ser facilmente observado para os tratamentos que receberam biocarvões menores que 0,25 mm de 600 °C, após a separação por via seca (Figuras 15 e 16).

Por outro lado, quanto maiores forem as partículas de biocarvões aplicadas, maior é a probabilidade do efeito individual da massa destas partículas elevarem os valores de DMG e DMP. Além disso, caso tais partículas induzam efeitos em desenvolvimento de agregados, tais efeitos podem ser graficamente omitidos, caso os diâmetros médios dos agregados não ultrapassem o limite superior de tamanho destas partículas individuais.

Efeitos em agregação, via aumento dos valores de DMG, podem ser observados para os tratamentos que receberam doses de até 40 t ha⁻¹ de biocarvões menores que 0,25 mm produzidos a 350 °C e os que receberam biocarvões de 0,25-0,5 mm produzidos a 600 °C, ambos apresentando um efeito quadrático com queda dos valores de DMG na dose de 80 t ha⁻¹. Um efeito linear, onde o aumento das doses de biocarvões foi acompanhado de maiores índices de DMG, até a dose de 80 t ha⁻¹, pode ser observado segundo a aplicação de biocarvões de 0,25-0,5 mm produzidos a 350°C. (Figura 15). As eventuais quedas dos valores de DMG para doses de 80 t ha⁻¹ podem ser um reflexo do excesso de material fino de biocarvão aplicado, associado também ao curto tempo de incubação, podendo este último ser insuficiente para que as partículas individuais se liguem a outras partículas, sejam elas biocarvões ou sólidos do solo, e formem agregados estáveis e maiores, e portanto um contínuo efeito de maior agregação para maiores doses.

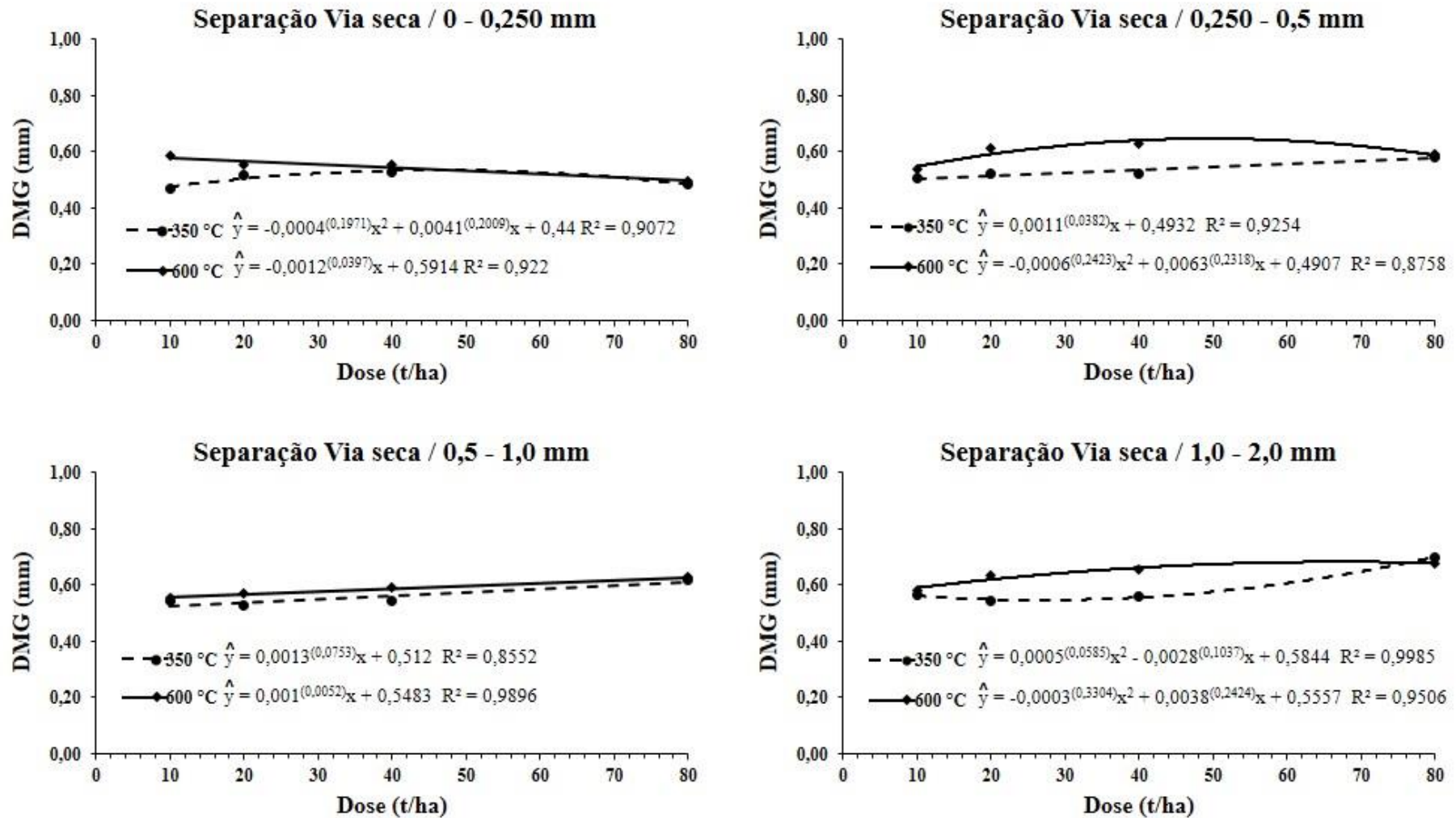


Figura 15 – Diâmetro Médio Geométrico (DMG) dos agregados obtidos em separação via seca, em função das doses de biocarvão em diferentes granulometrias. Valores sobrescritos entre parênteses correspondem à significância para os coeficientes, obtidas pelo teste t

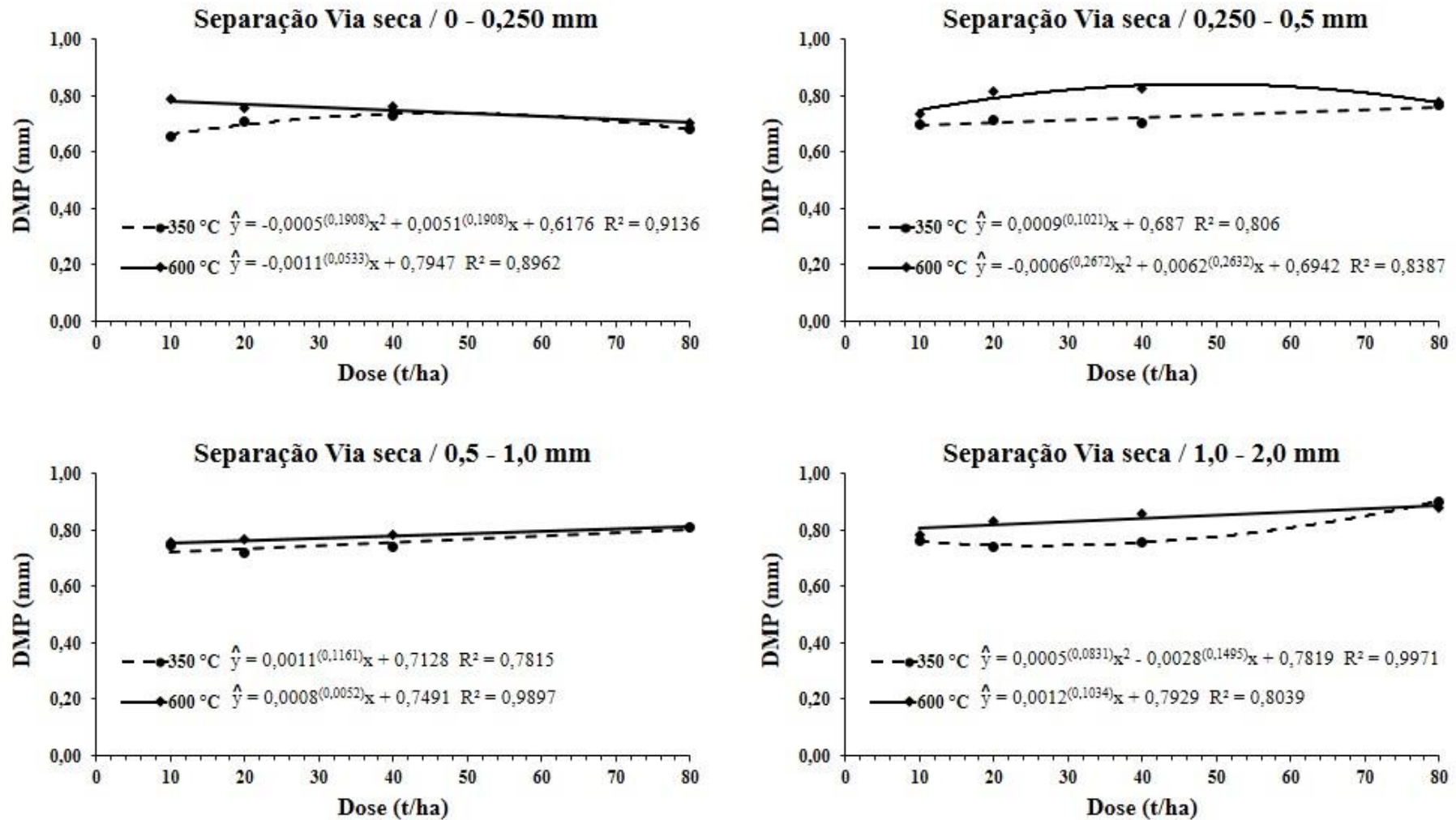


Figura 16 – Diâmetro Médio Ponderado (DMP) dos agregados obtidos em separação via seca em função das doses de biocarvão em diferentes granulometrias. Valores sobrescritos entre parênteses correspondem à significância para os coeficientes, obtidas pelo teste t

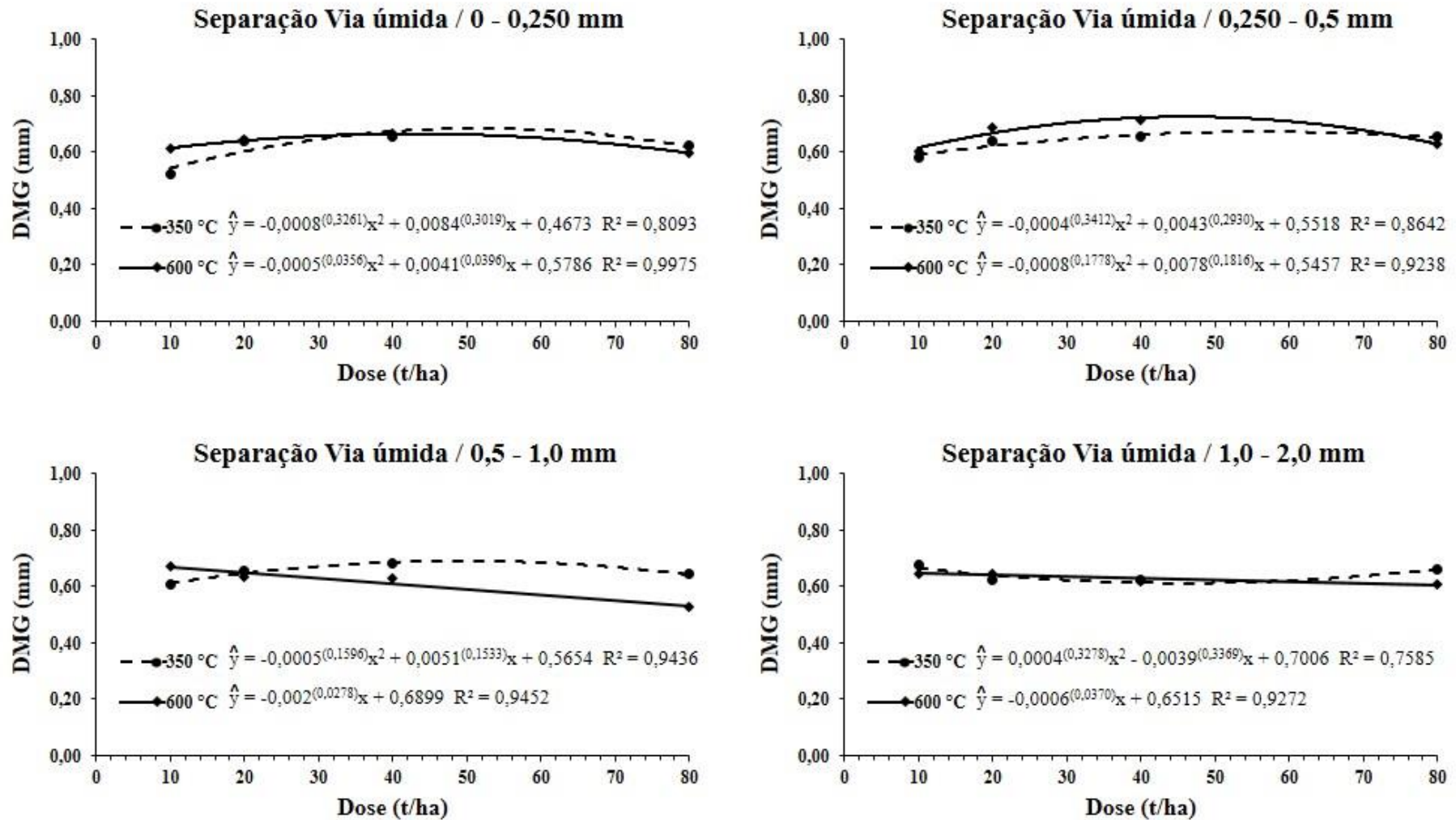


Figura 17 – Diâmetro Médio Geométrico (DMG) dos agregados obtidos em separação via úmida, em função das doses de biocarvão em diferentes granulometrias. Valores sobrescritos entre parênteses correspondem à significância para os coeficientes, obtidas pelo teste t

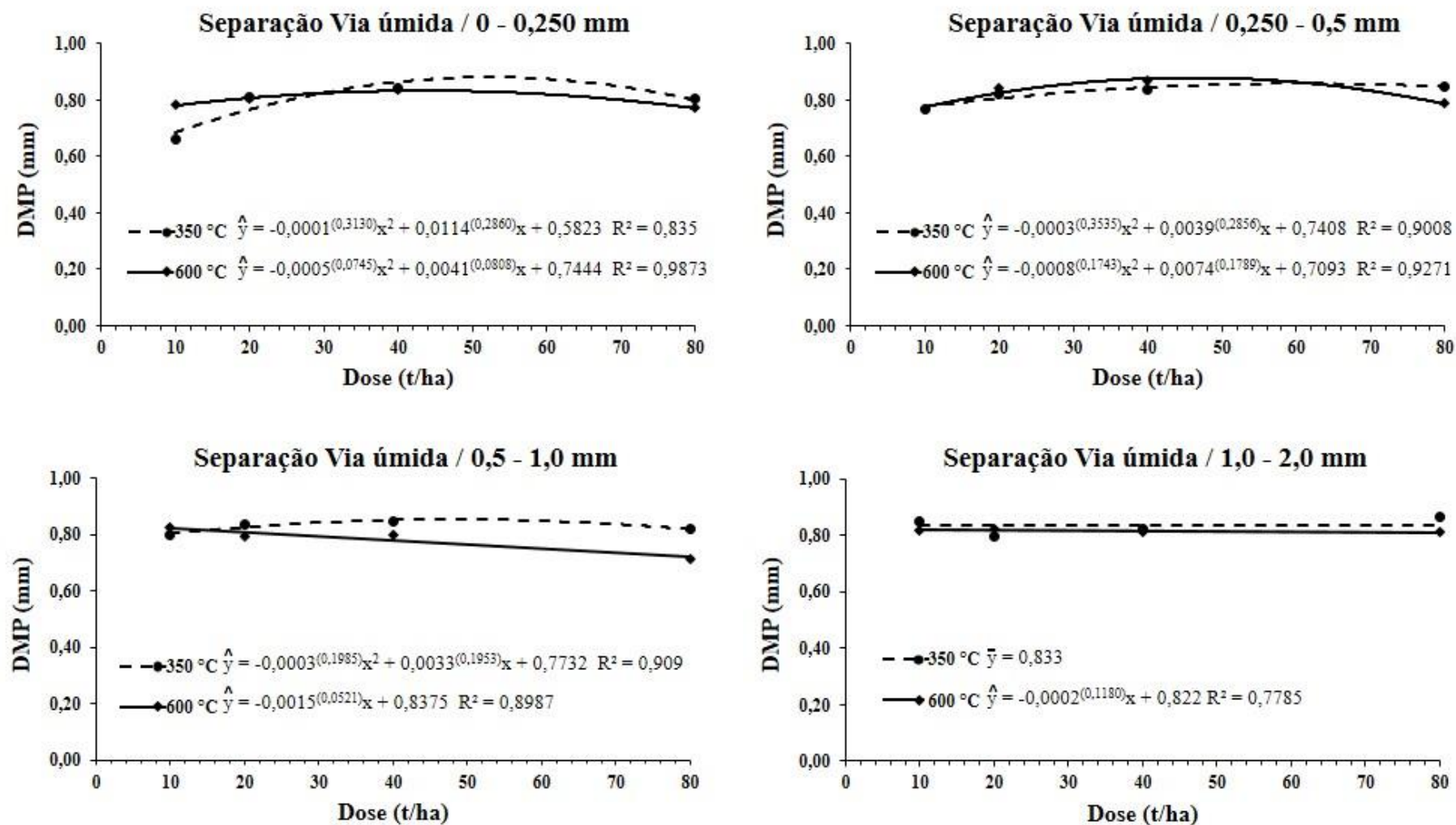


Figura 18 – Diâmetro Médio Ponderado (DMP) dos agregados obtidos em separação via úmida em função das doses de biocarvão em diferentes granulometrias. Valores sobrescritos entre parênteses correspondem à significância para os coeficientes, obtidas pelo teste t

Para as avaliações dos efeitos em agregação em separação por via úmida deve-se destacar que foram preparadas amostras a partir das classes de agregados entre 2,0 – 1,0 mm; 1,0 - 0,5 mm e 0,5 - 0,25 mm. Tal fato implica, por exemplo, que há uma menor probabilidade de haver partículas individualizadas nos agregados dos tratamentos que receberam biocarvões menores que 0,25 mm, já que se espera que as partículas de biocarvão individualizadas tenham passado pela peneira de 0,25 mm durante o peneiramento via seca.

Mais uma vez, o efeito quadrático dos coeficientes quadráticos negativos (Figuras 17 e 18) indica que biocarvões menores que 0,25 mm promovem maior agregação com maiores doses e a redução dos valores de DMG e DMP para a dose mais elevada (80 t ha^{-1}) pode ser resultante da quebra de agregados que no peneiramento via seca formaram agregados estáveis, contudo perderam estabilidade quando separados em via úmida e, conseqüentemente, suas massas foram contabilizadas nas classe de agregados menores.

As observações acima podem ser mantidas para os tratamentos que receberam biocarvões com granulometria maior que 0,25 mm, cujos ajustes de regressão quadráticos foram semelhantes. Contudo, para estes casos (especialmente 0,25-0,5mm de $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 0,5-1 mm de $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$) (Figuras 17 e 18) há a probabilidade, de também, ocorrerem partículas individuais.

Caso especial também pode ser explorado para os tratamentos que receberam biocarvões de 0,5-1,0 mm e de 1-2 mm de $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$, já que com os aumentos das doses desses biocarvões houve uma redução dos valores de DMG e DMP (Figuras 17 e 18) (efeito linear de coeficiente angular negativo), após as separações por via úmida.

A primeira consideração é a de que estes biocarvões tendem a uma menor reatividade de sua estrutura orgânica em função da produção em alta temperatura, levando a uma redução da presença de grupos funcionais de superfície capazes de gerar cargas (BANIK et al., 2018), somado ainda à menor área superficial específica em função da maior dimensão das partículas, reduzindo assim o poder de associação com outras partículas.

Ao serem criados gráficos de distribuição de agregados (Figura 19), tanto após separação por via seca quanto após separação por via úmida, tomando-se para exemplificação dois extremos dos tratamentos utilizados, sendo eles a menor e a maior granulometria dos biocarvões e também a menor e a maior dose dos mesmos, pode-se observar indicativos que a quebra de material que conseqüentemente reduziu os valores de DMG e DMP para maiores doses destes biocarvões se dá não necessariamente pela

quebra de biocarvões, mas sim à quebra de agregados de solo, sendo que as partículas são depositadas nas peneiras inferiores, conforme observado via gráficos de distribuição de agregados. Levantaram-se então duas primeiras hipóteses para essa quebra: (i) a quebra natural de agregados do solo pela presença de água; (ii) e/ou a presença de um tipo de agente dispersante adicionado via biocarvão.

O K está presente em elevada quantidade nos tipos de biocarvões aqui utilizados. Na forma de íon monovalente (K^+), tais íons em elevada quantidade podem precipitar após secagem da mistura solo e biocarvões agindo como um cimentante entre partículas, em agregados secos. Porém, sob umidade, os íons K^+ podem atuar como dispersante de partículas (LEVY; TORRENTO, 1995; QUIRK; SCHOFIELD, 1955; FARAHANI et al., 2018).

Soma-se ainda às hipóteses acima a também possível ocorrência de uma distribuição assimétrica das partículas dentro destas classes granulométricas de biocarvões, ou seja, a distribuição de partículas dentro dessas classes granulométricas pode ter uma tendência a uma maior porcentagem de partículas de tamanho mais próximo ao limite inferior do que do limite superior, tendenciado assim os valores de DMG e DMP obtidos.

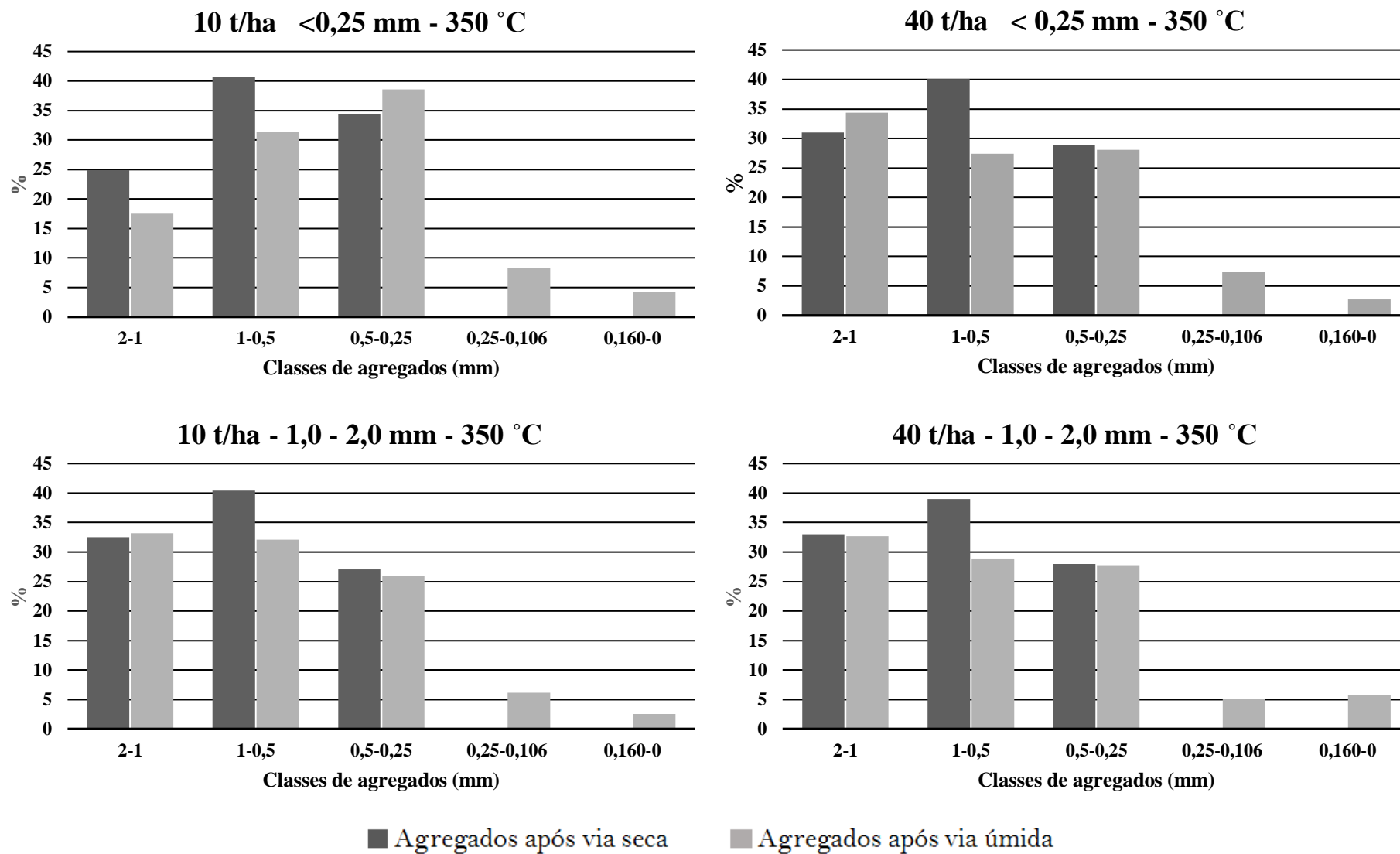


Figura 19 – Distribuição de agregados, obtidos vias seca e úmida, para as doses de 10 e 40 t/ha de biocarvão, para as granulometrias de biocarvões menores que 0,25 mm e de 2,0 – 1,0 mm, ambos produzidos a 350 °C

3.3 Índice de estabilidade de agregados em água (IEA)

O IEA contribui para melhores conclusões sobre as observações feitas para a estabilidade de agregados após o peneiramento por via úmida, de tal modo que quanto mais próximo de 1 forem os valores obtidos, maior é a estabilidade dos materiais, inicialmente obtidos pelo peneiramento por via seca, quando na presença de água (Tabela 15).

Tabela 15 - Índices de estabilidade de agregados (IEA)

Dose (t/ha)	1,0 - 2,0 mm	0,5 - 1,0 mm	0,25 - 0,5 mm	<0,25 mm
	----- 350 °C -----			
0				0,777
10	0,868	0,786	0,791	0,742
20	0,814	0,885	0,869	0,861
40	0,802	0,896	0,909	0,861
80	0,745	0,797	0,867	0,854
----- 600 °C -----				
0				0,777
10	0,816	0,872	0,793	0,770
20	0,775	0,812	0,845	0,825
40	0,740	0,798	0,877	0,841
80	0,700	0,657	0,826	0,799

Para uma melhor discussão dos dados, deve-se considerar ainda que em uma massa de biocarvões há materiais dissolvíveis em água e outros não dissolvíveis. A resultante desse processo é que, por exemplo, nos tratamentos que receberam partículas de biocarvões de 1,0 – 2,0 mm, os efeitos em agregação, consequentes do material não dissolúvel desses biocarvões se limitam somente à classe de agregados de 1,0 – 2,0 mm e que os materiais dissolvíveis presentes na mesma fração granulométrica de biocarvões abrangem seus efeitos sobre as classes de agregados de menor tamanho.

Vê-se ainda que, dentro desse processo de avaliação, para os tratamentos que recebem partículas de biocarvões menores que 0,25 mm os efeitos deste tipo de partícula, seja dos materiais dissolvíveis ou não nela presentes, podem avançar para todas as demais classes de agregados obtidas maiores que 0,25 mm.

Percebe-se assim que o aumento de doses de biocarvões de granulometria < 0,25 mm apresentou melhores efeitos de estabilidade de agregados em água do que o mesmo aumento de doses de biocarvões de granulometrias maiores. Este efeito fica explícito, por exemplo, quando observados os valores de IEA para biocarvões de 350 °C, onde os

valores saíram de 0,742 na menor dose (10 t ha⁻¹) para 0,854 na maior dose (80 t ha⁻¹), ambos de granulometrias < 0,25 mm, enquanto para granulometrias entre 2 – 1 mm os valores saíram de 0,868 na menor dose (10 t ha⁻¹) para 0,745 na maior dose (80 t ha⁻¹).

A resultante destas observações é que após a separação por via úmida, dos tratamentos que receberam partículas de biocarvões de 1,0 -2,0 mm, houve exclusivamente uma mínima alteração do percentual dentro da classe de agregados de 1,0 – 2,0 mm (Figura 13). Assim, após a secagem das parcelas experimentais, os materiais dissolvíveis provavelmente foram precipitados, conferindo cimentação e estabilidade dos agregados, quando ainda secos. Contudo, quando reumedecidos durante a separação por via úmida, estes materiais são redissolvidos podendo então ser perdidos no meio aquoso e eliminando assim seu papel cimentante sob a presença de água.

Como consequência deste processo, há então perda de massa de partículas nas classes de agregados maiores e por esta razão aumento de massa para as classes de agregados de menor tamanho, seja: (i) pela quebra de agregados já presentes no solo ou de agregados formados durante o período de incubação, e (ii) e/ou ainda a perda de massa de material dissolúvel.

A limitação do efeito de agregação para as maiores classes de agregados em função da maior granulometria dos biocarvões aplicados foi também observada por Herath, Camps-Arbestain e Hedley (2013), onde foram aplicados materiais carbonizados cujas partículas predominantes tinham tamanho maior que 0,5 mm, fato este que os autores atribuem à não formação de microagregados.

Esmaeelnejad et al. (2016), após utilizarem biocarvões de 1,0 – 2,0 mm e menores que 1 mm, apresentam dados que indicam ganhos consideráveis em agregação, mesmo após 15 dias de incubação, tendo uma queda a partir da segunda avaliação (30º dia de incubação), sem grandes variações até os 180 dias, quando avaliados os efeitos para um mesmo tipo de biocarvão. Contudo, informações importantes são omitidas, tais como a distribuição de partículas dos biocarvões menores que 1 mm e a textura do solo. Além disso, os resultados alcançados por estes autores mostram ganhos de agregados maiores que 1,0 mm em relação à testemunha e chegam a percentuais de 10 a 25% a mais.

No presente trabalho, as alterações observadas na distribuição de agregados, após a separação por via úmida, em relação à separação por via seca, para os tratamentos que receberam partículas de biocarvões menores que 0,250 mm (Figura 19), são mais pronunciadas que nos tratamentos que receberam partículas de biocarvão de 1,0 – 2,0 mm. Tais alterações podem indicar o efeito mais distribuído, sobre diferentes classes de

agregados, das frações não dissolvíveis e dissolvíveis de biocarvões mais finos, em diferentes classes de agregados após a separação por via seca. Tal efeito pode inclusive ter contribuído para as observações de maiores índices de DMP obtidos por Ouyang et al.(2013) e Hua et al., (2014) que utilizaram, respectivamente, biocarvões de tamanho menores que 0,250 mm e de tamanho médio igual a 0,063 mm.

As observações já discutidas para o comportamento do DMP e DMG, para os tratamentos com doses de biocarvão menores que 0,25 mm e 0,25 - 0,5 mm, para ambas as temperaturas de pirólise e para o tratamento com doses de biocarvão de 0,5-1,0 mm de 350 °C, após as separações por via úmida são confirmadas a partir das observações do IEA (Figura 20) onde se observa um aumento da estabilidade de agregados com maiores teores de partículas e com uma redução a partir da dose de 40 t há⁻¹, indicando um possível atraso no efeito de agregação pelo excesso de material adicionado.

Também são confirmadas as observações realizadas para os tratamentos que receberam partículas de biocarvão de 1,0 – 2,0 mm, obtidos na temperatura de pirólise de 600 °C, onde quanto maior a dose de biocarvão menor é o índice de estabilidade de agregados (Figura 20). E, para os tratamentos que receberam partículas de biocarvão de 1-2 mm de 350°C, verifica-se que apesar de um leve aumento do DMG durante a separação por via úmida (Figura 11), a estabilidade dos agregados reduz quando se avalia o IEA deste tratamento (Figura 20), indicando que partículas maiores que 1 mm não surtiram efeito estabilizante aos agregados quando na presença de água.

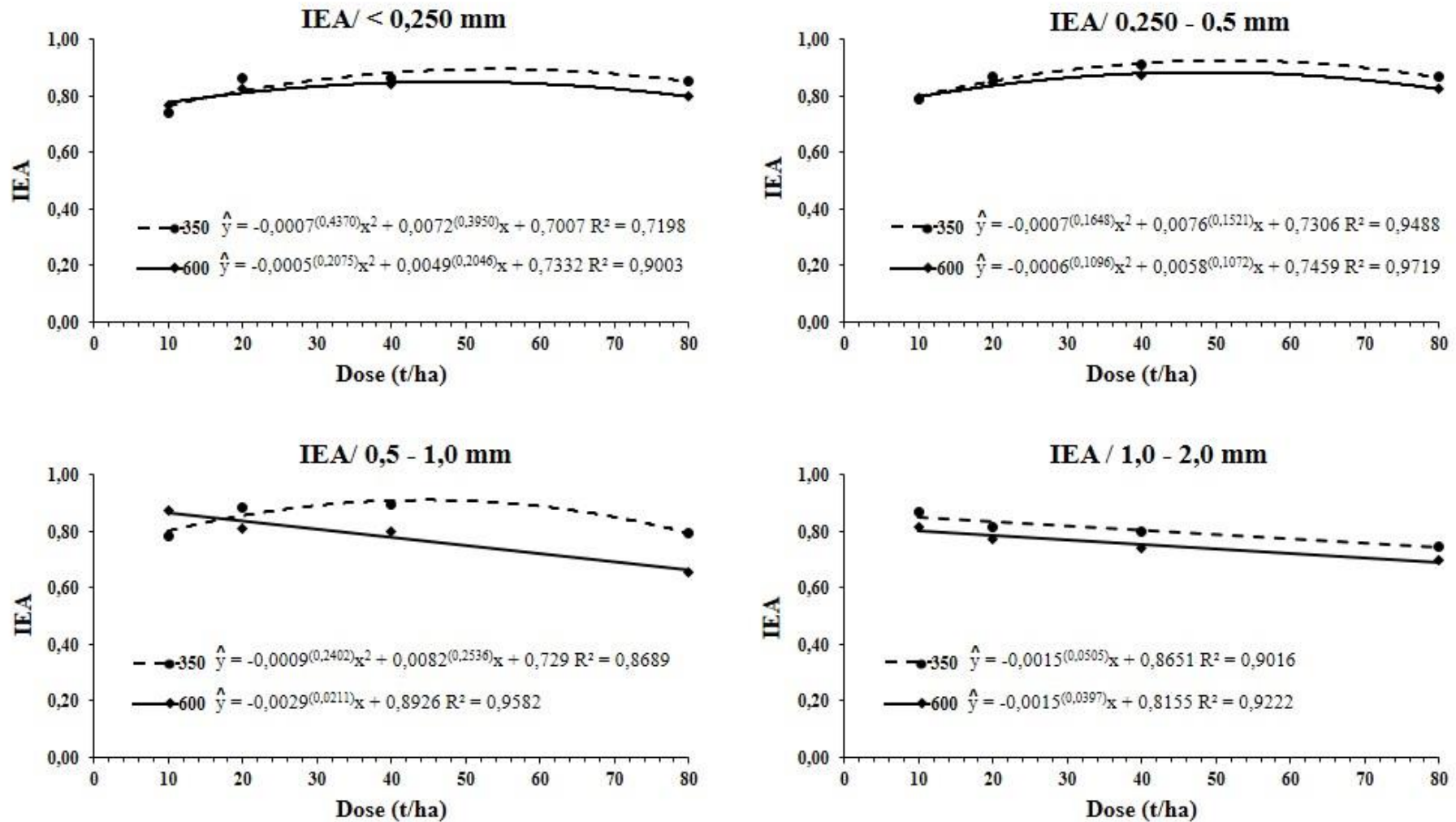


Figura 20 - Índices de estabilidade de agregados em água (IEA), em agregados do solo obtidos em separação via úmida, em função das doses de biocarvão em diferentes granulometrias. Valores sobrescritos entre parênteses correspondem a significância para os coeficientes, obtidas pelo teste t

4 CONCLUSÕES

A temperatura de pirólise de 600 °C promoveu maior agregação do solo (6 %), observado pelos maiores valores de DMG e DMP, em relação a 350 °C, nos agregados separados por via seca. Contudo, por via úmida, não foram observadas diferenças entre temperaturas de pirólise sobre a agregação.

A agregação do solo tendeu a ser favorecida nos tratamentos que receberam biocarvões menores que 0,25 mm de 350 °C e de 0,25-0,5 mm de 600 °C. A estabilidade dos macroagregados secos tende a ser perdida quando em presença de água pela dissolução de materiais, que agiam como cimentantes, que possivelmente tenham sido precipitados nos agregados, obtidos por peneiramento via seca.

A perda em estabilidade de macroagregados na presença de água se dá no sentido do aumento da temperatura e granulometria de biocarvões.

O IEA, obtido pelas relações de DMG via úmida e via seca, mostrou-se como um índice potencial para ser utilizado em estudos de agregação de solos submetidos à aplicação de biocavões sob diferentes doses, granulometrias e temperaturas de pirólise.

5 REFERÊNCIAS

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**, v. 202-203, p. 183-191, 2013.

AWAD, Y. M.; BLAGODATSKAYA, E.; OK, Y. S.; KUZYAKOV, Y. Effects of polyacrylamide, biopolymer and biochar on the decomposition of ¹⁴C-labelled maize residues and on their stabilization in soil aggregates. **European Journal of Soil Science**, v. 64, p. 488-499, 2013.

BANIK, C., LAWRINENKO, M., BAKSHI, S., LAIRD, D.A., Impact of Pyrolysis Temperature and Feedstock on Surface Charge and Functional Group Chemistry of Biochars. **Journal of Environmental Quality**, v. 47, p. 452-461, 2018.

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.

BUSSCHER W.J.; NOVAK J.M.; EVANS D.E.; WATTS D.W.; NIANDOU M.A.S; AHMEDNA M. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamysand. **Soil Science**, v. 175, p. 10-14, 2010.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O. & PODANOSCHI, A.L. Estabilidade de agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 527-538, 1998.

DA SILVA, I.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 1, p. 113-117, 1997.

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.

ESMAEELNEJAD, L., SHORAF, M., GORJI, M., HOSSEINI, S.M. Enhancement of physical and hydrological properties of a sandy loam soil via application of different biochar particle sizes during incubation period. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 2, p. 1103, 2016.

FARAHANI, E.; EMAMI, H.; KELLER, T. Impact of monovalent cations on soil structure. Part II. Results of two Swiss soils. **International Agrophysics**, v. 32, n. 1, p. 69–80, 2018.

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.

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. 209–210, p. 188–197, 2013.

HUA, L., LU, Z., MA, H., JIN, S. Effect of biochar on carbon dioxide release, organic carbon accumulation, and aggregation of soil. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 33, n. 3, p. 941–946, 2014.

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.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. Methods of soil analysis. 2.ed. Madison: **American Society of Agronomy**. Part 1: Physical and mineralogical methods, 1986. p. 425-443.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. Earthscan, London. 416 p. 2009

LEI, O.; ZHANG, R. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, n. 9, p. 1561–1572, 2013.

LEVY, G. J.; TORRENTO, J. R. Clay dispersion and macroaggregate stability as affected by exchangeable potassium and sodium. **Soil Science**, v. 160, n. 5, p. 352, 1995.

LIM, T.-J.; SPOKAS, K. Impact of Biochar Particle Shape and Size on Saturated Hydraulic Properties of Soil. **Korean Journal of Environmental Agriculture**, v. 37, n. 1, p. 1–8, 302018.

LIU, Z., DUGAN, B., MASIELLO, C.A., GONNERMANN, H.M. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. **Plos one**, v. 12, n. 6, 2017.

MUKHERJEE, A. LAL, R.: Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions, **Agronomy**, v. 3, p. 313–339, 2013.

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

OUYANG, L., ZHANG, R. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical properties. **Journal of Soils and Sediments**, v.13, p.1561-1572, 2013.

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 and Tillage Research**, v. 112, n. 2, p. 159–166, 2011.

PEREIRA, R. G.; HEINEMANN, A. B.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; KLIEMANN, H. J.; AND DOSSANTOS, A. P.: Transpiration response of upland rice to water deficit changed by different levels of eucalyptus biochar, **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 47, p. 716–721, 2012.

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. 89-190, p. 585-594, 2012.

QUIRK, J. P.; SCHOFIELD, R. K. THE EFFECT OF ELECTROLYTE CONCENTRATION ON SOIL PERMEABILITY. **Journal of Soil Science**, v. 6, n. 2, p. 163–178, 1955.

R Core Team (2018). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

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

TRIFUNOVIC, B., GONZALES, H.B., RAVI, S., SHARRATT, B.S., MOHANTY, S.K. Dynamic effects of biochar concentration and particle size on hydraulic properties of sand. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 4, p. 884–893, 2018.

TRYON, E. H.: Effect of charcoal on certain physical, chemical and biological properties of forest soils, **Ecological Society of America**, v. 18, p. 81–115, 1948.

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.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society Agronomy**, v. 28, p. 337-351, 1936.

CAPÍTULO III

EFEITO DO BIOCARVÃO DE CASCA DE EUCALIPTO NO DESENVOLVIMENTO INICIAL E NA NUTRIÇÃO E DE *EUCALIPTUS UROGRANDIS* CULTIVADO EM UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO

RESUMO

Tendo em vista a importância da matéria orgânica para a melhoria e manutenção da fertilidade do solo, formas de manejo que visem à manutenção e adição de matéria orgânica aos sistemas agrícolas são necessárias. Nos últimos vinte anos, têm sido publicadas importantes investigações sobre a presença e incorporação de materiais orgânicos carbonizados alterando atributos biológicos, físicos e químicos do solo, sendo estes materiais denominados biocarvões. Objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de doses de biocarvão de casca de eucalipto produzidos sob duas temperaturas de carbonização sobre os atributos químicos do solo, desenvolvimento inicial e nutrição de plantas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*). Um ensaio de campo foi estabelecido com um esquema fatorial 2 x 5: duas temperaturas de pirólise (350 e 600 ° C) e cinco doses de biocarvão (0; 0,25; 0,5; 1 e 2 % v/v), com três repetições. Ao 365 dias após o plantio, foram realizadas as seguintes análises químicas do solo: pH, Al, Ca, Mg, Na, K, H+Al, carbono orgânico total, nitrogênio total, estoques de COT e NT, nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm; e aos 180 e 365 dias após o plantio, foram obtidos dados biométricos de altura e diâmetro do caule das plantas. Foi também realizado, aos 365 dias após o plantio, amostragens de folhas e análises de nutrientes foliares. Para o período experimental avaliado (365 dias), de maneira geral, não foram observados efeitos significativos de temperatura de pirólise, doses de biocarvão e interação da temperatura de pirólise x doses de biocarvão sobre os atributos químicos do solo avaliados, à exceção de NT e COT em ambas as profundidades; H+Al e pH na camada superficial; T e estoque de N na profundidade de 10-30 cm. A temperatura de pirólise de 600 °C proporcionou maiores teores foliares dos macronutrientes N e K em eucalipto. O desenvolvimento inicial do eucalipto (365 dias) não foi influenciado pela utilização de biocarvão de casca de

eucalipto, sendo os atributos nitrogênio total do solo e estoque de nitrogênio na profundidade de 0-10 cm, os principais parâmetros influenciados pelos tratamentos. A temperatura de pirólise de 600°C proporcionou maiores teores foliares dos macronutrientes N e K em eucalipto.

Palavras-chave: Matéria orgânica carbonizada. Nutrição mineral de plantas. Fertilidade do solo.

ABSTRACT

In view of the importance of organic matter for the improvement and maintenance of soil fertility, forms of management aimed at maintaining and adding organic matter to agricultural systems are necessary. In the last twenty years, important investigations have been published on the presence and incorporation of carbonized organic materials, altering biological, physical and chemical attributes of the soil, these materials being called biocarbons. The objective of this study was to evaluate the effect of applying doses of eucalyptus bark biochar produced under two carbonization temperatures on the chemical attributes of the soil, initial development and nutrition of eucalyptus plants (*Eucalyptus urograndis*). A field trial was established with a 2 x 5 factorial scheme: two pyrolysis temperatures (350 and 600 ° C) and five doses of biochar (0; 0.25; 0.5; 1 and 2% v / v), with three repetitions. At 365 days after planting, the following chemical analyzes of the soil were carried out: pH, Al, Ca, Mg, Na, K, H + Al, total organic carbon, total nitrogen, stocks of TOC and NT, at depths of 0- 10 and 10-30 cm; and at 180 and 365 days after planting, biometric data of plant height and stem diameter were obtained. Leaf samples and leaf nutrient analyzes were also performed 365 days after planting. For the evaluated experimental period (365 days), in general, there were no significant effects of pyrolysis temperature, biochar doses and interaction of pyrolysis temperature x biochar doses on the chemical attributes of the evaluated soil, except for NT and COT at both depths; H + Al and pH in the surface layer; T and N stock at a depth of 10-30 cm. The pyrolysis temperature of 600 °C provided higher leaf contents of macronutrients N and K in eucalyptus. The initial development of eucalyptus (365 days) was not influenced by the use of eucalyptus bark biochar, with the attributes of total soil nitrogen and nitrogen stock at a depth of 0-10 cm, the main parameters influenced by the treatments. The pyrolysis temperature of 600°C provided higher leaf contents of macronutrients N and K in eucalyptus.

Keywords: Carbonized organic matter. Mineral plant nutrition. Soil fertility.

1 INTRODUÇÃO

Solos de elevado grau de intemperismo e de baixa fertilidade natural possuem um alto grau de dependência do conteúdo orgânico para potencializar seu papel sobre a nutrição e desenvolvimento de plantas. A fração orgânica atua nestes solos otimizando atributos fundamentais para o desenvolvimento vegetal, agindo como fonte de nutrientes e também como fonte de cargas elétricas para a retenção de nutrientes, evitando assim perdas dos mesmos por lixiviação; melhora ainda a estrutura do solo reduzindo a resistência do solo à penetração de raízes e aumentando a retenção de água, consequentemente disponibilizando uma maior quantidade de água para absorção pelas plantas (SANTOS et al., 2008; BRAIDA et al., 2011).

Biocarvões, materiais orgânicos parcial ou completamente carbonizados, possuem um potencial interessante para serem adicionados ao solo como para fins de produtividade vegetal, por alterarem atributos biológicos (LEHMANN et al., 2011), físicos (MUKHERJEE; LAL, 2013) e químicos (GUL et al., 2015) do solo de interesse agrícola. As principais características que potencializam seu papel como condicionador, e consequentes efeitos sobre a produção vegetal, são a sua alta porosidade e área superficial específica associada à presença de cargas elétricas provenientes de grupos funcionais ligados à estrutura aromática resultantes das moléculas orgânicas carbonizadas, além do conteúdo mineral de cinzas presentes nestes materiais. Tais características são, em presença e magnitude, variáveis em função, principalmente, da biomassa precursora e das condições de produção (LEHMANN e JOSEPH, 2015).

Estudos demonstram que o uso de biocarvões contribui para o crescimento e nutrição de plantas por serem: em muitos casos de propriedade alcalinas, melhorando assim o pH de solos ácidos (ZHU et al., 2014; FIDEL et al., 2017) fontes de nutrientes (TAN et al., 2017; LIMWIKRAN et al., 2018) e por contribuírem para o desenvolvimento da microbiota benéfica à nutrição de plantas (SHEN et al., 2016); além elevarem a capacidade de retenção de água do solo (OMONDI et al., 2016), dentre outros aspectos.

Para a produção de biocarvão tem sido dado prioridade ao uso de materiais residuais de difícil destino, ou ainda, aqueles resíduos cujo potencial pode ser melhor aproveitado indicando-se sua aplicação para outros fins, tais como processos de conversão energética em reatores de pirólise, processo esse que gera basicamente três

tipos de produtos: um gás e um líquido, ambos de alto valor energético, e um material sólido, o biocarvão (PASSOS et al., 2016).

Dentro da cadeia produtiva do eucalipto e produção de celulose existe uma série de resíduos que podem ser empregados, encontrando-se na casca de eucalipto um dos destaques. A casca de eucalipto é um resíduo gerado principalmente nos processos de colheita silvícola e em pátios de beneficiamento da madeira que apresenta composição orgânica semelhante à própria madeira do eucalipto, segundo os teores de holocelulose e lignina, se diferenciando por um maior teor de extrativos totais (ANDRADE et al., 2010).

A matriz lignocelulósica da casca de eucalipto e a grande quantidade gerada deste resíduo nos processos de produção desta espécie silvícola conferem ao mesmo potencial uso em processos de conversão energética via pirólise da biomassa, cujo aproveitamento do resíduo sólido (biocarvão), deste processo, pode potencializar e 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, somado ainda a potencialidade destes materiais em estocar C no solo por um período mais elevado que a biomassa *in natura*.

Neste capítulo objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de doses de biocarvão de casca de eucalipto produzidos sob duas temperaturas de carbonização sobre os atributos químicos do solo, desenvolvimento inicial e nutrição de plantas de eucalipto.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 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 N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn 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 16 - Teores elementares 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 17 – Teores totais de macro e micronutrientes¹ presentes nos biocarvões de casca de eucalipto, produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise (350 e 600 °C)

Variável	350 °C	600 °C
pH	7,1	8,1
	----- dag/kg -----	
P	0,07	0,09
K	0,57	0,70
Ca	2,64	3,31
Mg	0,41	0,57
	----- mg/kg -----	
Cu	7,20	36,35
Fe	2605,00	3088,00
Zn	19,15	37,70
Mn	557,10	819,60

¹Obtidos por digestão nitroperclórica (EMBRAPA, 1997).

2.2 Delineamento experimental

Um ensaio de campo foi estabelecido na área experimental do Instituto Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre, em março de 2018. Os tratamentos foram distribuídos em um delineamento em blocos casualizados em um esquema fatorial 2 x 5, com três repetições. Os fatores estudados foram: duas temperaturas (350 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) (Figura 1).

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 60 cm. O espaçamento aplicado para o plantio foi de 3 x 2 m. Entre cada tratamento e bloco foi introduzida uma linha de plantio sem a adição de biocarvão, constituindo assim as bordaduras do experimento.

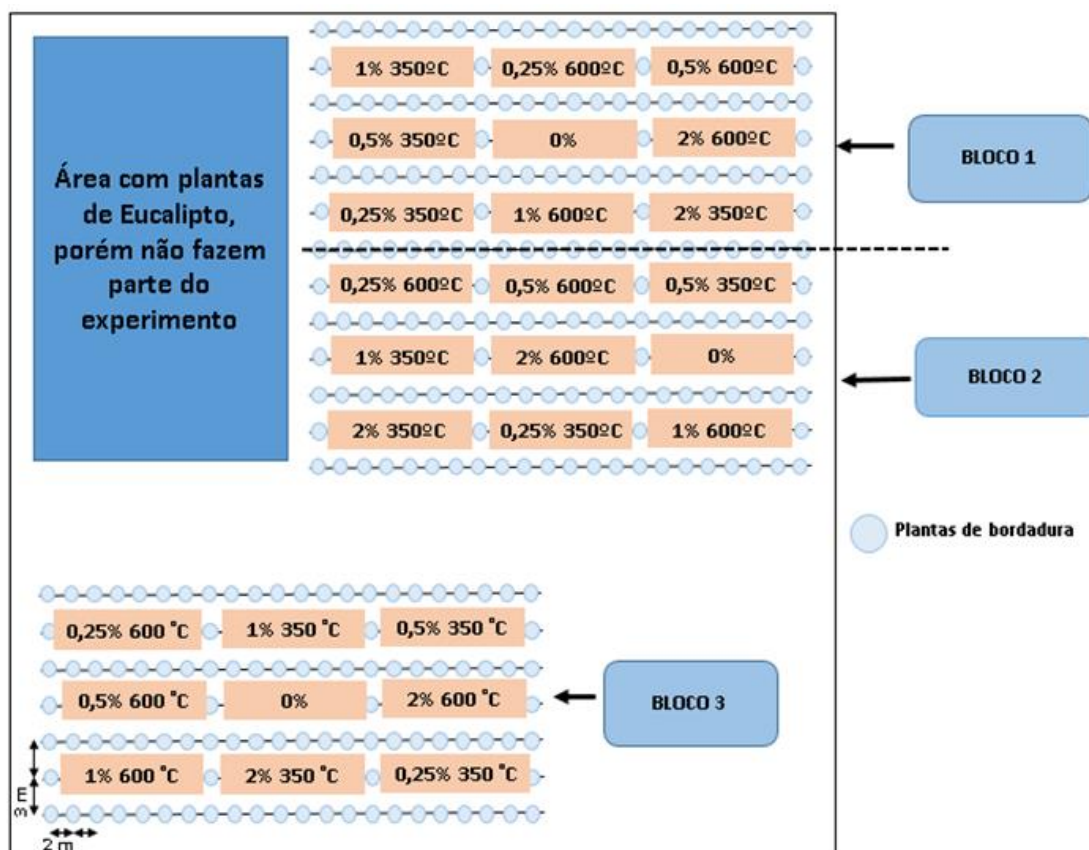


Figura 21 - Croqui da área representando a distribuição espacial dos tratamentos dispostos em cada bloco

Não foi realizada a calagem do solo devido às condições de fertilidade do solo (Tabela 18) já favoráveis à cultura do eucalipto. Durante o plantio das mudas de eucalipto foi realizada a primeira parcela de adubação do solo. A adubação fosfatada foi realizada em dose única no plantio, sendo cada dose por planta, dividida em duas partes iguais e aplicada em lados adjacentes à muda na profundidade de 30 cm, e quantidade total equivalente a 20 kg de P_2O_5 ha^{-1} (camada de 20 cm). As adubações nitrogenada e potássica foram aplicadas em um total equivalente a 40 kg de N ha^{-1} e 30 kg K_2O 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.

2.3 Determinações experimentais

Visando à caracterização física e química 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 (Tabela 3 e 4).

Tabela 18 – 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 -----			-----cmol _c /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) (EMBRAPA, 1997).

Tabela 19 – 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

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.

Aos 365 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, de amostras deformadas e indeformadas, para avaliar o efeito dos tratamentos sobre os atributos químicos do solo. As amostras deformadas foram passadas em peneira de 2,0 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

A partir das amostras coletadas, realizaram-se as seguintes análises químicas: pH em água; Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ trocáveis, extraídos com KCl 1 mol L^{-1} , na proporção 1:10, sendo Al^{3+} determinado por titulação com NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$, Ca^{2+} e Mg^{2+} por espectrofotômetro de absorção atômica e Na^+ por fotometria de chama; K e P disponíveis por extração com Mehlich-1 (HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ + H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$), determinados por fotometria de chama e colorimetria, respectivamente; acidez potencial (H+Al) utilizando $\text{Ca}(\text{OAc})_2$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, ajustado para pH 7,0, titulado com NaOH $0,0606 \text{ mol L}^{-1}$, conforme EMBRAPA (2017). O nitrogênio total (NT) foi quantificado por meio de digestão sulfúrica seguida de destilação Kjeldahl, conforme Tedesco et al. (1995).

Com base nas análises químicas dos solos foram calculados: a soma de bases, a capacidade de troca catiônica efetiva e potencial; a saturação por bases e por alumínio. Ainda assim, foi realizada a determinação de C orgânico total (COT) quantificado por oxidação da matéria orgânica em via úmida com $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ sob meio sulfúrico (H_2SO_4) com aquecimento externo (bloco digestor) (MENDONÇA; MATOS, 2005). A partir dos dados de COT e densidade do solo foram calculados o estoque de C e N em Mg ha^{-1} em cada profundidade, segundo a seguinte equação: conteúdo de COT ou N (dag kg^{-1}) x D_s x e; onde D_s = densidade do solo (kg dm^{-3}); e = espessura da camada de solo (cm).

Aos 180 e 365 dias após o plantio, foram obtidos dados de altura das plantas (m) e do diâmetro do caule a altura do peito (cm). A altura foi medida a partir da superfície do solo até o ponteiro da planta com auxílio de uma régua retrátil, e o diâmetro do caule a 120 cm da superfície do solo com o auxílio de um paquímetro.

Aos 365 dias, também foram coletadas folhas de eucalipto para determinação dos teores de nutrientes foliares. Para tanto, foram escolhidas folhas recém-maduras dos ramos do último ano. As frações do material vegetal, após secas a $65 \text{ }^\circ\text{C}$, foram trituradas em moinho Wiley, e submetidas a análises químicas dos teores de macronutrientes (N, P, K, Ca) e de micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn), conforme Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). A determinação do N foi realizada por titulometria após destilação em destilador tipo Kjeldahl; O P foi determinado em colorímetro; K, em fotômetro de chama e o Ca, Cu, Fe, Mn e Zn em espectrofotômetro de absorção atômica.

2.4 Análises estatísticas

O conjunto de dados de cada parâmetro foi submetido à análise de variância (ANOVA) pelo teste F em 10 % de probabilidade a fim de se observar o efeito dos fatores temperatura (T) e doses (D) em interação ou isolados. Para o fator “dose” foram ainda realizadas análises de regressão linear a fim de avaliar os ajustes de equações que relacionem as variáveis estudadas com as doses de biocarvões e para o fator temperatura foi avaliada via teste F para verificar diferenças estatisticamente significativas entre os tipos de biocarvões. Para todos os procedimentos estatísticos foi utilizando o Ambiente R (R CORE TEAM, 2017).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Atributos químicos do solo

De modo geral, nas profundidades de 0-10 cm (Tabela 20) e de 10-30 cm (Tabela 21), os valores médios dos atributos químicos do solo apresentaram pouca variação em relação aos tipos de biocarvões e doses aplicadas. Os valores de pH em água obtidos variaram entre 5,6 e 6,4, sendo classificados como de acidez baixa, conforme Prezotti et al. (2007). Ainda com base em Prezotti et al. (2007), os valores médios de K, P, Ca e Mg são classificados como médios em todos os tratamentos estudados.

Tabela 20 - Valores médios dos atributos químicos do solo após a aplicação de biocarvão produzidos a 350 e 600 °C, na profundidade de 0-10 cm

	----- Doses de biocarvão (% v/v) -----									
	0	0,25	0,5	1,0	2,0	0,25	0,5	1,0	2,0	
	----- 350 °C -----					----- 600 °C -----				
pH (em água)	5,75	5,65	5,78	5,83	5,89	6,35	5,95	5,88	6,03	
P (mg/dm³)	27,45	14,91	11,52	28,84	24,82	24,54	29,38	7,09	8,47	
K (mg/dm³)	109,23	100,09	102,20	109,58	112,40	109,93	424,31	106,07	88,13	
Ca (cmol/dm³)	2,88	2,64	2,94	3,18	2,67	3,76	3,42	2,86	2,93	
Mg (cmol/dm³)	3,20	2,99	3,31	3,24	3,03	3,27	4,35	3,10	2,94	
Na (mg/dm³)	1,91	3,31	1,56	10,63	2,61	4,70	12,72	1,22	4,00	
H+Al (cmol/dm³)	3,44	3,03	3,16	3,27	3,25	2,53	3,08	3,00	3,14	
NT (dag/kg)	0,19	0,20	0,19	0,27	0,18	0,17	0,23	0,19	0,19	
COT (dag/kg)	0,98	1,05	1,25	1,27	0,94	1,07	1,20	0,97	1,06	

Tabela 21 - Valores médios dos atributos químicos do solo após a aplicação de biocarvão produzidos a 350 e 600 °C, na profundidade de 10-30 cm

	----- Doses de biocarvão (% v/v) -----								
	0	0,25	0,5	1,0	2,0	0,25	0,5	1,0	2,0
	-----350 °C -----					-----600 °C -----			
pH (em água)	5,78	5,88	5,89	5,91	5,67	6,37	5,94	5,79	6,30
P (mg/dm³)	27,43	10,36	7,80	14,57	11,62	5,52	25,86	8,95	5,56
K (mg/dm³)	105,3	78,64	96,22	81,45	79,34	94,11	119,43	110,29	99,74
Ca (cmol_c/dm³)	2,59	2,30	2,81	2,67	2,60	3,84	3,03	2,75	2,93
Mg (cmol_c/dm³)	2,98	3,05	3,11	0,18	3,04	3,11	3,32	2,84	3,17
Na (mg/dm³)	3,66	2,26	4,35	3,66	3,66	3,31	5,75	8,19	7,84
H+Al (cmol_c/dm³)	2,56	3,22	2,83	3,40	2,89	2,34	2,61	2,31	3,41
NT (dag/kg)	0,19	0,16	0,19	0,18	0,21	0,24	0,24	0,12	0,22
COT (dag/kg)	1,09	0,88	0,99	0,98	0,96	1,00	1,13	0,87	1,07

Os valores médios encontrados nas profundidades de 0-10 cm e 10-30 cm para SB, T, t e V% também apresentaram reduzida variação em relação aos tratamentos estudados (Tabelas 22 e 23). Os valores observados para CTC total e CTC efetiva são considerados adequados para fins de fertilidade do solo (PREZOTTI et al., 2007) e as médias saturação por bases apresentam valores satisfatórios, sobretudo para o eucalipto, uma cultura que tem se mostrado tolerante para condições mais acídicas do solo (ALVAREZ e RIBEIRO, 1999).

Tabela 22 - Valores médios dos índices de fertilidade do solo após a aplicação de biocarvão produzidos a 350 e 600 °C, na profundidade de 0-10 cm

Variável	----- Doses de biocarvão (% v/v) -----								
	0	0,25	0,5	1,0	2,0	0,25	0,5	1,0	2,0
	-----350 °C -----					-----600 °C -----			
SB (cmol_c/dm³)	6,37	5,91	6,52	6,75	6,00	7,33	8,91	6,23	6,11
T (cmol_c/dm³)	9,81	8,93	9,69	10,02	9,25	9,86	11,99	9,23	9,25
t (cmol_c/dm³)	6,37	5,91	6,52	6,75	6,00	7,33	8,91	6,23	6,11
V%	65,12	66,03	67,29	67,29	64,83	74,42	73,05	67,62	66,10

Tabela 23 - Valores médios dos índices de fertilidade do solo após a aplicação de biocarvão produzidos a 350 e 600 °C, na profundidade de 10-30 cm

Variável	-----Doses de biocarvão (% v/v) -----									
	0	0,25	0,5	1,0	2,0	0,25	0,5	1,0	2,0	
	-----350 °C -----					-----600 °C -----				
SB (cmol_c/dm³)	5,85	5,56	6,18	6,83	5,86	7,21	6,67	5,91	6,40	
T (cmol_c/dm³)	8,41	8,77	9,01	10,24	8,75	9,55	9,29	8,22	9,81	
t (cmol_c/dm³)	5,85	5,56	6,18	6,83	5,86	7,21	6,67	5,91	6,40	
V%	70,00	63,30	68,61	66,30	67,72	74,49	71,94	72,45	65,17	

Os valores médios obtidos para estoque de C e N na profundidade de 0-10 cm variaram de 13,09 a 17,07 Mg ha⁻¹ e 2,49 a 3,6 Mg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 24), também apresentando reduzida variação em relação aos tratamentos estudados.

Tabela 24 - Valores médios dos estoques de C e N após a aplicação de biocarvões produzidos a 300 e 600 °C, na profundidade de 0-10 cm

	-----Doses de biocarvão (% v/v) -----									
	0	0,25	0,5	1,0	2,0	0,25	0,5	1,0	2,0	
	-----300 °C -----					-----600 °C -----				
Estoque C (Mg/ha)	13,09	14,34	16,24	17,07	14,96	15,30	16,66	13,00	14,69	
Estoque N (Mg/ha)	2,59	2,71	2,44	3,62	2,95	2,49	3,18	2,52	2,63	

Os valores de estoque de C e N na profundidade de 10-30 cm (Tabela 25) apresentaram valores mais elevados, com cerca do dobro de estoque de carbono da camada de 0-10 cm, tal fato se deve a teores de N e C serem semelhantes à camada de 0-10 cm e ao correspondente dobro que a camada de 10-30 cm equivale.

Os valores dos estoques de 10-30 cm variaram entre 24,77 e 32,53 Mg ha⁻¹ para os estoques de carbono, e para estoque de N de 4,76 a 7,67 Mg ha⁻¹. Percebe-se que tais variações não necessariamente correspondem a um aumento dos estoques de C ou N em relação ao tratamento testemunha, quando da adição de biocarvões de 350 °C. Aumentos mais pronunciados ficam mais evidentes quando observados os valores de estoque de N nos tratamentos que receberam doses de biocarvões de 600 °C.

Tabela 25 - Valores médios dos estoques de C e N após a aplicação de biocarvões produzidos a 300 e 600°C, na profundidade de 10-30 cm

	-----Doses de biocarvão (% v/v) -----								
	0	0,25	0,5	1,0	2,0	0,25	0,5	1,0	2,0
	-----350 °C -----				-----600 °C -----				
Estoque C (Mg/ha)	30,87	26,15	29,82	29,98	24,77	32,53	32,62	27,20	30,72
Estoque N (Mg/ha)	5,45	4,76	5,59	5,35	5,63	7,67	6,99	5,74	6,16

A análise de variância dos dados químicos do solo na profundidade de 0-10 cm mostrou que houve efeito significativo, segundo o teste F, de interação entre temperatura e dose de biocarvões apenas para NT (Tabela 26). Diferenças de médias foram obtidas entre os tipos de biocarvões (350°C e 600 °C) em nível de 5% pelo teste de F na dose de 1% de biocarvão (Tabela 27), observando assim maior teor de N total sob biocarvões de 350 °C (0,27 dag kg⁻¹) em relação ao tratamento sobre biocarvão de 600 °C (0,19 dag kg⁻¹), resultado este que não indica necessariamente um padrão de comportamento.

Tabela 26 - Quadrado médio da análise de variância e significância do teste F para a interação entre os fatores na profundidade de 0-10 cm

	GL	----- Quadrado médio -----							
		NT	P	K	Ca	Mg	H+Al	Na	COT
Bloco	2	0,004*	76,160 ^{ns}	40537 ^{ns}	0,226 ^{ns}	189,60*	0,52 ^{ns}	32,41 ^{ns}	0,194*
Temperatura (T)	1	0,001 ^{ns}	33,860 ^{ns}	27756 ^{ns}	0,711 ^{ns}	0,3392 ^{ns}	0,27 ^{ns}	6,16 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Doses (D)	4	0,002 ^{ns}	105,20 ^{ns}	29903 ^{ns}	0,193 ^{ns}	0,6417 ^{ns}	0,33 ^{ns}	26,02 ^{ns}	0,059 ^{ns}
Interação (TxD)	4	0,003*	423,74 ^{ns}	32232 ^{ns}	0,444 ^{ns}	0,3580 ^{ns}	0,05 ^{ns}	79,74 ^{ns}	0,036 ^{ns}
CV (%)		15,83	77,69	116,11	19,36	18,05	20,56	124,53	13,59

* : Significativo em 5% de probabilidade; ^{ns}: Não significativo pelo teste F.

Tabela 27 - Valores médios dos teores de nitrogênio total no solo a 0-10 cm

Temperatura	-----Doses de biocarvão (% v/v) ----				
	0	0,25	0,5	1,0	2,0
	----- dag/kg -----				
350 °C	0,19	0,20a	0,19a	0,27a	0,18a
600 °C	0,19	0,17a	0,23a	0,19b	0,19a

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença entre temperatura segundo teste F (p<0,05)

Efeitos de regressão quadrática foram obtidos para as doses de biocarvões de 350 °C, com redução do teor de N a partir da dose de 1% (Figura 2).

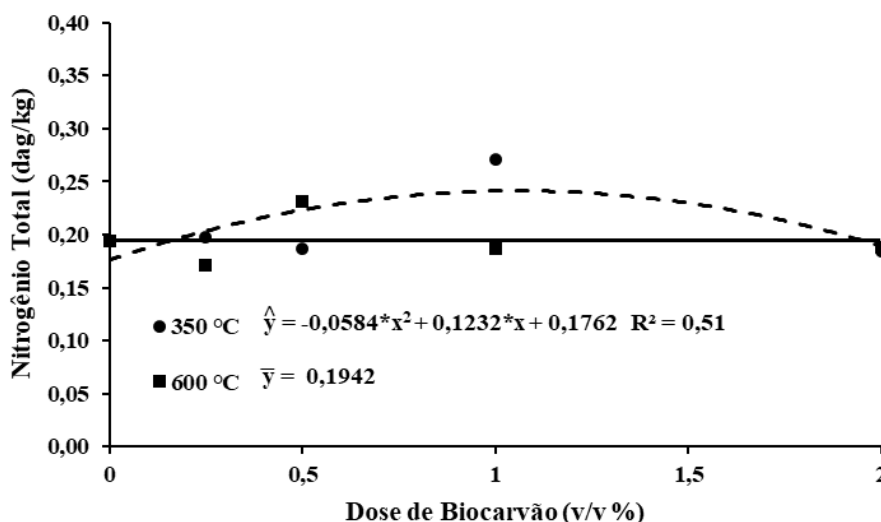


Figura 22 –Nitrogênio total no solo em função de doses e temperaturas de biocarvões. *, significativo à 5% pelo teste t

Ainda na profundidade de 0-10 cm, a análise de variância para os índices de fertilidade do solo mostrou que houve interação entre os fatores estudados apenas para o estoque de N (Tabela 28). Semelhantemente ao NT, desta mesma camada, diferença estatística entre médias dos tratamentos foi somente observada para a dose de 1%, onde o tratamento sobre biocarvão de 350 °C apresentou maior estoque de N (3,62 Mg ha⁻¹) em relação ao biocarvão de 600 °C (2,52 Mg ha⁻¹) (Tabelas 28 e 29).

Tabela 28 - Quadrado médio da análise de variância dos fatores estudados e da significância do teste F para a interação entre os fatores, na profundidade de 0-10 cm

	----- Quadrado médio -----							
	GL	pH	SB	T	t	V	Estoque C	Estoque N
Bloco	2	0,714*	5,154 ^{ns}	7,524*	5,154*	32,471 ^{ns}	0,020*	0,171 ^{ns}
Temperatura (T)	1	0,337 ^{ns}	3,474 ^{ns}	1,786 ^{ns}	3,474 ^{ns}	74,324 ^{ns}	0,425 ^{ns}	0,285 ^{ns}
Doses (D)	4	0,058 ^{ns}	2,383 ^{ns}	2,366 ^{ns}	2,383 ^{ns}	36,313 ^{ns}	0,111 ^{ns}	0,369 ^{ns}
Interação (TxD)	4	0,120 ^{ns}	2,133 ^{ns}	2,101 ^{ns}	2,133 ^{ns}	20,887 ^{ns}	0,234 ^{ns}	0,034*
CV (%)		6,97	17,02	9,83	17,02	9,72	13,32	0,03

*: Significativo em 5% de probabilidade; ^{ns}: Não significativo pelo teste F.

Tabela 29 - Valores médios dos estoques de nitrogênio no solo na camada de 0-10 cm

Temperatura	-----Doses de biocarvão (%) ----				
	0	0,25	0,5	1	2
	----- Mg ha ⁻¹ -----				
350 °C	2,59	2,71a	2,44a	3,62a	2,95a
600 °C	2,59	2,49a	3,18a	2,52b	2,63a

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença entre temperatura segundo teste F (p<0,05)

Já a análise de variância dos atributos químicos do solo de 10-30 cm não apresentou efeito dos tratamentos estudados(Tabela 30).

Tabela 30 - Quadrado médio da análise de variância dos fatores estudados e da significância do teste F para a interação entre os fatores, na profundidade de 10-30 cm

	----- Quadrado médio -----								
	GL	NT	P	K	Ca	Mg	H+Al	Na	COT
Bloco	2	0,009*	188,38 ^{ns}	1958,8 ^{ns}	0,554 ^{ns}	0,487 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,76 ^{ns}	0,25*
Temperatura (T)	1	0,002 ^{ns}	0,72 ^{ns}	2318,2 ^{ns}	1,434 ^{ns}	0,146 ^{ns}	0,84 ^{ns}	37,37 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Doses (D)	4	0,004 ^{ns}	387,25 ^{ns}	535,4 ^{ns}	0,211 ^{ns}	0,148 ^{ns}	0,28 ^{ns}	11,15 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Interação (TxD)	4	0,003 ^{ns}	156,56 ^{ns}	179,9 ^{ns}	0,604 ^{ns}	0,444 ^{ns}	0,65 ^{ns}	6,06 ^{ns}	0,01 ^{ns}
CV (%)		23,83	102,89	26,24	27,76	18,98	31,54	74,24	21,37

*: Significativo em 5% de probabilidade; ^{ns}: Não significativo pelo teste F.

Para a profundidade de 10-30 cm, a análise de variância revelou apenas efeito simples de temperatura para o estoque de N (Tabela 31), com diferença estatística observada via teste de F com maior estoque de N sob biocavões de 600 °C (6,40 Mg ha⁻¹) (Figura 23).

Tabela 31 - Quadrado médio da análise de variância dos fatores estudados e da significância do teste F para a interação entre os fatores, na profundidade de 10-30 cm

	----- Quadrado médio -----							
	GL	pH	SB	T	T	V	Estoque C	Estoque N
Bloco	2	0,210 ^{ns}	0,124 ^{ns}	0,2443 ^{ns}	0,124 ^{ns}	7,031 ^{ns}	0,074 ^{ns}	1,343 ^{ns}
Temperatura (T)	1	0,329 ^{ns}	0,928 ^{ns}	0,0027 ^{ns}	0,928 ^{ns}	98,445 ^{ns}	0,347 ^{ns}	8,200*
Doses (D)	4	0,108 ^{ns}	0,353 ^{ns}	0,77330 ^{ns}	0,353 ^{ns}	13,952 ^{ns}	0,895 ^{ns}	0,862 ^{ns}
Interação (TxD)	4	0,165 ^{ns}	1,312 ^{ns}	2,19300 ^{ns}	1,312 ^{ns}	43,117 ^{ns}	0,760 ^{ns}	2,030 ^{ns}
CV (%)		6,41	17,61	11,52000	17,61	12,72	23,75	20,35

*: Significativo em 5% de probabilidade; ^{ns}: Não significativo pelo teste F.

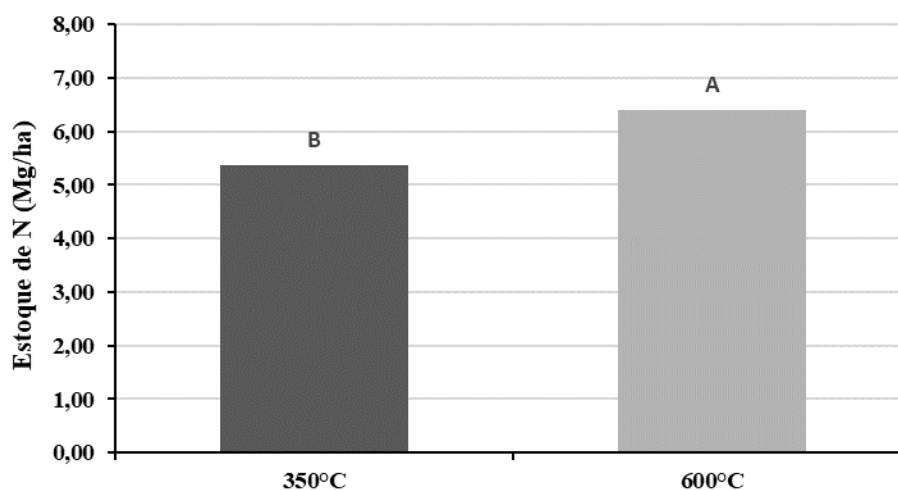


Figura 23 – Valores médios de estoque de N em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,05$)

3.2 Nutrição mineral e biometria de plantas

Analisando os dados concentração de nutrientes foliares a partir dos parâmetros apresentados por Prezotti et al. (2007), verifica-se que os macronutrientes determinados apresentaram valores ora hora dentro do intervalo considerado adequado, ora acima e ora abaixo (Tabelas 32 e 33).

Tabela 32 - Teores de nutrientes foliares correspondentes às doses de biocarvões aos seus macro e micronutrientes para a temperatura de pirólise de 350 °C

Dose (v/v)	0%	0,25%	0,5%	1%	2%
N (g/kg)	18,23 (1%)	14,45 (4%)	17,52 (1%)	14,11 (4%)	17,96 (1%)
P (g/kg)	2,08 (17%)	2,02 (17%)	1,75 (11%)	1,98 (16%)	2,00 (11%)
K (g/kg)	7,23 (3%)	6,98 (6%)	6,97 (8%)	6,90 (2%)	6,79 (6%)
Ca (g/kg)	10,91 (6%)	9,31 (12%)	11,83 (7%)	11,73 (9%)	11,04 (22%)
Cu (mg/kg)	5,87 (145%)	1,92 (21%)	1,12 (38%)	1,46 (33%)	1,84 (37%)
Mn (mg/kg)	188,27 (35%)	228,15 (31%)	100,04 (43%)	155,55 (40%)	157,71 (48%)
Fe (mg/kg)	64,81 (36%)	85,54 (67%)	26,70 (100%)	59,96 (42%)	48,24 (34%)
Zn (mg/kg)	16,12 (18%)	13,20 (15%)	12,56 (20%)	12,06 (7%)	12,08 (6%)

% entre parênteses representam os coeficientes de variação dos tratamentos

Tabela 33 - Teores de nutrientes foliares correspondentes às doses de biocarvões e aos seus macro e micronutrientes a temperatura de pirólise de 600 °C

Dose (v/v)	0%	0,25%	0,5%	1%	2%
N (g/kg)	18,23 (1%)	17,52 (1%)	20,00 (1%)	19,00 (2%)	17,99 (1%)
P (g/kg)	2,08 (17%)	1,94 (5%)	1,83 (24%)	1,94 (23%)	1,71 (17%)
K (g/kg)	7,23 (3%)	7,10 (7%)	7,35 (6%)	7,40 (6%)	7,24 (13%)
Ca (g/kg)	10,91 (6%)	12,44 (11%)	10,08 (11%)	11,84 (15%)	11,13 (14%)
Cu (mg/kg)	5,87 (145%)	1,76 (47%)	1,82 (61%)	2,16 (27%)	2,69 (29%)
Mn (mg/kg)	188,27 (35%)	169,93 (65%)	111,27 (48%)	157,94 (78%)	186,12 (43%)
Fe (mg/kg)	64,81 (36%)	61,20 (31%)	82,56 (26%)	65,25 (69%)	79,37 (35%)
Zn (mg/kg)	16,12 (18%)	12,66 (7%)	13,74 (15%)	13,21 (31%)	12,34 (32%)

% entre parênteses representam os coeficientes de variação dos tratamentos.

Os teores de nitrogênio (N) apresentaram em sua maioria valores acima do intervalo adequado (que corresponde a uma amplitude de 14-16 g kg⁻¹), alcançando valores de até 20 g kg⁻¹. Os teores de fósforo (P) foram todos mais elevados que o limite indicado por PREZOTTI et al., (2007), o qual indica teores entre 1 e 1,2 g kg⁻¹. Já os teores de Ca mantiveram-se dentro dos teores padrões, entre 8 e 12 g kg⁻¹. Os teores de potássio por sua vez foram menores que a amplitude adequada (10 a 12 g/kg), apresentando valores entre 6,9 g kg⁻¹ e 7,4 g kg⁻¹ para todos os tratamentos.

Quanto aos resultados dos micronutrientes (Cu, Mn, Fe, Zn), o cobre, ferro e zinco apresentaram teores abaixo do adequado, enquanto o manganês apontou teores baixos, porém ainda dentro da amplitude adequada (100-600 mg kg⁻¹) (Tabela 32 e 33). Sendo as seguintes amplitudes consideradas adequadas para a cultura do eucalipto, para estes micronutrientes: 8-10 mg kg⁻¹, para o Cu; 100-600 mg kg⁻¹, para o Mn; 150-200 mg kg⁻¹, para o Fe e 40-60 mg kg⁻¹, para o Zn.

Com relação aos dados biométricos de altura e diâmetro a altura do peito (DAP) do eucalipto, verifica-se que tanto aos 6 meses, quanto após aos 12 meses após plantio não há diferenças perceptíveis nem padrões de comportamento com relação aos tratamentos estudados (Tabela 34), cujos valores de altura variaram entre 2,54 e 2,81 m, e os de DAP variaram entre 1,52 cm e 1,96 cm aos 6 meses após plantio. E, aos 12 meses as variações foram entre 8,53 a 8,92 m, para altura, e entre 6,53 e 6,96 cm para DAP.

Os dados aqui obtidos, sobretudo aos doze meses, são relativamente altos, quando comparados com situações de tempo de avaliação, condições de solo e clima como o caso apresentado por Oliveira et al. (2015) ao avaliarem o crescimento inicial de eucalipto em

sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. Tal marcante desenvolvimento é possivelmente fruto das condições iniciais de boa fertilidade do solo, adubação e irrigação introduzida na área do presente estudo para fins de melhor desempenho em sobrevivência de plantas nos estágios iniciais de condução do experimento.

Tabela 34 - Dados biométricos de altura e diâmetro a altura do peito do eucalipto no período de 6 e 12 meses após o plantio, para as temperaturas de pirólise de 350 °C e 600 °C

6 meses após plantio					
----- 350 °C -----					
Dose (v/v)	0%	0,25%	0,5%	1%	2%
Altura (m)	2,81 (18%)	2,54 (19%)	2,70 (33%)	2,70 (19%)	2,63 (23%)
DAP (cm)	1,96 (36%)	1,52 (39%)	2,06 (34%)	1,94 (24%)	1,92 (37%)
----- 600 °C -----					
Dose (v/v)	0%	0,25%	0,5%	1%	2%
Altura (m)	2,81 (18%)	2,76 (16%)	2,77 (16%)	2,66 (21%)	2,62 (15%)
DAP (cm)	1,96 (36%)	1,96 (29%)	1,96 (31%)	1,90 (33%)	1,76 (23%)
12 meses após plantio					
----- 350 °C -----					
Dose (v/v)	0%	0,25%	0,5%	1%	2%
Altura (m)	8,90 (9%)	8,73 (6%)	8,92 (7%)	8,91 (10%)	8,81 (10%)
DAP (cm)	6,96 (10%)	6,63 (11%)	6,92 (10%)	6,87 (11%)	6,82 (13%)
----- 600 °C -----					
Dose (v/v)	0%	0,25%	0,5%	1%	2%
Altura (m)	8,90 (9%)	8,78 (6%)	8,76 (10%)	8,55 (15%)	8,53 (14%)
DAP (cm)	6,96 (10%)	6,82 (8%)	6,87 (11%)	6,58 (20%)	6,53 (10%)

% entre parênteses representam os coeficientes de variação dos tratamentos

As análises de variância para os teores de nutrientes foliares (Tabelas 35 e 36), revelaram que apenas o Ca apresentou interação significativa ($p < 0,01$), sendo que para os efeitos simples foram identificados efeitos de dose para Zn ($p < 0,01$) (Tabela 36) e efeito de temperatura para N ($p < 0,05$) e K ($p < 0,05$) (Tabela 35).

Tabela 35 - Quadrado médio da análise de variância e significância do teste F para a interação entre os teores foliares dos macronutrientes

	GL	----- Quadrado médio -----			
		N	P	K	Ca
Bloco	2	10,302 ^{ns}	0,236 ^{ns}	0,037 ^{ns}	6,650 ^{ns}
Temperatura (T)	1	65,156*	0,066 ^{ns}	1,250*	1,458 ^{ns}
Doses (D)	4	16,800 ^{ns}	0,147 ^{ns}	0,095 ^{ns}	1,727 ^{ns}
Interação (T x D)	4	13,110 ^{ns}	0,059 ^{ns}	0,142 ^{ns}	9,295**
CV (%)		19,86%	17,88%	7,27%	12,93%

** : Significativo em 1% de probabilidade; * : Significativo em 5% de probabilidade; ^{ns}: Não significativo pelo teste F.

Tabela 36 - Quadrado médio da análise de variância e significância do teste F para a interação entre os teores foliares dos micronutrientes

	GL	----- Quadrado médio -----			
		Cu	Mn	Fe	Zn
Bloco	2	38,029 ^{ns}	11.017,700 ^{ns}	1.515,320 ^{ns}	31,680*
Temperatura (T)	1	2,591 ^{ns}	153,600 ^{ns}	2.769,450 ^{ns}	2,474 ^{ns}
Doses (D)	4	39,683 ^{ns}	16.008,900 ^{ns}	534,240 ^{ns}	29,025**
Interação (T x D)	4	0,635 ^{ns}	3.208,500 ^{ns}	2.840,040 ^{ns}	1,668 ^{ns}
CV (%)		155%	51,50%	52,64%	19,53%

** : Significativo em 1% de probabilidade; * : Significativo em 5% de probabilidade; ^{ns}: Não significativo pelo teste F.

Para a interação observada para o Ca (Tabela 35), diferenças significativas foram obtidas apenas para a dose de 0,25%, cujos teores foram de 12,4 g kg⁻¹ com biocarvão de 600 ° C 9,3 g kg⁻¹ com biocarvão de 350 ° C (Tabela 37), e para a dose de 0,5%, cujos teores foram de 10,08 g kg⁻¹ com biocarvão de 600°C e 11,83 g kg⁻¹ com biocarvão de 350°C (Tabela 37).

Tabela 37 - Valores médios dos teores de Ca na planta em função das doses e temperaturas dos biocarvões

Biocarvões/ Temperatura	----- Doses de biocarvão (%) -----				
	0	0,25	0,5	1	2
	----- Ca (dag/kg) -----				
350 °C	10,91	9,31b	11,83a	11,73a	11,04a
600 °C	10,91	12,44a	10,08b	11,84a	11,13a

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença entre temperatura segundo teste F (p<0,05)

Por sua vez, o efeito de temperatura obtido para o K, as diferenças significativas obtidas indicaram maior teor de potássio para tratamento com biocarvão de 600 °C (média de 7,26 g kg⁻¹) em relação aos tratamentos com biocarvão de 350 °C (média de 6,97 g kg⁻¹) (Figura 24).

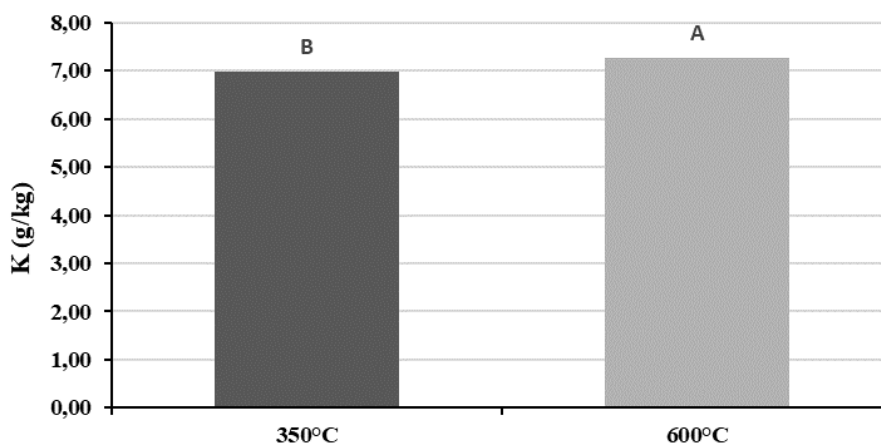


Figura 24 – Valores médios dos teores de potássio foliares em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,05$)

Já o efeito de temperatura de pirólise obtido para o N, as diferenças significativas obtidas indicaram maior teor de nitrogênio para tratamento com biocarvão de 600 °C (média de 18,55 g kg⁻¹) em relação aos tratamentos com biocarvão de 350 °C (média de 16,46 g kg⁻¹) (Figura 25).

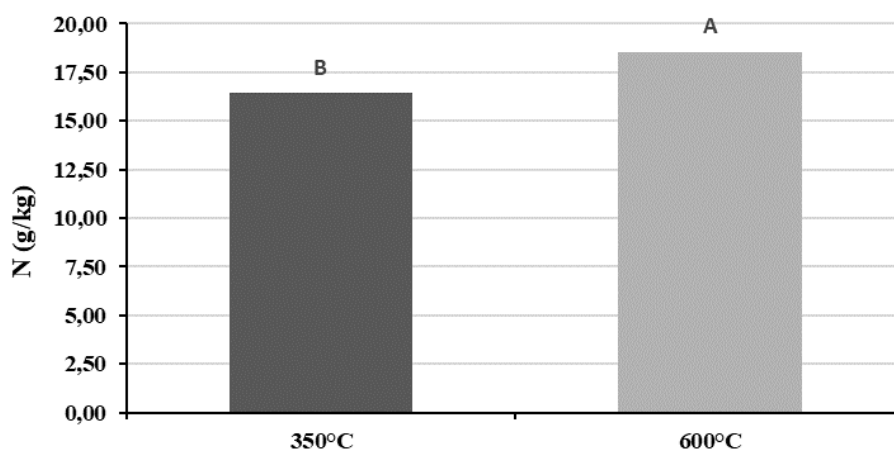


Figura 25 – Valores médios dos teores de nitrogênio foliares em função da temperatura de pirólise. Letras diferentes indicam diferença entre temperatura segundo teste F ($p < 0,05$)

A maior concentração K nas folhas de plantas sob tratamentos com biocarvões de 600 °C pode ser um reflexo da maior concentração e disponibilidade destes nutrientes neste tipo de biocarvão em relação ao de 350 °C. Já a maior concentração de N obtido para os biocarvões de 600 °C pode ser um reflexo dos efeitos de retenção de N em biocarvões produzidos sob maior temperatura e conseqüente maior disponibilidade do mesmo para a nutrição de plantas (DE LUCA et al., 2009).

Os teores de Zn foliar apresentaram um comportamento de queda em relação às doses crescentes de biocarvões aplicadas ao solo (Figura 26).

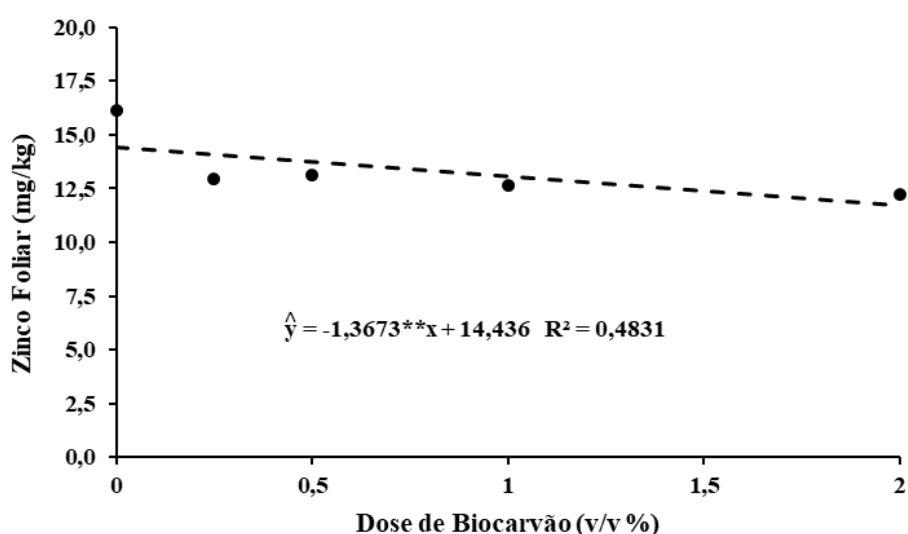


Figura 26 – Zinco foliar em função de doses biocarvões. **, significativo à 1% pelo teste t.

Para os parâmetros biométricos, não se observou significância para a temperatura de pirólise, doses de biocarvão e interação doses de biocarvão x temperatura (Tabelas 20). Pesquisas sobre biocarvões e produção de eucalipto, para efeito de comparação, ainda são escassas e com poucas informações sobre a performance de desenvolvimento dos mesmos. Wrobel-Tobszewska et al. (2016), por exemplo, ao trabalhar com biocarvões de macadâmia e o desenvolvimento de *Eucaliptus nitens* concluíram que os efeitos de desenvolvimentos das plantas no experimentos foram fortemente dependentes dos níveis de fertilizantes, sem contudo observarem diferenças significativas das doses de biocarvões (que inclusive chegaram a uma massa equivalente a 100 t ha⁻¹). Porém, informações cruciais, tais como teor de nutrientes e granulometria dos biocarvões foram omitidas nesse trabalho.

Tabela 38 - Quadrado médio da análise de variância dos fatores estudados e da significância do teste F para a interação entre dados biométricos de altura e diâmetro a altura do peito de 6 e 12 meses

----- Quadrado médio -----					
		6 meses		12 meses	
	GL	Altura	DAP	Altura	DAP
Bloco	2	7,953**	10,465**	9,291**	2,360*
Temperatura (T)	1	0,088 ^{ns}	0,096 ^{ns}	1,142 ^{ns}	0,429 ^{ns}
Doses (D)	4	0,187 ^{ns}	0,466 ^{ns}	0,370 ^{ns}	0,737 ^{ns}
Interação (T x D)	4	0,104 ^{ns}	0,403 ^{ns}	0,221 ^{ns}	0,209 ^{ns}
CV (%)		17,69%	27,76%	9,84%	12,14%

** : Significativo em 1% de probabilidade; * : Significativo em 5% de probabilidade; ^{ns} : Não significativo pelo teste F.

Fundamentalmente os efeitos dos biocarvões sobre o desenvolvimento vegetal é função de uma série de fatores que envolvem primeiramente os efeitos dos biocarvões sobre os atributos dos solos. Sendo que, por sua vez, a magnitude dos efeitos dos biocarvões sobre os atributos do solo dependerá também da interação entre os biocarvões e solo.

Para o caso dos biocarvões, maiores efeitos são esperados quando os mesmos são aplicados em solos de pH ácido (JEFFERY *et al.*, 2017), já que biocarvões em geral apresentam pH maiores que 7. Tanto mais elevado quanto maior a temperatura de produção (DOMINGUES *et al.*, 2017). O pH age neste caso como um núcleo modificador de outros atributos do solo, fundamentalmente sobre os potenciais atributos de fertilidade dos mesmos, tais como maior disponibilidade de nutrientes e aumento da capacidade de troca de cátions do solo. Rockwood *et al.* (2019) relatam anterações positivas para a nutrição de plantas sobre os atributos químicos de um solo sobre cultivo de eucalipto na Florida, como o aumento de pH, fósforo e nitrogênio, sendo que o solo inicialmente apresentava pH de valor 5,44. Os autores ainda atribuem o bom estado nutricional da árvore ao uso dos biocarvões, com um enriquecimento nas concentrações de K, Mg, P e Fe.

A falta de padrões claros de comportamento dos efeitos de dose do presente trabalho, pode estar relacionada com o fato que o solo da área de plantio apresentava, já desde o início da condução do experimento, condições de fertilidade desejáveis para a nutrição de plantas (Tabela 18), sobretudo para o eucalipto, uma planta pouco exigente em termos de fertilidade do solo.

4 CONCLUSÕES

Tendo em vista as observações expostas, verifica-se que para o período experimental avaliado (365 dias), de maneira geral, à exceção do nitrogênio total e estoque de nitrogênio na camada de 0-10 cm de solo, não foram observados efeitos significativos de temperatura de pirólise, doses de biocarvão e interação da temperatura de pirólise com doses de biocarvão sobre os atributos químicos do solo avaliados, em condições de campo.

Já, quanto aos teores foliares de macro e micronutrientes, o principal efeito observado deve-se ao tipo de biocarvão, onde biocarvões de 600°C proporcionaram maiores teores foliares dos macronutrientes N e K.

Enfatiza-se a importância de novas avaliações por um período experimental mais extenso haja vista os indicativos que a literatura apresenta quanto ao desenvolvimento de cargas nos biocarvões por conta de processo de oxidação, em longo prazo, dos mesmos quando aplicados ao solo, tornando-os assim mais ativos físico-quimicamente, o que pode contribuir para a observação de efeito, inclusive sobre a biometria de plantas silvícolas.

5 REFERÊNCIAS

- ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.). **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5a Aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 43–60.
- WROBEL-TOBISZEWSKA, A., BOERSMA, M., ADAMS, P., SINGH, B., FRANKS, S. et al. (2016). Biochar for eucalyptus forestry plantations. **Acta Horticulture**, 1108, 55-62.
- ROCKWOOD, D.L., ELLIS, M.F., LIU, R., ZHAO, F., Ji, P., ZHU, Z., FABBRO, K.W., He, Z., CAVE, R.D., 2019. Short Rotation Eucalypts: Opportunities for Biochar. **Forests** 10, 314.
- 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.
- 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.
- DOMINGUES, R.R., TRUGILHO, P.F., SILVA, C.A., DE MELO, I.C.N.A., MELO, L.C.A., MAGRIOTIS, Z.M., SÁNCHEZ-MONEDERO, M.A. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **PLoS ONE**, v. 12, 2017. p.11.
- 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.
- FIDEL, R.B., LAIRD, D.A., THOMPSON, M.L., LAWRENENKO, M. Characterization and quantification of biochar alkalinity. **Chemosphere**, v. 167, p. 367–373, 2017.
- 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, 2015. p. 46-59
- 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 boosts tropical but not temperate crop yields. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 5, 2017. P. 53-61.
- 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, 2011. p. 1812-1836.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**. 2 ed. London: Earthscan, 2015. 976 p.

- LIMWIKRAN, T., KHEORUENROMNE, I., SUDDHIPRAKARN, A., PRAKONGKEP, N., GILKES, R. J. Dissolution of K, Ca, and P from biochar grains in tropical soils. **Geoderma**, v. 312, p. 139–150, 15 fev. 2018.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005. p. 107
- MUKHERJEE, A.; LAL, R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. **Agronomy Journal**. v. 3. p. 313-339, 2013.
- OMONDI, M.O., XIA, X., NAHAYO, A., LIU, X., KORAI, P.K., PAN, G. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. **Geoderma**, v. 274, p. 28–34, 15 jul. 2016.
- OLIVEIRA, F.L.R. de; CABACINHA, C.D.; SANTOS, L.D.T.; BARROSO, D.G.; SANTOS JUNIOR, A. dos; BRANT, M.C.; SAMPAIO, R.A. Crescimento inicial de eucalipto e acácia, em diferentes arranjos de integração lavoura-pecuária-floresta. **Cerne**, v. 21, n. 1, p. 227-233, 2015.
- 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.
- PREZOTTI, L.C; GOMES, J.A; DADALTO, G.G; OLIVEIRA, J. A. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo- 5º aproximação**. Vitória, ES. SEEA/INCAPER/CEDAGRO. 2007 p. 14-16.
- R Core Team (2017). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; Camargo, F.A.O. (Eds) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008. 636 p.
- SHEN, Q., HEDLEY, M., CAMPS ARBESTAIN, M., KIRSCHBAUM, M.U.F. Can biochar increase the bioavailability of phosphorus? **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 16, n. 2, p. 268–286, 2016.
- TAN, Z., LIU, L., ZHANG, L., HUANG, Q. Mechanistic study of the influence of pyrolysis conditions on potassium speciation in biochar “preparation-application” process. **The Science of the Total Environment**, v. 599–600, p. 207–216, 2017.
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, p.1995. 174.
- ZHU, Q.-H., PENG, X.-H., HUANG, T.-Q., XIE, Z.-B., HOLDEN, N.M. Effect of Biochar Addition on Maize Growth and Nitrogen Use Efficiency in Acidic Red Soils. **Pedosphere**, v. 24, n. 6. 2014. p. 699–708, 2002.

CONCLUSÕES GERAIS

Dada as observações aqui verificadas, do potencial que diferentes granulometrias dos biocarvões exercem sobre os papéis “fonte de nutrientes” e “agente cimentante de partículas do solo”, sugere-se que os novos trabalhos executados explorem como esse fator – granulometria – pode contribuir para potencializar efeitos positivos de interesse agrícola, tais como o fornecimento de água às plantas e o desenvolvimento da microbiota do solo. Estudos que envolvam efeito de agregação e englobem observações sobre a microbiota do solo também são encorajados, dado (i) o potencial que diferentes granulometrias de biocarvões podem exercer em diferentes grupos da fauna do solo e (ii) a forte ligação que há entre desenvolvimento de agregados e microfauna do solo.

Estudos de aspecto econômico de uso da casca de eucalipto, e outros resíduos da cadeia produtiva do eucalipto, são também encorajados, sobretudo observando os efeitos em longo prazo, haja vista pelo menos duas questões de interesse para a produção silvícola: (i) biocarvões podem potencializar seus efeitos, em longo prazo via processos de oxidação quando aplicado ao solo, desenvolvendo assim cargas e conseqüentemente tornando-se mais ativo sobre processos físico-químicos do solo e (ii) se tratando de casca de eucalipto, cria-se uma ligação mais estreita entre o uso de biocarvões e ganhos econômicos nos processo silvícolas.