

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

TAMARA ALMEIDA PINTO

LIXIVIAÇÃO DE NUTRIENTES EM COLUNAS DE SOLO SOB
APLICAÇÃO DE BIOCARVÃO DE CASCA DE EUCALIPTO

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO

2019

TAMARA ALMEIDA PINTO

LIXIVIAÇÃO DE NUTRIENTES EM COLUNAS DE SOLO SOB
APLICAÇÃO DE BIOCARVÃO DE CASCA DE EUCALIPTO

Monografia apresentada ao
Departamento de Ciências
Florestais e da Madeira da
Universidade Federal do
Espírito Santo, como
requisito parcial para
obtenção do título de
Engenheira Florestal.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2019

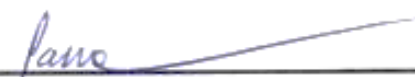
TAMARA ALMEIDA PINTO


LIXIVIAÇÃO DE NUTRIENTES EM COLUNAS DE SOLO SOB
APLICAÇÃO DE BIOCARVÃO DE CASCA DE EUCALIPTO

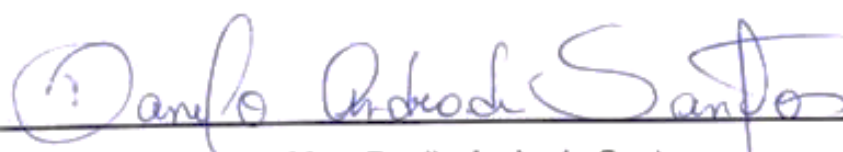
Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira
da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheira Florestal.

Aprovada em 03 de julho de 2019.

COMISSÃO EXAMINADORA


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


Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador


Msc. Danilo Andrade Santos
Universidade Federal Espírito Santo
Examinador

À minha mãe, Marly.

Às minhas irmãs, Tamirys e Nana.

Aos meus sobrinhos, Héctor e Arthur.

Dedico

“A mais alta das torres começou no solo.”

Provérbio Chinês

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me guiado e sempre está presente na minha vida e nas minhas escolhas.

À minha família, em especial, a minha mãe Marly da Penha Almeida, por todo amor, carinho, compreensão, ensinamentos e por acreditar em mim. As minhas irmãs Tamirys e Nana por compreenderem minha ausência, e pelo companheirismo e amizade. Aos meus avós, Alzira e Pedro, por me amarem.

Ao professor e orientador Renato Ribeiro Passos pelas ótimas aulas dadas com o notado amor pelo que faz, pela orientação desse trabalho e pela confiança depositada em mim.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal do Espírito Santo por contribuírem com minha formação durante esses anos no Campus de Alegre.

Ao Danilo, pela ajuda na elaboração e condução desse trabalho, que sem ele não seria possível, pelos incentivos e apoio, e pela amizade.

A FAPES pelo apoio financeiro nessa pesquisa.

Aos meus amigos vianenses, João Wellington e Siumara, pela compreensão da minha ausência e por toda a amizade de anos.

À Fran pela amizade, compreensão, conselhos, parcerias, chácaras e risadas durante esses anos no Alegre, e que venham muitos anos pela frente.

Às “Flores” que Deus colocou no meu caminho, Rachel e Thaís, pela amizade, carinho, companheirismo, Docces, viagens, risadas e incentivos. Estarão sempre e para sempre no meu coração.

Aos colegas e amigos do curso, em especial, Emerson, Mancini, Larissa, Roberto e Thales, por tudo vivido durante esses anos de curso, os trabalhos, as festas, as conversas e as risadas, enfim, vou guardar para sempre.

À República Escondidinha onde foi meu lar durante todos os anos de graduação, às irmãs de república e aos agregados.

Ao carinho que mora logo ali, por ter me feito sorrir mesmo nos dias de desespero, por me ouvir e aconselhar, e se fazer presente mesmo distante.

A todos que de alguma forma contribuíram para que meu sonho se realizasse. Gratidão!

RESUMO

O biocarvão é formado a partir da pirólise de diferentes tipos de resíduos de biomassa, sob baixa ou ausente concentração de oxigênio e elevadas temperaturas. A presença de grupos funcionais na superfície dos biocarvões podem melhorar os atributos químicos do solo aumentando a capacidade de troca catiônica e reduzindo a lixiviação de nutrientes do solo. Com isso, o presente trabalho objetivou avaliar o deslocamento de nutrientes (Ca, Mg e K) e Na em colunas PVC preenchidas com solo, sob aplicação de biocarvão de casca de eucalipto (CE) na camada superficial, ao receber lâminas de água em excesso. Para isso, o ensaio experimental foi assim estabelecido em um delineamento inteiramente casualizado com 5 tratamentos seguindo as combinações de 2 duas doses de biocarvão (5 e 15 t/ha) e duas temperaturas de carbonização (350°C e 600°C), mais um tratamento testemunha sem adição de biocarvão e CaCO₃, com três repetições para cada tratamento. Foram produzidas colunas de PVC com 40 cm de altura. O biocarvão juntamente com CaCO₃ incorporados nos primeiros 5 cm de solo e as lâminas de água aplicadas 5 vezes, cada aplicação equivalente a uma chuva de 100 mm, totalizando 500 mm de água. Ao final avaliados os teores de nutrientes nos lixiviados e nas camadas do solo (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30 e 30-40 cm). O aumento do pH do solo foi significativo para a camada superficial (0-5 cm), bem como para os teores de Ca, para o K a camada apresentou diferença para todos os tratamentos, com a seguinte sequência de concentração: T4>T2>T3>T1. Já o Mg não apresentou aumento significativo para nenhuma das camadas avaliadas. A acidez potencial (H+Al) do solo, na camada 0-5 cm para todos os tratamentos apresentou valores inferiores ao Tzero. Os valores de CTC potencial do solo não apresentaram diferença estatística para nenhuma das camadas avaliadas. Os nutrientes lixiviados (Ca, Mg, K) e Na, apresentaram maior perda para todos os tratamentos sob biocarvão de casca de eucalipto e CaCO₃ em relação ao controle. Contudo, o biocarvão de casca de eucalipto sob o solo apresentou maior efeito positivo na camada superficial onde, juntamente com CaCO₃, foi incorporado.

Palavras chave: Biochar, resíduo florestal, movimentação de nutrientes.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo Geral	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	2
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Casca de eucalipto	3
2.2. Biocarvão.....	3
2.3. Benefícios do uso do biocarvão.....	5
3. METODOLOGIA	7
3.1. Coleta do solo e produção dos biocarvões.....	7
3.2. Delineamento Experimental.....	8
3.3. Montagem das Colunas de lixiviação.....	8
3.4. Determinações Experimentais	10
3.5. Análises Estatísticas.....	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
4.1. Solo.....	12
4.2. Lixiviado.....	19
5. CONCLUSÕES.....	23
6. REFERÊNCIAS	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização física ¹ dos solos	7
Tabela 2 - Caracterização química ¹ dos solos.....	7
Tabela 3 - Características químicas do biocarvão de casca de eucalipto pirolisados na temperatura de 350 °C e 600 °C	8
Tabela 4 - Doses de biocarvão de casca de eucalipto, e suas respectivas combinações em duas temperaturas de carbonização, e doses de calcário....	10
Tabela 5 - Valores médios de pH do solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15,15-20, 20-30 e 30-40 cm e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento.	12
Tabela 6 - Teores médios de cálcio (Ca) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15,15-20, 20-30 e 30-40 cm do solo e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento	13
Tabela 7 - Teores médios de magnésio (Mg) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15,15-20, 20-30 e 30-40 cm do solo e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento	14
Tabela 8 - Teores médios de Potássio (K) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15,15-20, 20-30 e 30-40 cm do solo e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento	15
Tabela 9: Valores médios de acidez potencial (H+Al) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15,15-20, 20-30 e 30-40 cm do solo e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento.....	16
Tabela 10 - Teores médios de sódio (Na) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15,15-20, 20-30 e 30-40 cm do solo e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento	17
Tabela 11: Valores médios da Soma de Bases (SB) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15,15-20, 20-30 e 30-40 cm do solo e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento.....	18
Tabela 12: Valores médios da capacidade de troca catiônica (CTC) a pH 7,0 e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento.	19
Tabela 13 - Valores médios dos totais lixiviados de cálcio (Ca) e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento	19

Tabela 14 - Valores médios dos totais lixiviados de Magnésio (Mg) e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento	20
Tabela 15 - Valores médios dos totais lixiviados de Potássio (K) e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento.....	21
Tabela 16 - Valores médios dos totais lixiviados de sódio (Na) e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento.....	21

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Colunas de PVC de 40 cm fixadas em suporte e sob funis que conduzem o lixiviado para as garrafas coletoras.....	9
---	---

1. INTRODUÇÃO

Biocarvão é um produto constituído por alto teor de carbono (C), formado a partir da pirólise de diferentes tipos de resíduos de biomassa, aquecido sob elevadas temperaturas em ambiente com baixa ou ausente concentração de oxigênio. O termo biocarvão é comumente utilizado para descrever materiais carbonizados para fins de uso como condicionadores de solo (LEHMANN; JOSEPH, 2015).

Os efeitos da adição de biocarvão sobre as propriedades dos solos estão ligados às suas características, que variam de acordo, principalmente, com a matéria prima, as variáveis do processo de pirólise, o tipo de solo e as condições climáticas (JOSEPH et al., 2010). As mudanças na sua estrutura durante o processo de pirólise proporcionam benefícios na sua utilização. A porosidade pode favorecer o crescimento de microrganismos e a capacidade de retenção de água. Os grupos funcionais na superfície do biocarvão podem melhorar os atributos físico-químicos do solo aumentando a capacidade de troca catiônica (CTC) (AL-WABEL et al., 2013). Além disso, biocarvões apresentam conteúdo mineral com capacidade para alterar o pH do solo e ainda fornecer nutrientes para as plantas.

O biocarvão pode ser proveniente de diferentes tipos de biomassa, como por exemplo os resíduos florestais. No Brasil há extensas áreas de cultivo de *Eucalyptus* spp., dada à adaptação deste gênero às condições climáticas predominante na maior parte do território do país. Tal gênero tem sido cultivado para uma série de finalidades, tais como a produção de madeira para moirões, produção de celulose e papel, lenha, dentre outras. Porém, durante o beneficiamento da madeira são gerados resíduos provenientes do descascamento, e como uma finalidade para este material a produção de biocarvão é uma alternativa para a utilização como condicionador de solos.

A produção de biocarvão com a utilização de casca de eucalipto também vem sendo estudada desde 2015 pelo grupo de pesquisa em solos do Departamento de Produção Vegetal da Universidade Federal do Espírito Santo, o material utilizado para a produção do biocarvões é proveniente do acúmulo de resíduos nas unidades de beneficiamento da madeira, com finalidade de uso como moirão. Avaliam-se as características e efeitos de interesse que este material apresenta e proporciona aos solos (BARBOSA, 2016; SILVA, 2017).

Dada a importância da movimentação de nutrientes no perfil de solo para fins de produção vegetal e também de qualidade ambiental o presente trabalho visa assim contribuir com as pesquisas em biocarvões de casca de eucalipto, estudando o deslocamento vertical de nutrientes no solo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar a lixiviação de nutrientes em colunas PVC preenchidas com solo, sob aplicação de biocarvão de casca de eucalipto e calcário na camada superficial.

1.1.2. Objetivos específicos

- Avaliar as alterações químicas ao longo da coluna de solo;
- Determinar os nutrientes deslocados e coletados no lixiviado após as aplicações das lâminas de água.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Casca de eucalipto

O Brasil possui 9,85 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo que 75,2% são de florestas de eucalipto (IBGE, 2018), utilizadas para diversas finalidades devido as suas propriedades químicas e físicas variadas. A necessidade de produtos florestais faz com que o crescimento da produção se apresente contínuo, ao mesmo tempo que durante o processo de beneficiamento da madeira sejam gerados diferentes resíduos (VALE, 2014).

Dentre os resíduos gerados na cadeia produtiva do eucalipto existe a casca de eucalipto, que é gerado principalmente nos processos de colheita para fabricação de poupa celulósica e 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).

Martins et al. (2015) relatam tempo de 330 dias para que pouco mais que 50% dos resíduos de casca de eucalipto sejam decompostos quando deixados no campo. Este fato está relacionado com a semelhança em composição química que este material tem com a própria madeira, conferindo-lhe características que reduzem a sua taxa de decomposição.

Iniciativas do uso e avaliação da aplicação de biocarvão, 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, nestes estudos 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 do biocarvão com o ambiente, inclusive a planta.

2.2. Biocarvão

O termo Biocarvão define um material específico para uso no solo, o seu modo de produção é através do processo de pirolise de materiais orgânicos em ambiente com baixa concentração de oxigênio e temperaturas elevadas. O biocarvão é constituído por alto teor de C e grau de aromaticidade, as estruturas apresentam elevada resistência à degradação (LEHMANN;

JOSEPH, 2015), a depender da matéria prima e das condições de pirolise para se ter a exata composição química e estrutural.

Os benefícios do seu uso estão relacionados às mudanças que ocorrem na estrutura do material (AL-WABEL *et al.*, 2013). A pirólise da biomassa resulta no desenvolvimento de grupos funcionais de superfície que determinam a capacidade de adsorção de íons no biocarvão (SONG; GUO, 2012).

A estrutura sólida dos biocarvões é formada macroscopicamente por duas porções distintas: uma de constituição orgânica e outra mineral.

Porção orgânica - Porção de composição molecular essencialmente orgânica, formada principalmente por uma estrutura sólida de coloração negra, desenvolvida pelo rearranjo completo ou parcial das moléculas orgânicas, originalmente presentes na matéria prima, em função dos processos de carbonização (KEILUWEIT *et al.*, 2010).

Nas superfícies, internas e externas, da porção carbonosa, é possível também haver a presença de resíduos de materiais orgânicos de cadeia alifática oriundos de gases que não foram completamente liberados durante o processo de carbonização, além também da porção mineral (SHEPHERD *et al.*, 2017).

A porção carbonosa macroscopicamente forma uma matriz orgânica que pode possuir poros em uma variedade de dimensões (GRAY *et al.*, 2014) e conseqüentemente também pode desenvolver uma amplitude de valores de área superficial específica (SIGMUND *et al.*, 2017) a depender do tipo de biocarvão produzido. A porção carbonosa também apresenta graus de aromaticidade (proporção de C aromático presente nas formas amorfa e também cristalina) e grau de condensação aromática (proporção de C condensado) (WIEDEMEIER *et al.*, 2015).

A principal fonte de reatividade da estrutura carbonosa está ligada à presença de grupo funcionais, presentes nas extremidades das moléculas orgânicas dos biocarvões, tais como os grupos carboxílicos, hidroxilas e carbonilas (LI *et al.*, 2013; SULIMAN *et al.*, 2017).

Mineral - Porção de composição essencialmente formada por constituintes minerais formados após a perda de água dos tecidos celulares da biomassa que dá origem aos biocarvões. Tal porção é comumente identificada como a massa de cinzas gerada após a carbonização do material e que ficam

impregnadas nos espaços internos e externos da porção carbonosa, sem necessariamente ser facilmente visualizada a olho nu.

2.3. Benefícios do uso do biocarvão

Os biocarvões podem possuir diferentes composições químicas dependendo da temperatura, tempo de carbonização e do tipo biomassa que é utilizada (TROMPOWSKY et al., 2005). O uso desses materiais pode influenciar nas propriedades do solo como, por exemplo, na capacidade de troca catiônica, na densidade, na capacidade de retenção de água, na resistência do solo à penetração das raízes, entre outros (AL-WABEL et al., 2013). Desse modo, o biocarvão tem sido utilizado como condicionador do solo, contribuindo com a melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (TANG et al., 2013).

A aplicação de biocarvão melhora as propriedades de fertilidade do solo, aumenta o pH e a capacidade do solo em reter nutrientes e mantê-los em forma disponível para as plantas (SILVA, 2017). O aumento de biocarvão no solo melhora a retenção de nutrientes que se tornam acessíveis aos microrganismos na superfície da partícula (Lehmann et al., 2011). Ao serem adicionados ao solo, a estrutura porosa do biocarvão pode oferecer microsítios favoráveis ao abrigo de microrganismos (Pietikäinen et al., 2000).

A temperatura de pirólise afeta significativamente a composição estrutural dos biocarvões de tal forma que biocarvões produzidos sob temperaturas mais baixas (abaixo de 300 °C) apresentam composição orgânica semelhante à matéria prima e aqueles produzido sob temperaturas mais elevadas (maiores que 400 °C) apresentam uma maior proporção de estruturas aromáticas (ZHANG; LIU; LIU, 2015) com uma consequente redução de suas fontes de reatividade orgânica.

Biocarvões podem conter ou ainda desenvolver cargas positivas e negativas a partir da presença de grupos funcionais. Grupamentos carboxílicos, álcoois e carbonilas são listados como sítios de desenvolvimento a capacidade de troca de cátions (CTC) dos biocarvões por poderem desenvolver cargas negativas e servirem como base de Lewis para a sorção de cátions do solo. Sendo assim, a aplicação de biocarvões no solo tende a elevar a CTC em solos de baixa fertilidade natural, tais como solos de áreas degradadas ou sob

alto grau de intemperismo como os Latossolos (ANDRADE *et al.*, 2015; CAO *et al.*, 2018; DENYES *et al.*, 2014).

Já as cargas positivas são em menor proporção estudadas e também em menor proporção desenvolvidas nos biocarvões (LAWRINENKO *et al.*, 2016; LAWRINENKO; LAIRD, 2015). Grupos funcionais oxônios, pirimidinas e processo de adsorção não específica de prótons por anéis aromáticos são os responsáveis listados pela capacidade de troca aniônica dos biocarvões.

Já a porção mineral aderida à porção carbonosa possui efeito de calagem e ainda serve como fonte de nutrientes para a nutrição de plantas (SHEPHERD *et al.*, 2017). Minerais tais como: KH_2PO_4 , KCaCl_2 , KHCO_3 , $\text{KMgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, CaCO_3 , KCl (PRAKONGKEP; GILKES; WIRIYAKITNATEEKUL, 2015) são relatados. A disponibilidade destes minerais para a nutrição de plantas, quando aplicado no solo, é por vezes complexa (LIMWIKRAN *et al.*, 2018) e depende, dentre outros fatores externos aos biocarvões, da natureza mineral e da localização destes materiais dentro da estrutura dos biocarvões (PRAKONGKEP; GILKES; WIRIYAKITNATEEKUL, 2015).

3. METODOLOGIA

3.1. Coleta do solo e produção dos biocarvões

As coletas de solo foram realizadas em uma pastagem degradada no município de Alegre-ES, o solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo. Amostras da camada de 0-20 cm de profundidade foram coletadas com o auxílio de um enxadão, aleatoriamente na área para constituir uma amostra composta. O solo foi seco ao ar, destorroado, passado em peneira de 2 mm, armazenado, e realizadas análises físicas e químicas deste solo.

A caracterização física do solo feita da seguinte forma: Silte e argila: Método da pipeta, agitação lenta (Almeida et al. 2012); Ds = Densidade do solo determinada pelo método da proveta e Dp = Densidade de partículas determinada pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997); PT=1-(Ds/Dp) (Tabela 1).

Tabela 1 - Caracterização física dos solos

Areia	Silte	Argila	Ds	Dp	PT
-----g kg ⁻¹ -----			kg dm ⁻³	kg dm ⁻³	m ³ m ⁻³
480	50	470	1,16	2,33	0,5

Para a caracterização química: pH 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 cloreto de cálcio e determinação por titulação; P = fósforo por colorimetria após extração com Mehlich 1; CTC (Capacidade de troca de cátions potencial) = (K/390)+(Na/230)+Ca+Mg+(H+Al) (EMBRAPA, 1997) e COT: carbono orgânico total por oxidação da matéria orgânica via úmida (Yeomans & Bremmer , 1988) (Tabela 2).

Tabela 2 - Caracterização química¹ dos solos

pH H ₂ O	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	COT
	-----mg dm ⁻³ -----			-----cmol _c dm ⁻³ -----					%
4,42	0,82	25,3	3,00	0,35	0,20	0,53	4,04	4,66	1,15

Para a produção de biocarvão foram utilizadas cascas de eucalipto de empresa localizada no Sul do Espírito Santo, da espécie *Eucalyptus urograndis*, coletadas em pátio de depósito desse resíduo oriundo do descacamento da madeira para moirões. O procedimento de pirólise deu-se em reator metálico fechado hermeticamente com capacidade para aproximadamente 60L, modelo SPPT-V60. Foram utilizadas duas temperaturas finais de pirólise (350 e 600 °C) com tempo de residência na temperatura final de 60 min e uma taxa de aquecimento de 12 °C min⁻¹. O tamanho das partículas do biocarvão foram padronizadas para uma classe de 0,5-1 mm. Na tabela 3 são apresentados os dados das características químicas do biocarvão consideradas para esse estudo, caracterizados por Barbosa (2016).

Tabela 3 - Características químicas do biocarvão de casca de eucalipto pirolisados na temperatura de 350 °C e 600 °C

Variáveis	Unidades	Biocarvão de Casca de Eucalipto	
		350 °C	600 °C
pH	-	7,20	8,15
Carga Negativa	cmol _c kg ⁻¹	99,20	19,76
P		0,33	0,44
K		19,12	22,93
Ca	g kg ⁻¹	2,91	3,78
Mg		0,64	0,75

Fonte: Barbosa, 2016.

3.2. Delineamento Experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC) em ambiente controlado com temperatura de ± 25 °C no laboratório de Solos do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo. O ensaio experimental foi assim estabelecido em um delineamento inteiramente casualizado com 5 tratamentos seguindo as combinações de 2 duas doses de biocarvão (5 e 15 t/ha) e duas temperaturas de carbonização (350°C e 600°C), mais um tratamento testemunha sem adição de biocarvão e CaCO₃, com três repetições para cada tratamento.

3.3. Montagem das Colunas de lixiviação

As unidades experimentais foram compostas por colunas montadas com sobreposição de anéis de PVC com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura nos

primeiros 20 cm da coluna, e de 10 cm de altura nos últimos 20 cm da coluna constituindo assim uma coluna com 40 cm, composta de 6 anéis, que foram unidos externamente uns aos outros com uso de silicone.

Os anéis foram ainda internamente revestidos com fita adesiva entre as ligações, para evitar a drenagem preferencial nas paredes. No fundo das colunas, foram fixadas telas de nylon com malha de 1mm para evitar perdas de solo. As colunas com os tratamentos foram colocadas em funis e estes sobre suporte feito com painel de compensado de madeira de forma que ficassem suspensas e que fosse possível a coleta do lixiviado em garrafas (Figura 1).



Figura 1 - Colunas de PVC de 40 cm fixadas em suporte e sob funis que conduzem o lixiviado para as garrafas coletoras.
Fonte: Autora (2019).

Cada coluna recebeu doses de biocarvão juntamente com carbonato de cálcio (CaCO_3) na camada de 0-5 cm em combinação estabelecida a partir de curvas de calagem a fim de alcançar um pH igual a 6 seguindo recomendações de Silva (2017) para todos os tratamentos, com as respectivas combinações (Tabela 4).

Tabela 4 - Doses de biocarvão de casca de eucalipto, e suas respectivas combinações em duas temperaturas de carbonização, e doses de calcário.

Tratamentos	Dose de Biocarvão equivalente	Temperatura do Biocarvão	Dose de Biocarvão	Dose de CaCO ₃
	t ha ⁻¹	°C	----- g -----	
T1	5	350	0,2450	0,1238
T2	15	350	0,7350	0,0965
T3	5	600	0,2450	0,1138
T4	15	600	0,7350	0,0678

3.4. Determinações Experimentais

Durante a condução do experimento foram aplicadas por cinco vezes uma quantidade de água purificada, obtida por osmose reversa, equivalente a 100 mm de chuva, totalizando 500 mm ao final. Em cada aplicação, a solução percolada foi recolhida e teve o volume determinado. Posteriormente, filtrada e realizada a determinação de nutrientes na água. A quantidade de K, Na, Ca e Mg percolada foi determinada por meio das leituras em espectrofotômetro de absorção atômica (Ca e Mg) e fotometria de chama (K e Na).

Após dez dias da primeira aplicação da lâmina de água e coleta da solução lixiviada, as colunas foram desmontadas e separadas em seis partes, com o objetivo de obter amostras de seis camadas 0–5 cm, 5–10 cm, 10–15 cm, 15–20 cm, 20–30 cm e 30–40 cm. O solo coletado de cada camada da coluna foi seco ao ar e passado em peneira de malha de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) e posteriores determinações químicas.

Nas amostras de solo, as seguintes análises químicas foram realizadas: pH em água foi medido por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo:água na proporção de 1:2,5; Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺ trocáveis, extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, na proporção 1:10, sendo o Ca²⁺ e Mg²⁺ por espectrofotômetro de absorção atômica e Na⁺ por fotometria de chama; K disponível por extração com Mehlich⁻¹ (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹), determinado por fotometria de chama; acidez potencial (H+Al) utilizando Ca(OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹, ajustado para pH 7,0, titulado com NaOH 0,0606 mol L⁻¹, conforme EMBRAPA (2017). Com base nas análises químicas dos solos foram calculados a soma de bases e a capacidade de troca catiônica potencial.

3.5. Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade e homocedasticidade, e quando satisfeitas as exigências estatísticas foram então realizadas às análises de variância pelo teste F a 5% de probabilidade. Quando significativos foi aplicado o teste de Scott-Knott à 5% de significância. Para todos os procedimentos estatísticos foi utilizado o Ambiente R (R Core Team, 2017).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Solo

Os valores médios de pH do tratamento controle (Tzero) variaram de 5,4 a 5,6 (Tabela 5), sendo que a faixa considerada ideal para a maioria das culturas está entre 5,5 – 6,0. As camadas superficiais (0-5 cm) do solo que receberam doses de biocarvão e CaCO₃ apresentaram-se estatisticamente superiores ao controle, com pH em torno de 6,0. Tal faixa de valor era esperada dado que as doses foram aplicadas segundo as recomendações de Silva (2017), para o mesmo solo utilizado por este autor a fim de alcançar um pH em água em torno de 6,0.

Tabela 5 - Valores médios de pH do solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15,15-20, 20-30 e 30-40 cm e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento.

Camada cm	Tzero		T1		T2		T3		T4	
	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
0-5	5,43b	0,7%	6,31a	1,4%	6,22a	0,9%	6,25a	1,1%	6,29a	1,3%
5-10	5,47a	0,4%	5,58a	2,1%	5,57a	2,0%	5,65a	0,7%	5,62a	0,7%
10-15	5,44a	0,3%	5,42a	0,2%	5,44a	1,6%	5,51a	1,2%	5,45a	0,8%
15-20	5,41a	2,3%	5,42a	1,3%	5,45a	1,2%	5,49a	0,2%	5,47a	0,7%
20-30	5,48a	0,3%	5,42a	1,4%	5,40a	0,8%	5,51a	1,5%	5,42a	0,3%
30-40	5,60a	0,2%	5,63a	0,7%	5,60a	1,1%	5,62a	1,0%	5,58a	1,0%

Médias seguidas por letras iguais, entre os tratamentos para uma mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Tzero: controle; T1: 5 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T2: 15 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T3: 5 t/ha de biocarvão a 600 °C; T4: 15 t/ha de biocarvão produzido a 600 °C; CV: coeficiente de variação.

É comum a predominância de propriedades alcalinas em biocarvões (FIDEL et al., 2017; YUAN; XU; ZHANG, 2011), segundo as quais Fidel et al. (2017) listam quatro fontes de alcalinidade em biocarvões: grupos funcionais orgânicos de superfície de pKa elevado, compostos orgânicos solúveis, carbonatos e outros compostos inorgânicos. Tais características implicam na indicação de uso destes biocarvões para amenizar efeitos de acidez em solos ácidos e altamente intemperizados (CHINTALA et al., 2014; CORNELISSEN et al., 2018; RABOIN et al., 2016; YUAN; XU, 2011).

Independentemente do tipo de tratamento, verifica-se que os dados das camadas de solo abaixo de 5 cm apresentaram valores de pH menores que 6, estes sendo considerados iguais estatisticamente. Os coeficientes de variação encontrados foram baixos, identificando que os valores de pH das repetições por camada apresentaram pouca dispersão em torno das médias (Tabela 5).

A camada de 0-5 cm para todos os tratamentos com a adição de biocarvão e CaCO_3 alcançaram teores de Ca maiores que $2,0 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ (Tabela 6). Na camada de 5-10 cm os valores foram entre 0,6 e $1,0 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, apenas o T1 e o T3 apresentaram diferença estatística entre o Tzero, com teores de Ca superiores nessa camada para ambos os tratamentos. As camadas 10-15, 15-20 e 20-30 cm não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos estudados, possivelmente devido à um refreamento do deslocamento de Ca presente nas camadas superiores (0-5 e 5-10 cm) que pode inclusive ter influenciado na reduzida concentração de Ca na camada de 30-40 cm dos tratamentos sob biocarvão, cujos teores são inclusive estatisticamente menores que o Tzero.

Tabela 6 - Teores médios de cálcio (Ca) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30 e 30-40 cm do solo e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento

Camada cm	Tzero		T1		T2		T3		T4	
	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	%	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	%	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	%	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	%	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	%
0-5	0,512b	5,0	2,307a	8,2	2,249a	3,2	2,100a	6,5	2,204a	7,2
5-10	0,549b	7,4	0,954a	8,7	0,694b	9,4	0,819a	20,4	0,601b	6,5
10-15	0,452a	14,1	0,429a	8,3	0,366a	5,0	0,353a	12,0	0,321a	24,2
15-20	0,430a	27,4	0,457a	29,8	0,461a	8,7	0,269a	28,6	0,364a	19,7
20-30	0,520a	13,4	0,376a	10,4	0,421a	13,7	0,469a	15,1	0,370a	13,3
30-40	0,599a	2,4	0,469b	22,3	0,359c	10,2	0,382c	6,3	0,344c	9,2

Médias seguidas por letras iguais, entre os tratamentos para uma mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Tzero: controle; T1: 5 t/ha de biocarvão produzido a $350 \text{ }^\circ\text{C}$; T2: 15 t/ha de biocarvão produzido a $350 \text{ }^\circ\text{C}$; T3: 5 t/ha de biocarvão a $600 \text{ }^\circ\text{C}$; T4: 15 t/ha de biocarvão produzido a $600 \text{ }^\circ\text{C}$; CV: coeficiente de variação.

Dentre os tratamentos sob biocarvões apenas o tratamento T1, na camada de 30-40 cm, apresentou teores superiores de Ca em relação aos demais, com diferença significativa. T2, T3 e T4 foram estatisticamente iguais e com os menores teores em relação aos demais tratamentos (Tabela 6).

Comparando os tratamentos T1 e T2, com biocarvões produzidos a mesma temperatura, $350 \text{ }^\circ\text{C}$, verifica-se que a quantidade de Ca na camada de 5-10 e 30-40 cm foram superiores para o T1. Os tratamentos com biocarvões produzidos a temperatura de $600 \text{ }^\circ\text{C}$, T3 e T4, apresentaram diferença significativa apenas na camada 5-10 cm, com teores de Ca mais elevados no T3. Pode-se observar que os tratamentos que indicaram maior teor de Ca na

camada de 5-10 cm foram com doses equivalentes a 5 t/ha e pirolisados a 350 e 600 °C, respectivamente (Tabela 6).

Os biocarvões produzidos a temperatura de 350 °C, T1 e T2, apresentaram maiores valores médios de Ca quando comparados aos tratamentos de mesma dose com biocarvão a 600 °C, T3 e T4, apesar de apresentarem diferença significativa apenas na camada de 30-40 cm entre o T1 e T3 (Tabela 6).

Os teores médios de Mg encontrados no solo de cada tratamento não apresentaram grande variação ao serem contrastados com o Tzero, porém para as camadas 20-30 e 30-40 cm do T1; e 15-20, 20-30 e 30-40 cm dos T2 e T3 os teores de Mg foram estatisticamente inferiores. O T4 não apresentou diferença significativa do teor de Mg em relação ao Tzero para as camadas avaliadas (Tabela 7).

Tabela 7 - Teores médios de magnésio (Mg) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30 e 30-40 cm do solo e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento

Camada cm	Tzero		T1		T2		T3		T4	
	Média cmol _c /dm ³	CV %	Média cmol _c /dm ³	CV %	Média cmol _c /dm ³	CV %	Média cmol _c /dm ³	CV %	Média cmol _c /dm ³	CV %
0-5	0,185a	7,5	0,162a	4,1	0,194a	2,1	0,125b	8,8	0,174a	18,6
5-10	0,203a	3,0	0,199a	2,0	0,199a	9,1	0,177a	7,4	0,197a	13,5
10-15	0,192a	5,3	0,184a	7,1	0,172a	4,2	0,159a	9,2	0,185a	12,3
15-20	0,195a	6,2	0,182a	12,2	0,164b	5,5	0,149b	6,8	0,204a	1,8
20-30	0,212a	5,4	0,172b	3,8	0,157b	2,5	0,167b	5,1	0,197a	7,1
30-40	0,207a	10,7	0,169b	6,7	0,155b	14,0	0,148b	1,4	0,204a	4,2

Médias seguidas por letras iguais, entre os tratamentos para uma mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Tzero: controle; T1: 5 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T2: 15 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T3: 5 t/ha de biocarvão a 600 °C; T4: 15 t/ha de biocarvão produzido a 600 °C; CV: coeficiente de variação.

Ao ser feita a comparação das médias dos tratamentos T1 e o T3, ambos com doses de biocarvão equivalentes a 5 t/ha e, respectivamente, produzidos a temperatura de 350 e 600 °C, o T1 apresentou valores superiores de Mg nas camadas de 0-5 e 15-20 cm (Tabela 7). Esse fato é relatado por Gundale & Deluca (2006), onde biocarvões gerados em temperatura mais baixa podem conter quantidades de nutrientes mais fracamente adsorvidos à estrutura do material quando comparado aos biocarvões gerados em temperatura mais elevada. Dessa forma, os nutrientes que estão contidos nos biocarvões não são totalmente liberados para o solo. Al-Wabel et al. (2013)

explica que o aumento da temperatura de pirolise faz com que também aumente a aromaticidade do biocarvão, dificultando assim a sua degradação. Silva (2017) também encontrou resultados que reforçam, onde observa que biocarvões produzidos nas temperaturas de 350 °C proporcionaram maior concentração de Mg no solo. Porém, os tratamentos T2 e T4 ao serem contrastados não apresentaram como padrão os teores de Mg mais elevados para o solo com aplicação de biocarvão produzido em menor temperatura. As camadas de 15-20,20-30 e 30-40 cm do solo no tratamento T4 com biocarvão produzido a temperatura de 600°C apresentou maior teor de Mg em relação ao T2 de mesma dose de biocarvão (15 t/ha).

A camada superficial, que recebeu diretamente aplicação de biocarvão e CaCO₃, apresentou diferença significativa entre todos os tratamentos, com a seguinte sequência de concentração de potássio (K): T4>T2>T3>T1 (Tabela 8). Os tratamentos T2 e T4 compreendem a doses mais altas de biocarvões aplicadas ao solo, o que condiciona mais teores de K adicionados ao solo, devido a sua quantidade encontrada no biocarvão (Tabela 3).

Tabela 8 - Teores médios de Potássio (K) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15,15-20, 20-30 e 30-40 cm do solo e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento

Camada cm	Tzero		T1		T2		T3		T4	
	Média mg/dm ³	CV %	Média mg/dm ³	CV %	Média mg/dm ³	CV %	Média mg/dm ³	CV %	Média mg/dm ³	CV %
0-5	21,00e	7,8	24,33d	5,1	35,50b	3,4	27,67c	3,4	47,33a	4,3
5-10	28,00c	5,8	30,33c	1,6	37,00b	5,8	32,67c	8,0	45,00a	4,8
10-15	31,00a	7,0	26,33a	4,7	32,00a	7,7	30,00a	7,2	35,67a	9,5
15-20	33,67a	1,4	34,67a	3,6	37,00a	5,8	34,33a	3,6	39,67a	13,7
20-30	36,67a	1,3	37,00a	2,2	38,50a	1,1	36,67a	3,4	40,33a	11,7
30-40	34,33b	3,6	35,00b	4,0	37,67b	1,3	35,67b	1,3	42,00a	8,5

Médias seguidas por letras iguais, entre os tratamentos para uma mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Tzero: controle; T1: 5 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T2: 15 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T3: 5 t/ha de biocarvão a 600 °C; T4: 15 t/ha de biocarvão produzido a 600 °C; CV: coeficiente de variação.

Teores mais altos de K para o tratamento T4 (Tabela 8) podem ser um reflexo da maior concentração deste elemento nos biocarvões produzidos à 600 °C (Tabela 3), constatado por Barbosa (2016). Maiores concentrações de nutrientes são esperadas em biocarvões produzidos a maior temperatura, já que o conteúdo mineral tende a se manter constante para diferentes temperaturas, porém as perdas em conteúdo orgânico são maiores,

condicionando assim uma maior concentração da fração mineral por massa de biocarvão.

A acidez potencial (H+Al) do solo, na camada superficial (0-5 cm) para todos os tratamentos apresentaram valores inferiores ao Tzero, as demais camadas avaliadas de cada tratamento não apresentaram diferença significativa (Tabela 9). O fato de os efeitos de pH terem se concentrado na camada de aplicação dos biocarvões, indica a reduzida ou mesmo ausente movimentação em sentido vertical do material. A movimentação de biocarvão no solo é função da dimensão de partículas e também da granulometria e condutividade hidráulica do solo (OBIA et al., 2017), contudo Obia et al. (2017) trabalhando com solos com alto conteúdo de areia a movimentação do mesmo, ainda que de biocarvões de granulometria fina (<0,5), é limitada.

Tabela 9: Valores médios de acidez potencial (H+Al) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30 e 30-40 cm do solo e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento

Camada cm	Tzero		T1		T2		T3		T4	
	Média cmol _e /dm ³	CV %	Média cmol _e /dm ³	CV %	Média cmol _e /dm ³	CV %	Média cmol _e /dm ³	CV %	Média cmol _e /dm ³	CV %
0-5	4,125a	3,3	2,943b	27,5	2,640b	5,1	2,255b	3,4	2,805b	22,9
5-10	4,043a	6,0	3,685a	6,4	3,438a	10,8	3,630a	9,8	3,795a	1,8
10-15	4,043a	4,4	4,290a	6,3	3,960a	0,0	3,960a	3,5	3,548a	15,1
15-20	3,685a	8,6	4,620a	16,2	4,098a	4,1	3,740a	4,2	3,218a	21,2
20-30	4,153a	5,2	4,015a	7,0	3,960a	3,4	3,850a	5,3	3,520a	17,7
30-40	4,648a	29,9	3,520a	24,9	3,575a	8,7	3,768a	1,0	3,603a	12,5

Médias seguidas por letras iguais, entre os tratamentos para uma mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Tzero: controle; T1: 5 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T2: 15 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T3: 5 t/ha de biocarvão a 600 °C; T4: 15 t/ha de biocarvão produzido a 600 °C; H+Al: acidez potencial; CV: coeficiente de variação.

O fato ocorrido também implica ainda na redução dos efeitos de acidez potencial do solo terem se concentrado também na camada superficial, onde por um lado o Al trocável é neutralizado para valores de pH acima de 5,3-5,4 e parte dos prontos H⁺ são substituídos no sítios de carga negativa do solo pelas bases adicionadas via biocarvão e CaCO₃.

Os teores médios de sódio (Na) correspondentes a camada superficial encontram-se mais elevado no T4. Na camada de 5-10 cm do solo, os T2, T3 e T4 apresentam maior concentração de sódio. As camadas 10-15 e 15-20 cm do solo, independente do tratamento, não apresentaram diferenças significativas. A camada de 20-30 cm do solo, para os T2 e T4, teve concentração mais

elevada de Na. A camada mais profunda apresentou maior concentração deste para o T2 (Tabela 10).

Tabela 10 - Teores médios de sódio (Na) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15,15-20, 20-30 e 30-40 cm do solo e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento

Camada cm	Tzero		T1		T2		T3		T4	
	Média mg/dm ³	CV %	Média mg/dm ³	CV %	Média mg/dm ³	CV %	Média mg/dm ³	CV %	Média mg/dm ³	CV %
0-5	2,67b	35,4	2,67b	35,4	3,33b	14,1	4,00b	20,4	6,33a	7,4
5-10	2,00b	0,0	2,33b	20,2	3,33a	14,1	3,00a	0,0	3,33a	14,1
10-15	2,00a	0,0	2,33a	20,2	3,33a	14,1	2,33a	20,2	2,33a	20,2
15-20	2,00a	0,0	2,33a	20,2	3,33a	14,1	2,33a	20,2	3,00a	27,2
20-30	2,33b	20,2	2,67b	17,7	5,00a	0,0	2,33b	20,2	4,00a	20,4
30-40	3,00c	0,0	3,00c	0,0	4,67a	10,1	3,00c	0,0	4,00b	0,0

Médias seguidas por letras iguais, entre os tratamentos para uma mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Tzero: controle; T1: 5 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T2: 15 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T3: 5 t/ha de biocarvão a 600 °C; T4: 15 t/ha de biocarvão produzido a 600 °C; H+Al: acidez potencial; CV: coeficiente de variação.

A movimentação da fração mineral dos próprios biocarvões, principal responsável pelo conteúdo de Ca, Mg, K e Na, pode assim ser por um lado limitada à camada de aplicação dos biocarvões em função da rede de grupamentos funcionais ali presentes. Neste caso, a movimentação de nutrientes presentes nos biocarvões, depende da liberação destas substâncias minerais do arranjo carbonoso, seja na forma de partículas cristalinas ou mesmo na forma de íons, para o solo, sendo ainda que tal liberação é função do grau de solubilidade segundo o tipo de substância formada e da localização que estas substâncias estão nos biocarvões (LIMWIKRAN et al., 2018; PRAKONGKEP; GILKES; WIRIYAKITNATEEKUL, 2015).

Assim, por exemplo, o Ca, que apresentou dados que indicam aumento dos teores desse elemento na camada de 5-10 cm pode ser um efeito da movimentação do CaCO_3 no solo. Seguindo o raciocínio de forma semelhante ao de Amaral et al. (2004), a dissolução dos minerais dos constituintes do CaCO_3 aplicado no solo pode saturar a água infiltrada com os íons Ca^{2+} e HCO_3^- e, assim, à medida que o produto de solubilidade seja excedido e outras condições necessárias estejam presentes, por exemplo a redução de umidade do solo após o final de aplicações de água, os referidos íons podem novamente precipitar na camada inferior, com consequente detecção de maiores teores de Ca na camada de 5-10 cm (Tabela 6).

Os valores médios de soma de bases (SB) para a camada superior apresentaram-se mais elevados para os tratamentos com a adição de biocarvão, em relação ao Tzero. Nas camadas de 5-10 cm, os T1 e T3 apresentaram valores elevados de SB em relação aos outros. Nas profundidades de 10 a 30 cm não foram observadas diferenças significativas. A camada mais profunda apresentou SB superior no Tzero em relação aos demais tratamentos (Tabela 11).

Tabela 11: Valores médios da Soma de Bases (SB) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30 e 30-40 cm do solo e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento.

Camada cm	Tzero		T1		T2		T3		T4	
	Média mg/dm ³	CV %	Média mg/dm ³	CV %	Média mg/dm ³	CV %	Média mg/dm ³	CV %	Média mg/dm ³	CV %
0-5	0,76b	5,7	2,54a	7,9	2,55a	3,0	2,31a	5,8	2,53a	7,2
5-10	0,83b	5,9	1,24a	6,9	1,00b	6,5	1,09a	15,4	0,93b	2,9
10-15	0,73a	8,2	0,69a	7,2	0,63a	3,5	0,60a	9,8	0,61a	13,1
15-20	0,72a	16,6	0,74a	21,0	0,73a	5,6	0,52a	15,9	0,68a	12,3
20-30	0,84a	9,3	0,65a	6,6	0,70a	7,7	0,74a	11,2	0,69a	8,0
30-40	0,91a	4,1	0,74b	15,1	0,63b	5,7	0,63b	4,0	0,67b	4,4

Médias seguidas por letras iguais, entre os tratamentos para uma mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Tzero: controle; T1: 5 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T2: 15 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T3: 5 t/ha de biocarvão a 600 °C; T4: 15 t/ha de biocarvão produzido a 600 °C; H+Al: acidez potencial; CV: coeficiente de variação.

Os valores de CTC potencial do solo não apresentaram diferença estatística para nenhuma das camadas avaliadas (Tabela 12). A limitada movimentação de biocarvões no sentido vertical do solo limita assim também a abrangência dos efeitos da fração carbonosa, por exemplo o aumento em CTC no solo em função dos grupamentos funcionais presentes nestes materiais. Yuan, Xu e Zhang (2011b), por exemplo, destacam os grupamentos –COO (–COOH) e –O (–OH) como contribuintes para a alcalinidade dos biocarvões, sendo inclusive responsáveis pelas cargas negativas dos biocarvões.

Tabela 12: Valores médios da capacidade de troca catiônica (CTC) a pH 7,0 e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento.

Camada cm	Tzero		T1		T2		T3		T4	
	Média cmol _c /dm ³	CV %	Média cmol _c /dm ³	CV %	Média cmol _c /dm ³	CV %	Média cmol _c /dm ³	CV %	Média cmol _c /dm ³	CV %
0-5	4,88a	3,4	5,47a	14,2	5,17a	2,0	4,55a	3,0	5,30a	11,3
5-10	4,87a	4,6	4,91a	4,1	4,43a	7,5	4,71a	4,1	4,71a	1,1
10-15	4,77a	3,9	4,97a	5,8	4,58a	0,4	4,52a	3,1	4,14a	12,7
15-20	4,40a	9,0	5,35a	12,1	4,82a	4,2	4,25a	5,6	3,89a	19,3
20-30	4,98a	4,5	4,66a	6,0	4,64a	4,1	4,58a	6,3	4,19a	16,0
30-40	5,54a	25,1	4,25a	20,6	4,19a	7,4	4,39a	1,4	4,26a	11,1

Médias seguidas por letras iguais, entre os tratamentos para uma mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Tzero: controle; T1: 5 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T2: 15 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T3: 5 t/ha de biocarvão a 600 °C; T4: 15 t/ha de biocarvão produzido a 600 °C; H+Al: acidez potencial; CV: coeficiente de variação.

4.2. Lixiviado

A primeira aplicação de água nas colunas de solo apresentou as perdas mais altas de Ca, correspondendo a 31,1% (Tzero), 40,8% (T1), 37,2% (T2), 34,9% (T3), 40,9% (T4) do total lixiviado de cada tratamento. Porém, independente do tratamento as perdas de Ca por lixiviação não apresentaram diferença significativa para nenhuma aplicação (Tabela 13).

Tabela 13 - Valores médios dos totais lixiviados de cálcio (Ca) e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento

Lixiviado	Tzero		T1		T2		T3		T4	
	Média mg	CV %	Média mg	CV %	Média mg	CV %	Média mg	CV %	Média mg	CV %
1	1,397a	1,1	2,029a	5,2	1,846a	4,7	1,726a	11,3	1,890a	29,6
2	0,974a	26,6	0,741a	7,6	0,885a	23,1	1,116a	20,3	0,931a	10,8
3	0,785a	27,1	0,805a	1,5	0,866a	12,4	0,807a	23,7	0,707a	31,7
4	0,681a	8,4	0,695a	18,8	0,772a	18,2	0,608a	9,6	0,567a	11,9
5	0,656a	11,9	0,701a	12,5	0,599a	21,7	0,684a	7,9	0,529a	9,9
Total	4,494	-	4,971	-	4,968	-	4,941	-	4,623	-

Médias seguidas por letras iguais, entre os tratamentos para um mesmo lixiviado, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Tzero: controle; T1: 5 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T2: 15 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T3: 5 t/ha de biocarvão a 600 °C; T4: 15 t/ha de biocarvão produzido a 600 °C; CV: coeficiente de variação.

O Tzero apresentou um decréscimo de perda de Ca com o avançar das aplicações, assim como o T2, que foi aplicado ao solo dose equivalente a 15 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C, e o T4, dose equivalente a 15 t/ha de biocarvão produzido a 600 °C. O T1 apresentou na primeira aplicação uma perda média maior do que os outros tratamentos, 2,029 mg de Ca equivalente

a 40,8% do total de Ca perdido neste tratamento, bem como na última aplicação de água, 0,701 mg de Ca correspondente a 14,1% (Tabela 13).

O total de perda de Ca por tratamento seguiu a seguinte ordem: T1>T2>T3>T4, com uma média total de maior e menor por lixiviação, respectivamente, de 4,971 e 4,623 mg de Ca (Tabela 13).

Os valores médios de perda de Mg por lixiviação na primeira aplicação de água ao solo foram elevados para todos os tratamentos com aplicação de biocarvão, variando de 0,526 a 0,653 mg de Mg, com perdas percentuais equivalentes a 31,9% (Tzero), 43,1% (T1), 37,0% (T2), 37,3% (T3) e 40,7% (T4). As demais aplicações de água ao solo não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos na perda desse nutriente (Tabela 14).

Tabela 14 - Valores médios dos totais lixiviados de Magnésio (Mg) e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento

Lixiviado	Tzero		T1		T2		T3		T4	
	Média mg	CV %	Média mg	CV %	Média mg	CV %	Média mg	CV %	Média mg	CV %
1	0,398c	5,8	0,653a	5,4	0,526b	3,1	0,561b	7,2	0,557b	11,1
2	0,264a	15,5	0,254a	5,1	0,278a	10,9	0,308a	13,1	0,300a	5,9
3	0,223a	8,8	0,218a	14,0	0,234a	12,8	0,227a	12,1	0,184a	21,3
4	0,182a	2,5	0,179a	19,3	0,197a	23,2	0,197a	8,1	0,162a	13,5
5	0,183a	2,5	0,211a	27,0	0,188a	20,5	0,213a	15,4	0,166a	32,4
Total	1,250	-	1,515	-	1,422	-	1,507	-	1,370	-

Médias seguidas por letras iguais, entre os tratamentos para um mesmo lixiviado, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Tzero: controle; T1: 5 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T2: 15 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T3: 5 t/ha de biocarvão a 600 °C; T4: 15 t/ha de biocarvão produzido a 600 °C; CV: coeficiente de variação.

Os valores médios perdidos de K na primeira aplicação de água variam de 1,8 a 2,1 mg para os tratamentos com adição de biocarvão, porém estes como o restante perdido por lixiviação, independente da aplicação, não apresentaram diferenças significativas entre o tratamento controle (tabela 15). A primeira aplicação da coluna de água apresentou maiores perdas por lixiviação para todos os tratamentos, com percentual de perda maiores que 30% em relação ao total de cada um.

Tabela 15 - Valores médios dos totais lixiviados de Potássio (K) e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento.

Lixiviado	t zero		T1		T2		T3		T4	
	Média mg	CV %	Média mg	CV %	Média mg	CV %	Média mg	CV %	Média mg	CV %
1	1,597a	5,5	2,141a	3,5	1,887a	2,9	2,033a	0,6	1,963a	15,2
2	1,160a	10,1	1,164a	5,6	1,364a	8,6	1,271a	7,0	1,257a	2,3
3	0,960a	6,5	0,976a	8,1	0,988a	2,3	0,988a	9,9	0,966a	22,2
4	0,814a	3,7	0,853a	15,7	0,964a	6,5	0,941a	10,2	0,936a	11,5
5	0,789a	4,1	0,856a	7,0	0,881a	3,3	0,839a	6,2	0,685a	21,2
Total	5,319	-	5,990	-	6,083	-	6,072	-	5,808	-

Médias seguidas por letras iguais, entre os tratamentos para um mesmo lixiviado, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Tzero: controle; T1: 5 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T2: 15 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T3: 5 t/ha de biocarvão a 600 °C; T4: 15 t/ha de biocarvão produzido a 600 °C; CV: coeficiente de variação.

A perda de Na por lixiviação foi mais elevada nos tratamentos com adição de biocarvão na primeira aplicação de água ao solo, com perda por lixiviação de 54,6% (T1), 40,3% (T2), 47,4% (T3) e 39,7% (T4) para cada lixiviado total por tratamento, com valores médios entre 0,974 e 1,165 mg de Na (Tabela 16). Na segunda aplicação de água, a perda por lixiviação para os tratamentos com adição de biocarvão variou entre 0,385 a 0,641 mg de Na, o T4 (21,8%) apresentou maior perda, seguido do T3 (22,8%), T2 (21,0%) e T1 (19,1%). A lixiviação de Na para todos os tratamentos foi decrescente ao decorrer das aplicações água. Sendo que o T4 para todas as aplicações teve maior perda de Na por lixiviação.

Tabela 16 - Valores médios dos totais lixiviados de sódio (Na) e seus respectivos coeficientes de variação para cada tratamento.

Lixiviado	t zero		T1		T2		T3		T4	
	Média mg	CV %	Média mg	CV %	Média mg	CV %	Média mg	CV %	Média mg	CV %
1	0,715b	12,7	1,097a	7,1	0,974a	2,7	1,096a	1,1	1,165a	3,4
2	0,389c	8,7	0,385c	5,4	0,507b	10,1	0,528b	12,9	0,641a	3,8
3	0,246b	5,5	0,255b	8,0	0,361a	12,7	0,353a	7,8	0,429a	19,2
4	0,131d	15,8	0,152d	8,0	0,308b	2,9	0,224c	19,8	0,430a	8,8
5	0,109b	19,4	0,120b	13,0	0,270a	20,9	0,112b	10,7	0,270a	21,5
Total	1,590	-	2,010	-	2,419	-	2,312	-	2,935	-

Médias seguidas por letras iguais, entre os tratamentos para um mesmo lixiviado, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Tzero: controle; T1: 5 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T2: 15 t/ha de biocarvão produzido a 350 °C; T3: 5 t/ha de biocarvão a 600 °C; T4: 15 t/ha de biocarvão produzido a 600 °C; CV: coeficiente de variação.

Os tratamentos sob biocarvão e CaCO_3 perderam maior quantidade de nutrientes por lixiviação do que o tratamento controle. Levando-se em

consideração o total de cada nutriente contido para cada coluna de solo após a aplicação do biocarvão os seguintes percentuais de perdas por lixiviação foram encontrados, para o T1 foi perdido 19% de K, 8% de Mg e 4% Ca, para o T2 o K com 17%, o Mg 8% e o Ca 5%, para o T3 houve um decréscimo de 16% de K, 9% de Mg e 5% de Ca, e para o T4 redução em 15% de K, 7% Mg e 5% de Ca.

A introdução de biocarvão e CaCO_3 pode ter influenciado o percentual de perdas por lixiviação, podendo os nutrientes que foram aplicados aos solos terem percolado pela coluna, dado que estes tratamentos apresentaram uma perda total maior do que o tratamento controle.

5. CONCLUSÕES

A introdução de biocarvão de casca de eucalipto sob o solo apresentou maior efeito positivo na camada superficial onde, juntamente com CaCO_3 , foi incorporado.

Os elementos lixiviados, Ca, Mg, K e Na, apresentaram maior perda para os tratamentos sob biocarvão de casca de eucalipto e CaCO_3 em relação ao controle.

Por um lado, o biocarvão tem propriedade de correção da acidez e fonte de nutrientes para as plantas, por outro lado a aplicação deste material ao solo pode ser otimizada a fim de reduzir ou até mesmo eliminar as perdas dessas propriedades para camadas fora do alcance das raízes e para o lençol freático, para isso sendo necessário também aplicação deste em profundidade.

6. REFERÊNCIAS

AL-WABEL, M. I. et al. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. **Bioresource Technology**, v. 131, p. 374–379, 1 mar. 2013.

AMARAL, A. S. et al. **Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto**. 2004

ANDRADE, C. A. DE *et al.* Mineralização e efeitos de biocarvão de cama de frangosobre a capacidade de troca catiônica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 5, p. 407–416, maio 2015.

ANDRADE, M. C. N. de. et al. 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.

BARBOSA, C. F. **Caracterização de biocarvões de palha de café e casca de eucalipto produzidas a 350 e 600°C**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.

CAO, Y. *et al.* Biochar-enhanced composts reduce the potential leaching of nutrients and heavy metals and suppress plant-parasitic nematodes in excessively fertilized cucumber soils. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 25, n. 8, p. 7589–7599, mar. 2018.

CHINTALA, R. et al. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 60, n. 3, p. 393–404, 4 mar. 2014.

CORNELISSEN, G. et al. Fading positive effect of biochar on crop yield and soil acidity during five growth seasons in an Indonesian Ultisol. **Science of The Total Environment**, v. 634, p. 561–568, 1 set. 2018.

DENYES, M. J. *et al.* Physical, Chemical and Biological Characterization of Six Biochars Produced for the Remediation of Contaminated Sites. **Journal of Visualized Experiments : JoVE**, n. 93, 28 nov. 2014.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, 2017. 212p.

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

GRAY, M. *et al.* Water uptake in biochars: The roles of porosity and hydrophobicity. **Biomass and Bioenergy**, v. 61, p. 196–205, 1 fev. 2014.

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

IBGE | Agência de Notícias | Pevs 2017: produção da silvicultura e da extração vegetal chega a R\$ 19,1 bilhões e cresce 3,4% em relação a 2016.

Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/22620-pevs-2017-producao-da-silvicultura-e-da-extracao-vegetal-chega-a-r-19-1-bilhoes-e-cresce-3-4-em-relacao-a-2016>>. Acesso em: 9 dez. 2018.

JOSEPH, S. D. et al. An investigation into the reactions of biochar in soil. **Soil Research**, v. 48, n. 7, p. 501–515, 19 out. 2010.

KEILUWEIT, M. *et al.* Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 4, p. 1247–1253, 15 fev. 2010.

LAWRINENKO, M. *et al.* Accelerated aging of biochars: Impact on anion exchange capacity. **Carbon**, v. 103, p. 217–227, jul. 2016.

LAWRINENKO, M.; LAIRD, D. A. Anion exchange capacity of biochar. v. 17, n. 9, p. 4628–4636, 1 set. 2015.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. [s.l.] Routledge, 2015.

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. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011. doi: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022.

LIMWIKRAN, T. *et al.* Dissolution of K, Ca, and P from biochar grains in tropical soils. **Geoderma**, v. 312, p. 139–150, 15 fev. 2018.

LI, X. *et al.* Functional Groups Determine Biochar Properties (pH and EC) as Studied by Two-Dimensional ¹³C NMR Correlation Spectroscopy. **PLOS ONE**, v. 8, n. 6, p. e65949, 19 jun. 2013.

MARTINS, N. P. et al. 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.

OBIA, A. et al. Vertical and lateral transport of biochar in light-textured tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 165, p. 34–40, 1 jan. 2017.

PETTER, F. A. et al. **Biochar como condicionador de substrato para a produção de mudas de eucalipto**. **Revista Caatinga**, v. 25, p. 44-51, 2012.

PIETIKÄINEN, J.; KIIKKILÄ, O.; FRITZE, H. Charcoal as a Habitat for Microbes and Its Effect on the Microbial Community of the Underlying Humus. **Oikos**, v. 89, n. 2, p. 231- 242, 2000.

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, 1 out. 2015.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2017.

SHEPHERD, J. G. *et al.* Biochar and enhanced phosphate capture: Mapping mechanisms to functional properties. **Chemosphere**, v. 179, p. 57–74, 1 jul. 2017.

SIGMUND, G. *et al.* Biochar total surface area and total pore volume determined by N₂ and CO₂ physisorption are strongly influenced by degassing temperature. **Science of The Total Environment**, v. 580, p. 770–775, 15 fev. 2017.

SILVA, R. W. da. **Biocarvões de palha de café e casca de eucalipto produzidos a 350 e 600°C como condicionadores do solo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Departamento de Produção Vegetal, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo.

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

SULIMAN, W. *et al.* The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. **Science of The Total Environment**, v. 574, p. 139–147, 1 jan. 2017.

TAG, A. T. *et al.* Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 120, p. 200–206, 1 jul. 2016.

TANG, J.; ZHU, W.; KOOKANA, R.; KATAYAMA, A. **Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil**. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, v. 116, n. 6, p. 653–659, 2013.

TROMPOWSKY, P. M.; BENITES, V. D. M.; MADARI, B. E.; PIMENTA, A. S.; HOCKADAY, W. C. Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of eucalyptus charcoal. **Organic Geochemistry**, v. 36, n. 3, p. 1480 - 1489, 2005.

VALE, A. B. do *et al.* (Ed.). **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 2014. 552 p.

WIEDEMEIER, D. B. *et al.* Aromaticity and degree of aromatic condensation of char. **Organic Geochemistry**, v. 78, p. 135–143, 1 jan. 2015.

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

YUAN, J.-H.; XU, R.-K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 110–115, 2011.

YUAN, J.-H.; XU, R.-K.; ZHANG, H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 3, p. 3488–3497, 1 fev. 2011a.

YUAN, J.-H.; XU, R.-K.; ZHANG, H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 3, p. 3488–3497, 1 fev. 2011b.

ZHANG, J.; LIU, J.; LIU, R. Effects of pyrolysis temperature and heating time on biochar obtained from the pyrolysis of straw and lignosulfonate. **Bioresource Technology**, v. 176, p. 288–291, 1 jan. 2015.