



TAIS REGINA LIMA ABREU VEIGA

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE BIOCHARS DE
RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA PARA RECUPERAÇÃO
DE VOÇOROCAS**

**LAVRAS – MG
2021**

TAÍS REGINA LIMA ABREU VEIGA

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE BIOCHARS DE RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA
PARA RECUPERAÇÃO DE VOÇOROCAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. José Tarcísio Lima
Orientador

**LAVRAS-MG
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Veiga, Taís Regina Lima Abreu.

Potencial de utilização de biochars de resíduos da
agroindústria para recuperação de voçorocas / Taís Regina Lima
Abreu Veiga. - 2021.

91 p. : il.

Orientador(a): José Tarcísio Lima.

Coorientador(a): Paulo Fernando Trugilho, Jenaina Ribeiro
Soares.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Biocarvão. 2. Biomassa vegetal. 3. Fertilidade do solo. I.
Lima, José Tarcísio. II. Trugilho, Paulo Fernando. III. Soares,
Jenaina Ribeiro. IV. Título.

TAÍS REGINA LIMA ABREU VEIGA

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE BIOCHARS DE RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA
PARA RECUPERAÇÃO DE VOÇOROCAS**

**POTENTIAL FOR THE USE OF AGRO-INDUSTRIAL WASTE BIOCHARS FOR THE
RECOVERY OF WALLS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Doutor.

Aprovada em 29 de junho de 2021.

Paulo Fernando Trugilho UFLA
Carlos Alberto Silva UFLA
Fernando Palha Leite Cenibra S.A.
Franciane Andrade de Pádua UFSCAR

Prof. Dr. José Tarcísio Lima
Orientador

**LAVRAS-MG
2021**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela sabedoria e por me dar forças nos momentos mais improváveis e difíceis da elaboração e execução desta tese.

À Universidade Federal de Lavras e ao departamento de Ciência e Tecnologia da Madeira por proporcionar toda estrutura necessária para realização do trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira pela oportunidade.

À CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

Agradeço ao meu Orientador, Prof. José Tarcísio pela confiança, incentivo e pelo de exemplo de trabalho e dedicação. Gratidão por todos os ensinamentos!

Ao prof. Paulo Trugilho pelo apoio, por me fazer acreditar que seria possível realizar este trabalho.

Ao prof. Carlos Alberto pela prontidão, disponibilidade e por confiar que este trabalho seria diferente.

Professores sem o apoio de vocês eu não teria tido forças para finalizar esta jornada.

Agradeço ao meu marido Daniel, pelo carinho e suporte.

Ao meu filho Filipe, por me dar milhões de motivo para sorrir e lutar a cada nascer do sol.

Agradeço às minhas irmãs Anelise e Isamara, e aos meus pais Antônio e Carmen por ser meu porto seguro.

Agradeço aos colegas de trabalho da CTM pelo companheirismo e por toda ajuda na execução do trabalho.

Gratidão

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de utilização de biochars produzidos com resíduos da agroindústria no processo de recuperação de voçorocas. De forma específica: (i) caracterizar química e fisicamente biochars produzidos a partir de resíduos da agroindústria em diferentes temperaturas, (ii) avaliar as modificações ocorridas no solo-sedimento após sua aplicação e (iii) avaliar o efeito do biochar no desenvolvimento da planta indicadora capim *Vetiveria zizanioides* L. Para melhor condução e execução, a tese foi desenvolvida em duas etapas. Na primeira etapa foram produzidos biochars de casca de café (CC), cama de frango (CF), bagaço de cana-de-açúcar (BC) e palha de milho (PM), nas temperaturas de 350 e 450°C. Os materiais foram avaliados quanto às suas características químicas e físicas. Os resultados obtidos indicam que houve influência da temperatura nas propriedades químicas e físicas dos biochars. Os biochars CC e CF apresentaram maior teor de nutrientes, capacidade de troca de cátions (CTC), condutividade elétrica e cinzas, o que demonstra maior potencial para corrigir as deficiências nutricionais do solo. Os biochars de BC e PM apresentaram maior teor de carbono e grupos aromáticos, indicando ser mais adequados para imobilização de nutrientes no solo e aumento da CTC. Na segunda etapa, foi coletado, no horizonte C, solo-sedimento de uma voçoroca ativa, que também foi caracterizado quanto aos seus atributos físicos e químicos. O solo-sedimento foi incubado por 30 dias com diferentes doses de biochars, a fim de avaliar o efeito dos tratamentos sobre a fertilidade do mesmo. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, composto por 5 biochars, sendo 2 puros (CC e CF) + 3 misturas (CC+CF, CC+BC, CF+BC) x 6 concentrações (5 diferentes concentrações v/v (0,5;1;2;5;10%) + controle) x 4 repetições, totalizando 104 amostras. A planta indicadora utilizada foi o capim *Vetiveria zizanioides* L, que foi avaliado quanto ao seu desenvolvimento em parte aérea e raiz. Houve aumento significativo na fertilidade do solo-sedimento à medida que se elevou a concentração dos biochars. Os melhores resultados do teste de incubação foram para os tratamentos CF, CC+CF, CC, principalmente devido a grande quantidade de cinzas e nutrientes presentes neste tipo de biochar, que promoveu aumentos consideráveis no pH, na quantidade de fósforo e potássio disponível. Com relação ao efeito dos tratamentos sobre desenvolvimento da planta indicadora, CC+BC e CF+BC, principalmente a 5%, foram os que apresentaram os melhores resultados, proporcionando aumento de até quatro vezes na quantidade de massa seca total das plantas.

Palavras-chave: Biocarvão. Biomassa vegetal. Fertilidade do solo. Imobilização de carbono. Erosão.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the potential use of biochars produced with agro-industrial residues in the gully's recovery process. Specifically: (i) chemically and physically characterize biochars produced from agro-industrial residues at different temperatures, (ii) evaluate the modifications that occurred in the soil-sediment after its application and (iii) evaluate the effect of biochar on plant development indicator grass *Vetiveria zizanioides* L. For better conduction and execution, the thesis was developed in two stages. In the first stage, coffee husk biochars (CC), chicken litter (CF), sugarcane bagasse (BC) and corn straw (PM) were produced at temperatures of 350 and 450°C. The materials were evaluated for their chemical and physical characteristics. The results obtained indicate that there was influence of temperature on the chemical and physical properties of biochars. The CC and CF biochars showed higher nutrient content, cation exchange capacity (CTC), electrical conductivity and ash, which demonstrates greater potential to correct soil nutritional deficiencies. BC and PM biochars had higher carbon content and aromatic groups, indicating that they are more suitable for soil nutrient immobilization and CTC increase. In the second stage, soil-sediment from an active gully was collected, at horizon C, which was also characterized in terms of its physical and chemical attributes. The soil-sediment was incubated for 30 days with different doses of biochars, in order to evaluate the effect of the treatments on its fertility. The experimental design was completely randomized, consisting of 5 biochars, 2 pure (CC and CF) + 3 mixtures (CC+CF, CC+BC, CF+BC) x 6 concentrations (5 different concentrations v/v (0, 5.1;2;5;10%) + control) x 4 repetitions, totaling 104 samples. The indicator plant used was the grass *Vetiveria zizanioides* L, which was evaluated for its development in aerial part and root. There was a significant increase in soil-sediment fertility as the concentration of biochars increased. The best results of the incubation test were for the treatments CF, CC+CF, CC, mainly due to the large amount of ash and nutrients present in this type of biochar, which promoted considerable increases in pH, in the amount of phosphorus and potassium available. Regarding the effect of treatments on indicator plant development, CC+BC and CF+BC, mainly at 5%, were the ones that showed the best results, providing an increase of up to four times in the amount of total plant dry mass.

Keywords: Biochar. Plant biomass. Soil fertility. Carbon immobilization. Erosion.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Imagem ilustrativa de uma voçoroca..... | 15 |
| Figura 2 - Perda de massa em função da temperatura dos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar (BC), palha de milho (PM), casca de café (CC) e cama de frango (CF)..... | 40 |
| Figura 3 - Perda de massa em função da temperatura dos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar (BC), palha de milho (PM), casca de café (CC) e cama de frango (CF) pirolisados a 350 e 450°C. | 41 |
| Figura 4 - Espectros de FTIR dos biochars de bagaço de cana-de-açúcar (BC), casca de café (CC), cama de frango (CF) e palha de milho (PM), nas temperaturas de 350 e 450°C. | 42 |
| Figura 5 - Microscopia eletrônica de varredura dos biochars produzidos..... | 44 |
| Figura 6 - Localização da Voçoroca..... | 57 |
| Figura 7 - Voçoroca, Fazenda Samambaia, Santo Antônio do Amparo-MG..... | 58 |
| Figura 8 - Planta indicadora..... | 61 |
| Figura 9 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CF+CC) sobre o pH do solo-sedimento..... | 64 |
| Figura 10 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a quantidade de Al ³⁺ do sol. | 65 |
| Figura 11 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a CTC (capacidade de troca de cátions) do solo-sedimento..... | 67 |
| Figura 12 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a matéria orgânica do solo-sedimento. | 69 |
| Figura 13 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a quantidade de fósforo do solo-sedimento. | 71 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 14 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a quantidade de potássio do solo-sedimento. | 73 |
| Figura 15 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a quantidade de cálcio do solo-sedimento... .. | 75 |
| Figura 16 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a quantidade de magnésio do solo-sedimento. | 77 |
| Figura 17 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a massa seca de raiz do capim <i>Vetiveria zizanioides</i> L. | 79 |
| Figura 18 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a massa seca de parte aérea do capim <i>Vetiveria zizanioides</i> L. | 81 |
| Figura 19 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a massa seca total do capim <i>Vetiveria zizanioides</i> L. | 82 |

SUMARIO

| | | |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| | CAPITULO 1 INTRODUÇÃO GERAL..... | 12 |
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO..... | 14 |
| 2.1 | Solos degradados | 14 |
| 2.2 | Biochar..... | 16 |
| 2.3 | Efeito da matéria prima nas propriedades dos biochars..... | 17 |
| 2.4 | Efeito das condições de pirólise..... | 17 |
| 2.5 | Aplicação e efeitos do biochar no solo..... | 19 |
| | REFERENCIA | 21 |
| | CAPÍTULO 2 SELEÇÃO DE BIOCHARS PARA RECUPERAÇÃO DE SOLOS DEGRADADOS..... | 25 |
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 27 |
| 2 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 29 |
| 2.1 | Matéria-prima..... | 29 |
| 2.2 | Preparação dos biochars..... | 29 |
| 2.3 | Rendimento gravimétrico..... | 30 |
| 2.4 | Caracterização do biochar..... | 30 |
| 2.4.1 | Análise da química imediata..... | 30 |
| 2.4.2 | Potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica (c.e.)..... | 31 |
| 2.4.3 | Capacidade de troca cátions (ctc)..... | 31 |
| 2.4.4 | Teor de nutrientes..... | 31 |
| 2.4.5 | Microscopia eletrônica de varredura (mev)..... | 32 |
| 2.4.6 | Análise termogravimétrica..... | 32 |
| 2.4.7 | Análise de espectroscopia vibracional na região do infravermelho..... | 33 |
| 2.5 | Análise estatística..... | 33 |
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 34 |
| 3.1 | Propriedades físico-químicas e conteúdo de nutrientes nos biochars..... | 34 |

| | | |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2 | Rendimento gravimétrico e análise química imediata..... | 37 |
| 3.3 | Análise termogravimétrica..... | 38 |
| 3.4 | Espectroscopia vibracional na região do infravermelho (ftir)..... | 41 |
| 3.5 | Microscopia eletrônica de varredura..... | 42 |
| 4 | CONSIDERAÇÕES SOBRE O POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DOS BIOCHARS..... | 45 |
| 5 | CONCLUSÃO..... | 47 |
| | REFERENCIAS | 48 |
| | CAPÍTULO 3 EFEITO DA APLICAÇÃO DE BIOCHAR NO DESENVOLVIMENTO DE VEGETAÇÃO E NA FERTILIDADE EM SOLO DEGRADADO POR EROSÃO..... | 51 |
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 53 |
| 2 | MATERIAL E METODOS..... | 55 |
| 2.1 | Matéria-prima..... | 55 |
| 2.2 | Preparação dos biochars..... | 55 |
| 2.3 | Caracterização da voçoroca..... | 56 |
| 2.4 | Coleta do solo-sedimento..... | 58 |
| 2.5 | Caracterização química e física do solo-sedimento da voçoroca..... | 58 |
| 2.6 | Ensaio de incubação | 58 |
| 2.7 | Caracterização química do solo-sedimento após a incubação..... | 59 |
| 2.8 | Montagem do experimento..... | 59 |
| 2.9 | Análise estatística..... | 60 |
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 61 |
| 3.1 | Efeitos na acidez do solo..... | 61 |
| 3.2 | Efeitos na CTC e matéria orgânica do solo..... | 64 |
| 3.3 | Efeitos da aplicação dos biochars na disponibilidade de fósforo, potássio, cálcio e magnésio..... | 68 |
| 3.4 | Efeito da aplicação dos biochars no desenvolvimento do capim vetiver..... | 76 |
| 4 | CONSIDERAÇÕES SOBRE O POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DOS BIOCHARS NA RECUPERAÇÃO DE SOLOS DEGRADADOS..... | 82 |

| | | |
|----------|----------------------------------|-----------|
| 5 | CONCLUSÃO..... | 84 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 85 |
| | REFERENCIAS..... | 86 |

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento populacional levou a aumentos significativos na produção de alimentos e, conseqüentemente, grandes quantidades de resíduos passaram a ser produzidos anualmente. Resíduos, sem um destino apropriado, trazem uma série de malefícios ao meio ambiente, que vai desde a contaminação do solo e lençol freático, até a emissão de gases causadores de efeito estufa (EPE, 2019).

A demanda mundial por alimentos de qualidade e de baixo custo, aliada a problemas sanitários de mercados externos impulsionaram as exportações brasileiras de frango. Segundo dados da Embrapa, em 2020, o Brasil se tornou o maior exportador de carne de aves com 4,3 milhões de toneladas, no entanto; a criação intensiva de frango gera uma grande quantidade de resíduos ricos em nutrientes (Costa et al., 2009).

Na produção de café (em grãos), o Brasil em 2020, manteve sua participação relativa dos últimos anos, liderou com 3,1 milhões de toneladas; além de ter alcançado a posição de segundo maior exportador de milho e se consolidar como o maior produtor de açúcar (Embrapa, 2021). No entanto um dos maiores problemas relacionados à agroindústria é a abundante quantidade de resíduos gerados durante o processamento da matéria-prima, que devem ser descartados corretamente ou utilizados adequadamente para não tornarem um problema ambiental (Zoca et al., 2014).

Existe um grande desafio visando à utilização desses resíduos agrícolas e agroindustriais, o que requer alternativas inovadoras e viáveis social e economicamente. Alguns estudos relatam a abundância de nutrientes nestes tipos de resíduos, mostrando a viabilidade de sua incorporação pelo setor produtivo (Pessoa et al., 2015). O trabalho realizado por Costa et al., 2009, relata a grande quantidade de nutrientes presente nos resíduos provenientes da criação intensiva de frangos, denominados de cama de frango.

Pensando nisto, a conversão de resíduos agrícolas em biochar deve ser considerada, uma vez que, trata-se de um produto eficaz no gerenciamento de resíduos (KAJITANI et al., 2013), e

que pode atuar tanto na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, como no aumento do estoque de carbono (KUZYAKOV et al., 2009; ZIMMERMAN et al., 2010; Mendes et al., 2021); além de contribuir no combate às mudanças climáticas, por meio da redução da emissão de gases prejudiciais ao ecossistema (JEFFERY et al., 2011; CASE et al., 2012).

Tecnicamente, o biochar é um produto originado da conversão termoquímica da biomassa, sob temperatura de 300 a 700°C em ambientes reduzidos de oxigênio (LEHAMANN, 2007). Pode ser produzido a partir de uma ampla variedade de matéria-prima, incluindo subprodutos agrícolas e florestais, resíduos animais, subprodutos industriais e outros resíduos orgânicos, tais como: casca de arroz, palha de milho, bagaço de cana, esterco, serragem de madeira, casca de árvore, cama de frango, logo de esgoto e outros (DEY; MONDAL, 2020).

As propriedades mais importantes do biochar são: composição química, estabilidade, superfície específica e porosidade (LEHMANN et al., 2011). Sabe-se que a composição química da matéria-prima, e as condições de pirolise são os fatores que determinam estas propriedades, portanto devem ser analisadas com cuidado antes de realizar qualquer recomendação (DEY; MONDAL, 2020).

A utilização de biochars pode ser uma forma sustentável de melhorar solos com altos níveis de degradação (LEHMANN; RONDON, 2006). Além de ser alternativa para gerenciamento de resíduos agroindustriais, trata-se de um material com potencial de melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas destes solos e, conseqüentemente, da cobertura vegetal (ANAWAR et al., 2015; BRENNAN et al., 2014; ROBERTS et al., 2015, Mendes et al., 2021).

A hipótese inicial deste trabalho é que biochars produzidos a 450°C a partir de biomassas com alto teor de cinzas, combinados com o elevado teor de carbono, podem ser apropriados para serem utilizados na recuperação de áreas degradadas por erosão, uma vez que, atuam na manutenção da fertilidade e aumento da CTC do solo.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de utilização de biochars de resíduos da agroindústria no processo de recuperação de voçorocas. De forma específica, objetivou-se: (i) caracterizar química e fisicamente biochars produzidos a partir de biomassas abundantes na região; (ii) avaliar as modificações ocorridas no solo após sua aplicação, de forma a entender se os nutrientes presentes possuem capacidade de interagir com o solo; (iii) avaliar o efeito

do biochar no desenvolvimento do capim *Vetiveria zizanioides L.*, muito utilizado em recuperação de voçorocas.

Para melhor apresentação dos resultados, a tese foi dividida em três capítulos. No primeiro capítulo foram apresentados conceitos e estudos que envolvem o tema biochar e recuperação de solos degradados. No segundo capítulo tem-se a caracterização química e física dos materiais produzidos. No terceiro capítulo foram demonstrados os resultados da aplicação dos biochars sobre as propriedades de um solo-sedimento e sobre o desenvolvimento do capim *Vetiveria zizanioides L.*

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Solos degradados

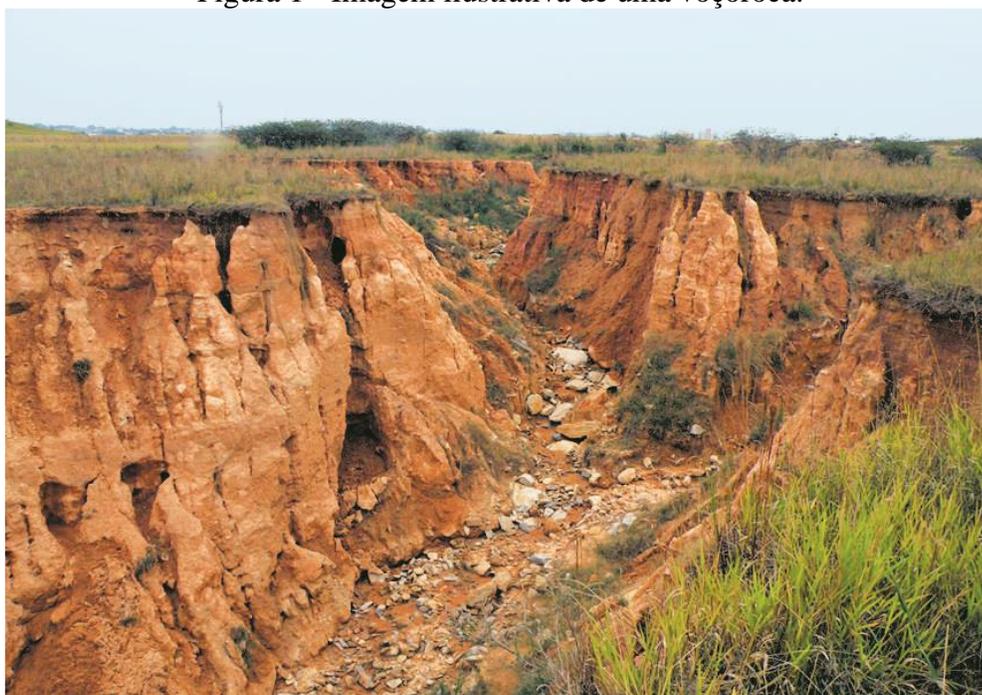
A degradação dos solos ocorre naturalmente por meio da ação de fatores naturais como água, vento e gelo. Porém, pode ser intensificada pela ação antrópica (atividades agrícolas, superpastoreio, desmatamento, construção de estradas, atividades de mineração, hidrelétricas etc.), que diminui a capacidade de uso do solo, como por exemplo, para a produção de alimentos (ALVES et al., 2010).

Dentre as diferentes formas de degradação relacionadas aos componentes verticais de uma unidade de terra como atmosfera, vegetação, solo, geologia e hidrologia, pode-se considerar que a degradação das condições do solo é a mais séria, pois não é facilmente reversível, uma vez que processos de formação e regeneração do solo são lentos, necessitando de duzentos a mil anos para formar 2,5 cm de solo, sob condições agrícolas normais (KENDALL; PIMENTEL, 1994).

Segundo Barrow (1991), dependendo da região, a perda da camada superficial é muito mais rápida do que pode ser repostada, em que a degradação pela perda da camada superficial pela ação da água e/ou vento é a forma mais comum de erosão. Nesta situação ocorre redução da fertilidade, pois conforme o solo se torna mais denso e fino, fica menos penetrável às raízes e pode se tornar superficial demais a elas. Além disso, reduz-se a capacidade de reter água e torná-la disponível às plantas, além da lixiviação de nutrientes juntamente com as partículas de solo erodidas.

O estágio mais avançado da erosão é denominado voçoroca (FIGURA 1). Caracteriza-se pela deformação do terreno e formação de canais profundos que podem ser cortados por grandes fluxos de água, tornando a degradação difícil ou impossível de ser remediada (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2017).

Figura 1 - Imagem ilustrativa de uma voçoroca.



Fonte: Google

São muitos os prejuízos sociais e ambientais advindos do processo de erosão, dentre eles destacam-se, a redução da capacidade produtiva e desvalorização das terras, alteração da fauna e flora, assoreamento de cursos d'água, bloqueio de estradas e riscos de acidentes.

Geralmente, a recuperação de voçorocas de grande porte, visa cessar os fatores de degradação e restabelecer a vegetação. Trata-se de processo difícil e caro, uma vez que, nessas situações a estrutura e a fertilidade do solo estão completamente modificadas e as situações de trabalho são bem difíceis (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2017).

Neste contexto, o uso do biochar pode contribuir de forma sustentável para a recuperação destes solos degradados, pois além de ser uma alternativa para gerenciamento de resíduos agroindustriais, atua na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas desses solos e, conseqüentemente da cobertura vegetal, proporcionando o aumento da biomassa tanto de parte aérea como de raízes das plantas (ANAWAR et al., 2015; BRENNAN et al., 2014; ROBERTS et al., 2015).

2.2 Biochar

O biochar é um material carbonáceo, obtido por meio da pirólise da biomassa, na ausência ou presença controlada de oxigênio. Diferencia-se do carvão vegetal na aplicação, pois é produzido, exclusivamente, para ser utilizado na agricultura, com o intuito de imobilizar carbono e melhorar as propriedades do solo (LEHMANN; JOSEPH, 2009). Os estudos envolvendo biochar estão relacionados aos solos de origem antropogênica, pois ambos apresentam processos de formação semelhantes, por meio da decomposição térmica de material vegetal. No entanto, solos antropogênicos são formados ao longo de milênios, e por isso, existe uma reposição contínua de matéria orgânica no solo (TRAZZI, 2018).

Geralmente, pesquisadores fazem a associação do biochar com a “Terra Preta de Índio (TPI)” da Amazônia, que são manchas profundas de solo escuro, que ocorrem em pequenas porções. A TPI é rica em carbono e muito fértil, diferente das demais terras de ocorrência natural da região, que apresentam solos intemperizados, ácidos e de baixa fertilidade, provenientes das condições climáticas de elevadas temperaturas e alta pluviosidade (SMITH, 1980).

A cor e o potencial agrícola dessas TPI's estão atrelados à presença de carvão e substâncias aromáticas (GLASER et al., 2001), decorrentes de atividade indígenas há mais de 7000 anos, contendo três vezes mais nitrogênio e fósforo que os solos circundantes, além de maior teor de matéria orgânica.

A incorporação de material carbonáceo resistente à degradação (biochar), tem sido objeto de estudos, tanto para auxiliar no controle da emissão de gases de efeito estufa (LEHMANN et al., 2011), quanto para melhorar as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (DOMINGUES et al., 2017). Isso porque durante seu processo de formação, ocorre o rearranjo dos átomos de

carbono, aumentando a porosidade do material, o que proporciona melhoria nas propriedades químicas, principalmente pela alta superfície específica. Esse processo resulta em aumento da capacidade de troca de cátions e adsorção de nutrientes (ATKINSON et al., 2010).

A composição química e estrutural do biochar é heterogênea, sendo que algumas propriedades estão presentes em todos como, por exemplo, o alto teor de C e o grau de aromaticidade, que explicam seu alto nível de recalcitrância. Contudo, a exata composição química e estrutural é dependente da combinação de matéria-prima e das condições de pirólise (TRAZZI et al., 2018).

2.3 Efeito da matéria prima nas propriedades dos biochars

De acordo com Kloss et al. (2012), algumas características do biochar podem variar, conforme o tipo de matéria prima, principalmente, em função da sua constituição química, além das condições utilizadas na sua produção, especialmente o efeito da temperatura.

A capacidade de troca de cátions (CTC), o conteúdo de carbono fixo, assim como o teor de cinzas sofrem maior alteração em função da matéria prima selecionada para produção do biochar (DOMINGUES et al., 2017; ZHAO et al., 2013). Geralmente, biomassas agrícolas apresentam maior quantidade de lignina e macro e micronutrientes, resultando em biochars com maior teor de cinzas, maior teor de nutrientes, maior condutividade elétrica, menor área superficial e menor estabilidade térmica, se comparado aos provenientes de material lenhoso (KLOSS et al., 2012). Isso também acontece para os biochars produzidos a partir de algas e adubos que, para Bird et al. (2011) e Brewer e Brown (2012), são materiais ricos em nutrientes, que apresentam maior pH e maior quantidade de carbono estável.

Estudos demonstraram que a matéria prima exerce grande influência nas propriedades do biochar (KLOSS et al., 2012; ZHAO et al., 2013; JIANG et al., 2016; VEIGA et al. 2017; CONZ et al., 2017; DOMINGUES et al., 2017). Desta forma, a caracterização, assim como as formas de produção e interação com o ambiente, fornecerá informações importantes acerca dos efeitos de curto prazo da aplicação do material (BREWER et al., 2011).

2.4 Efeito das condições de pirólise

A pirólise é processo físico-químico, onde a biomassa é aquecida em temperaturas que variam de 400 a 900°C, na ausência ou presença controlada de oxigênio. Tanto a matéria prima como os parâmetros, tais como tempo de reator, temperatura e taxa de aquecimento, utilizados no processo determinarão a qualidade dos produtos (MA et al., 2012).

Segundo Lehmann (2007) a temperatura ótima para produção do biochar está em torno de 350-550°C com ausência parcial ou total de oxigênio. Neste processo obtém-se 50% de bio-óleo que pode ser utilizado para diversos fins, e 50% de biochar. A gaseificação, também denominada pirólise à alta temperatura (acima de 700°C), é a menos apropriada, pois apresenta rendimento muito baixo.

As propriedades que mais são influenciadas pela temperatura são: rendimento, recalcitrância, pH e material volátil (ZHAO et al., 2013).

Quanto maior a temperatura final de pirólise, maior será a área superficial, teor de carbono fixo e de cinzas, e menor será o rendimento gravimétrico em carvão e o teor de materiais voláteis (CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS - CETEC, 1980). Essa tendência pôde ser observada por Chen et al. (2015), ao avaliar os rendimentos da pirólise de bambu, bem como a composição química e a área superficial, quando submetidos a diferentes temperaturas finais de pirólise, e por Kim et al. (2012) que avaliaram o rendimento de biochars produzidos de *Pinus rigida* em três diferentes temperaturas: 300, 400 e 500°C.

Tan et al. (2014), trabalhando com produção de biochar proveniente de lodo de esgoto em diferentes temperaturas (500, 600, 700, 800 e 900°C), observaram um aumento do pH, aumento do teor de cinzas, além da redução do rendimento em carvão com a elevação da temperatura. De acordo com os resultados desse trabalho, os elementos N, H e O são perdidos como grupos funcionais em moléculas dos materiais voláteis.

A recalcitrância do biochar no solo pode ser atribuída à presença predominante de compostos aromáticos. Materiais produzidos em baixas temperaturas (< 600°C) geralmente são caracterizados por conter estruturas amorfas e cristalitos. Com o aumento da temperatura de pirólise, acima de 600°C, as folhas de grafite vão se ordenando, e a quantidade de material volátil

tende a diminuir. Biochar produzido a baixas temperaturas normalmente são mais ácidos; à medida que a temperatura de produção aumenta o pH tende a aumentar. Quanto mais recalcitrante o material, mais devagar será sua degradação após a aplicação no solo (HOSSAIN et al., 2011).

O rendimento gravimétrico da pirólise diminui com o aumento da temperatura final, porém tende a se estabilizar, em temperaturas mais elevadas, uma vez que apenas pequenas quantidades de H₂ são liberadas do carvão (TRUGILHO; SILVA, 2001).

Além de influenciar nos rendimentos, o aumento da temperatura de pirólise promove melhorias na estrutura do biochar. À medida que a temperatura se eleva a estrutura se aproxima àquela do grafite, com cadeia carbônica aromática pouco funcionalizada, ou seja, com baixas razões de O/C e H/C, que lhe conferem alta estabilidade química e resistência à degradação (BOURKE et al., 2007).

Hossain et al. (2011) avaliaram a influência da temperatura final de pirólise e observaram que o pH do solo aumenta, quando adicionado biochar, produzido em temperaturas mais elevadas, pelo fato, principalmente, da diminuição de grupos ácidos que são volatilizados em temperaturas elevadas. O biochar produzido a 700°C é adequado, para aplicação em solos ácidos, pela sua capacidade de neutralizar o pH, enquanto para solos alcalinos são recomendados os produzidos em temperaturas baixas.

Yao et al. (2012), na avaliação de treze diferentes biochars e suas capacidades em adsorver amônio, nitrato e fosfato, concluíram que os melhores materiais, para tal finalidade, devem ser provenientes de condições de pirólise com temperatura elevada, visto que alguns materiais causaram maior liberação desses nutrientes em solução. Este fato, também, foi observado por Tan et al. (2014), ao estudarem a capacidade de biochars em adsorver cádmio.

Manyà (2012) concluiu que biochars com elevada área superficial específica e porosidade podem explicar o aumento da área superficial específica dos solos, que, por sua vez, resultam em maior capacidade de sorção e aumento da biomassa microbiana. Méndez et al. (2013) demonstraram melhorias significativas no aumento da capacidade de campo e água disponível quando compararam a aplicação de biochar pirolisado a 600°C com os produzidos a 400°C.

2.5 Aplicação e efeitos do biochar no solo

O biochar pode apresentar diferentes características dependendo do tipo de matéria prima utilizada e condições de produção, sendo indispensável a sua caracterização para determinar seu efeito em solos degradados (ENDERS et al., 2012).

No solo, em condições naturais, a interação da matéria orgânica com a superfície coloidal das argilas é dependente da distribuição dos grupos funcionais da matéria orgânica, da polaridade dos componentes e da composição e concentração de cátions e ânions na solução do solo. Da mesma forma, durante a aplicação de biochars no solo, a interação com as superfícies coloidais das argilas dependerá dos grupos funcionais presentes no mesmo, sendo que biochars com alto conteúdo mineral tendem a favorecer a interação com o solo (JOSEPH et al., 2010).

Por meio da sua natureza porosa, advinda das estruturas celulares da matéria prima, os biochars são estáveis no solo e têm potencial de aumentar diretamente a capacidade de retenção de água ao longo prazo. Além de possuir cinzas que são fontes de P, K e outros elementos que podem estar em formas mais solúveis e acessíveis do que na matéria-prima não pirolisada (TRAZZI et al., 2018).

Warnock et al. (2007), em trabalho de revisão, enfatizaram que a adição de diferentes tipos de biochar pode alterar a disponibilidade de nutrientes por modificar as propriedades físico-químicas do solo. Além disso, pode favorecer a incidência de fungos micorrízicos, por meio de quatro mecanismos de atuação, sendo eles: o biochar aumenta a disponibilidade de nutrientes do meio, primordial para o crescimento dos fungos; altera a atividade de outros microrganismos que tem efeito nas micorrizas; o biochar modifica a dinâmica da rizosfera, aumentando a interação entre micróbios, raízes das plantas e fungos micorrízicos; e atua como refúgio para fungos e bactérias colonizadores.

Verifica-se que há diferentes resultados para a aplicação do biochar no solo, mostrando que a sua dinâmica depende de diversas variáveis como o tipo de solo, clima e propriedades do biochar (JOSEPH et al., 2010). Desta maneira, o estudo das características dos biochars, bem como suas formas de produção e interação com o ambiente, é essencial para entendimento de suas aplicações e efeitos.

Com relação à produtividade agrícola, estudos têm demonstrado resultados positivos. Jeffery et al. (2015) em revisão de literatura com mais de 50 trabalhos, observaram que a utilização de biochar em solos ácidos ou com pH neutro, e em solos de textura média ou arenosa apresentou efeitos significativos e positivos para a produtividade agrícola. Entre as matérias primas, os biochars obtidos de cama de aviário proporcionaram os maiores ganhos em produtividade, enquanto os de lodo de esgoto obtiveram os menores.

REFERENCIAS

ALVES, M. C. et al. Aggregation and morphological properties of a degraded Oxisol receiving organic amendments. In: World Congress of Soil Science, 19th, 2010, Brisbane, Australia. **Anais...** Published on DVD.

ANAWAR, H. M. et al. Biochar: an emerging panacea for remediation of soil contaminants from mining, industry and sewage wastes. **Pedosphere**, v. 25, n. 5, p. 654–665, 2015.

ARCHANJO, B. S. et al. Nanoscale mapping of carbon oxidation in pyrogenic black carbon from ancient Amazonian anthrosols. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 17, n. 4, p. 775-779, 2015.

ARAUJO, G. H. de S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. 12^a ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2017.

ATKINSON, C. J. et al. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. **Plant and Soil**, v. 337, p. 1-18, 2010.

BIRD, M. I. et al. Algal biochar: production and properties. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 2, p. 1886-1891, 2011.

BARROW, C. **Land degradation**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1991.

BOURKE, J. et al. Do all carbonized charcoals have the same structure?: a model of the chemical structure of carbonized charcoal. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 46, p. 5954-5970, 2007.

BRENNAN, A. et al. Effects of biochar amendment on root traits and contaminant availability of maize plants in a copper and arsenic impacted soil. **Plant and Soil**, v. 379, p. 351-360, 2014.

BREWER, C.E. et al. Criteria to select biochars for field studies based on biochar chemical properties. **Bio Energy Research**, v. 4, n. 4, p. 312–323, 2011.

BREWER, C. E.; BROWN, R. C. Biochar. In: SAYIGH, A. (Ed.). **Comprehensive renewable energy**. Oxford: Elsevier, 2012. p. 357-384.

CASE, S. D. et al. The effect of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from a sandy loam soil – the role of soil aeration. **Soil Biology and Biochemistry**, v.51, p.125-134, 2012.

COSTA, A. M.; BORGES, E. N.; SILVA, A. A.; NOLLA, A.; GUIMARÃES, E. C. Potencial of physical recovery of a red latosol, under degraded pasture, as affected by the application of chicken manure. **Ciência agrotecnologia**, v. 33, Edição Especial, p. 1991-1998, 2009.

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

CONZ, R. F. **Caracterização de matérias-primas e biochars para aplicação na agricultura**. 2015. 132 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015.

DEY, D.; MONDAL, P.A. Comprehensive review on biochar - the black carbon: production technologies, physico-chemical properties and utilization for sustainable. **Environment chem sci rev lett**, v. 9, n.34, p. 578-594, 2020.

DOMINGUES, R. R. et al. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **Plos one**, p. 1-19, 2017.

ENDERS, A. et al. Characterization of *biochar* to evaluate recalcitrance and agronomic performance. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 644-653, 2012.

GLASER, B. et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. **Organic Geochemistry**, v. 31, p. 669-678, 2001.

HOSSAIN, K. M. et al. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 223-228, 2011.

JEFFERY, S. et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture Ecosystems and Environment**. v.1, n.144, p.175-187, 2011.

JEFFERY, S. et al. The way forward in biochar research: targeting trade-offs between the potential wins. **GCB Bioenerg**. v.7, p. 1–13, 2015.

- JIANG, S. et al. Copper and zinc adsorption by softwood and hardwood biochars under elevated sulphate-induced salinity and acidic pH conditions. **Chemosphere**, v. 142, p. 64-71, 2016.
- JOSEPH, S. D. et al. An investigation into the reactions of *biochar* in soil. **Australian Journal of Soil Research**, v. 48, n. 7, p. 501-515, 2010.
- KAJITANI, S.; TAY, L. H. S.; ZHANG, Z. C. LI. Mechanisms and kinetic modelling of steam gasification of brown coal in the presence of volatile-char interactions. **Fuel**, v.103, p.7-13, 2013.
- KENDALL, H; PIMENTEL, D. **Constraints on the Expansion of the Global Food Supply**. *In: Ambio*, v.23, n. 3, 1994.
- KIM, K. H. et al. Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). **Bioresource Technology**, v. 118, p. 158 - 162, 2012.
- KLOSS, S. et al. Characterization of slowpyrolysis *biochars*: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on *biochar* properties. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 4, p. 990-1000, 2012.
- KUZYAKOV, Y.; SUBBOTINA, I.; CHEN, H. Q.; BOGOMOLOVA, I.; XU, X. L. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by C-14 labeling. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 41, p.210-219, 2009.
- LEHMANN, J., RONDON, M. Biochar soil management on highly weathered soils in the humid tropics. *In: BALL, A.S. et al. (Eds.), Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*. CRC Press, Boca Raton, FL, p. 517–530, 2006.
- LEHMANN, J. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, n. 7, p. 381-387, 2007.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: an introduction. **Science and Technology**, v. 1, p. 1-12, 2009.
- LEHMANN, J. et al. *Biochar* effects on soil biota: a review. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011.
- MA, L. et al. A review of thermal-chemical conversion of lignocellulosic biomass in China. **Biotechnology Advances**, v. 30, n. 4, p. 859-873, 2012.

MANYÀ, J. J. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 46, n. 15, p. 7939-7954, July 2012.

MÉNDEZ, A. et al. Influence of pyrolysis temperature on composted sewage sludge biochar priming effect in a loamy soil. **Chemosphere**, Oxford, v. 93, n. 4, p. 668-676, 2013.

PESSOA, R. S.; SILVA, C. A.; MORETTI, B. S.; NETO, A. E. F.; INDA, A. V.; CURI, NILTON. Solubilization of potassium from alternative rocks by humic and citric acids and coffee husk. **Ciência Agrotecnologia**, v. 39, n. 6, p. 553-564, 2015.

ROBERTS, D. A. et al. Algal biochar enhances the re-vegetation of stockpiled mine soils with native grass. **Journal of Environmental Management**, v. 161, p. 173-180, 2015.

SMITH, N. J. H. Anthrosols and human carrying capacity in Amazônia. **Annals of the Association of American Geographers**, Washington, v. 70, p. 553-566, 1980.

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

TRAZZI, P. A. et al. Biochar: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Hymenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 2, n. 1/2, p. 45-53, 2001.

VEIGA, T. R. A. L. et al. Different plant biomass characterizations for biochar production. **Cerne**, Lavras, v. 23, n. 4, p. 529-536, 2017.

WARNOCK, D. D. et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 300, p. 9-20, 2007.

YAO, Y. et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. **Chemosphere**, Oxford, v. 89, n. 11, p. 1467-1471, 2012.

ZHAO, L. et al. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 256 - 257, p. 1-9, 2013.

ZOCA, S. M.; PENN, C. J.; ROSOLEM, C. A.; ALVES, A. R.; NETO, L. O.; MARTIN, M. M. Coffee processing residues as a soil potassium amendment. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, v. 3, p. 155- 165, 2014.

CAPÍTULO 2: SELEÇÃO DE BIOCHARS PARA RECUPERAÇÃO DE SOLOS DEGRADADOS

RESUMO

O biochar é um material produzido a partir do processo de pirólise, e se caracteriza por ser rico em carbono aromático, recalcitrante e persistente no solo. Contudo, a exata composição química e estrutural depende da combinação entre matéria-prima e das condições de pirólise. Trabalhos já foram realizados, com o intuito de provar as melhorias da aplicação do biochar na fertilidade do solo. Entretanto, existem poucos relatos sobre os benefícios na melhoria de solos degradados por erosão. O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades de biochars produzidos com resíduos da agroindústria em diferentes temperaturas, visando determinar seu potencial de utilização no processo de recuperação de áreas erodidas com voçorocas. Foram produzidos biochars de casca de café (CC), cama de frango (CF), bagaço de cana-de-açúcar (BC) e palha de milho (PM), nas temperaturas de 350 e 450°C. Os biochars foram avaliados quanto a sua estrutura por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), quanto aos teores de macro e micronutrientes, quanto aos teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, além de suas características físicas, tais como: pH, condutividade elétrica (CE), capacidade de troca de cátions (CTC), bem como seus espectros na região do infravermelho (FTIR) e perfil de perda de massa em função da temperatura (TGA). As análises foram determinantes na seleção dos biochars e suas misturas para compor biocompostos para serem utilizadas na recuperação de voçorocas. Os resultados obtidos indicam que houve influência da temperatura nas propriedades químicas e físicas dos biochars, havendo aumento de, praticamente todas, com aumento da temperatura de 350 para 450°C. Os biochars CC e CF apresentaram maior teor de nutrientes, capacidade de troca de cátions (CTC), condutividade elétrica e cinzas, o que demonstra maior potencial como biocomposto para corrigir as deficiências nutricionais do solo. Os biochars de BC e PM apresentaram maior teor de carbono e grupos aromáticos, mostrando ser potenciais para imobilização de nutrientes no solo e aumento da CTC. Portanto, com base nos resultados, os biochars produzidos a 450°C, a partir de CF e CC mostraram-se mais promissores na neutralização da acidez e aumento da disponibilidade de fósforo e potássio, podendo ser utilizados sozinhos e ou de forma combinada. A adição de biochars de PM e BC a CC e CF pode ser interessante quando se deseja atuar tanto na fertilidade, como na manutenção de carbono no solo. PM e BC não devem ser utilizados sozinhos para recuperação de voçorocas, uma vez que podem contribuir pouco para com o aumento da fertilidade destes solos.

Palavras-chave: Biocarvão. Biocomposto. Biomassa vegetal. Caracterização. Erosão.

ABSTRACT

Biochar is a material produced from the pyrolysis process, and is characterized by being rich in aromatic carbon, recalcitrant and persistent in the soil. However, the exact chemical and structural composition depends on the combination of raw material and pyrolysis conditions. A lot of work has already been done, with the aim of proving the improvements in the application of biochar in soil fertility. However, there are few reports on the benefits in improving soils degraded by erosion. The objective of this work was to evaluate the properties of biochars produced with agro-industrial residues at different temperatures, in order to determine their potential use in the recovery process of areas eroded with gullies. Biochars of coffee husk (CC), chicken litter (CF), sugarcane bagasse (BC) and corn straw (PM) were produced at temperatures of 350 and 450°C. Biochars were evaluated for their structure by scanning electron microscopy (SEM), for macro and micronutrient contents, for ash, volatile materials and fixed carbon contents, in addition to their physical characteristics, such as: pH, electrical conductivity (EC), cation exchange capacity (CTC), as well as its spectra in the infrared region (FTIR) and mass loss profile as a function of temperature (TGA). The analyzes were decisive in the selection of biochars and their mixtures to compose biocompounds to be used in the recovery of gullies. The results obtained indicate that there was an influence of temperature on the chemical and physical properties of biochars, with an increase of practically all, with an increase in temperature from 350 to 450°C. The CC and CF biochars had higher nutrient content, cation exchange capacity (CTC), electrical conductivity and ash, which demonstrates greater potential as a biocompound to correct soil nutritional deficiencies. BC and PM biochars showed higher carbon content and aromatic groups, showing that they are potential for soil nutrient immobilization and CTC increase. Therefore, based on the results, biochars produced at 450°C, from FC and CC, show more promise in neutralizing acidity and increasing the availability of phosphorus and potassium, and can be used alone or in combination. The addition of PM and BC biochars to CC and CF can be interesting when one wishes to act both in fertility and in the maintenance of carbon in the soil. PM and BC should not be used alone for gullies recovery, as they may contribute little to the increase in soil fertility.

Keywords: Biochar. Biocompound. Plant biomass. Description. Erosion.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos os estudos envolvendo biochar se aprofundaram em função de suas características, processos de produção e possibilidades de uso. Entretanto, o material não é novo do ponto de vista de aplicação, uma vez que, há séculos, resíduos de alto teor de carbono têm sido usados por civilizações pré-colombianas nativas da Amazônia. Estes solos receberam o nome de Terra Preta de Índio (TPI's), principalmente devido a sua cor e origem.

O biochar é originado da conversão termoquímica da biomassa, considerado como uma estratégia eficaz de gerenciamento de resíduos. Pode ser utilizado no solo para acúmulo de carbono, melhoria da fertilidade do solo e imobilização de poluentes (DEY; MONDAL, 2020).

Trata-se de um material de granulometria fina, caracterizado pelo alto teor de carbono orgânico e baixa susceptibilidades a degradação (International biochar initiative – IBI). Tecnicamente é produzido por aquecimento da biomassa em temperaturas entre 300 e 700°C, sob fornecimento limitado de O₂ (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

Pode ser obtido a partir de ampla variedade de matéria-prima, incluindo subprodutos agrícolas e florestais, resíduos animais, subprodutos industriais e outros resíduos orgânicos (DEY; MONDAL, 2020). A composição química da matéria-prima, e as condições de pirólise são os fatores que determinam suas propriedades e, portanto, devem ser analisadas com cuidado antes de realizar qualquer recomendação (WANG et al., 2019).

Embora haja grande variedade de matérias-primas, e estudos envolvendo biochars, poucos são os trabalhos que avaliam comparativamente a eficiência de utilização de casca de café, cama de frango, bagaço de cana-de-açúcar e palha de milho em promover melhorias nas propriedades físicas e químicas de solos degradados, principalmente em voçorocas. Neste sentido, a caracterização dos biochars gerados a partir desses resíduos é o primeiro passo para identificar o potencial de aplicação desses materiais na recuperação de solos degradados, bem como direcionar o modo de produção e a forma como devem ser aplicados.

Biochars derivados de plantas possuem alto teor de carbono aromático devido à maior quantidade de lignina e celulose presente, o que lhes confere alta estabilidade e resistência à decomposição microbiana (DERMIBAS, 2004). Os dejetos animais possuem altos teores de

compostos orgânicos e inorgânicos lábeis, resultando em materiais com alto teor de cinzas, o que é positivamente relacionado ao nutriente e à composição química da biomassa (SINGH et al., 2015). Concentrações mais altas de cinzas, N, S, Na e P foram observadas em biochar de cama de frango do que em biochars de casca de amendoim e noz-pecã (LEHMANN, 2007)

Altas concentrações de nutrientes na biomassa podem gerar biochars com maior conteúdo de cinzas e capacidade alcalinizante (LEHMANN; JOSEPH, 2009). Assim, podem ser usados em solos para corrigir a acidez (SINGH et al., 2015), aumentar a capacidade de troca catiônica do solo (CEC), reter água (KAJITANI et al., 2013 SINGH et al., 2015) e regular a dinâmica do C e N (ZIMMERMAN, 2010). Além disso, pesquisadores apontaram efeitos positivos do biochar na remediação do solo devido à sua adsorção de pesticidas ou metais (JEFFERY et al., 2011; CASE et al., 2012; ABDELHAFEZ et al., 2014).

Segundo Lehmann (2007) a temperatura ótima para produção do biochar está em torno de 350 a 550°C com ausência parcial ou total de oxigênio. Neste processo obtém-se 50% de bio-óleo, que pode ser utilizado para diversos fins, e 50% de biochar. As propriedades do biochar que mais são influenciadas pela temperatura são: rendimento, recalcitrância, pH e material volátil (ZHAO et al., 2013).

A hipótese inicial deste trabalho é que biochars produzidos a 450°C a partir de biomassas com alto teor de cinzas combinados com biochars de elevado teor de carbono podem ser apropriados para serem utilizados na recuperação de áreas degradadas por erosão, uma vez que juntos atuam na manutenção da fertilidade e aumento da CTC do solo. Desta forma, este trabalho realizou a caracterização de biochars produzidos em duas temperaturas de pirólise, a partir de casca de café, cama de frango, palha de milho e bagaço de cana-de-açúcar, com objetivo de traçar suas potencialidades isoladas e combinadas para recuperação de solos degradados, como as voçorocas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Matéria-prima

Para a produção dos biochars foram utilizadas cascas de café (casca + polpa + pergaminho) (CC) da espécie *Coffea arábica*, bagaço de cana-de-açúcar (BC), palha de milho (PM) e cama de frango (CF).

A cama de frango é produto composto principalmente de palha de arroz, serragem de eucalipto, fezes, urina, restos de ração e penas que se misturam durante o processo de criação das aves. A cama de frango utilizada neste trabalho foi coletada após a criação de um lote de frango (55 dias) e após os procedimentos de trituração e de enleiramento.

Estas matérias primas foram escolhidas devido à grande disponibilidade na região do Sul de Minas. A origem das diferentes biomassas utilizadas na produção dos biochars encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Origem das biomassas utilizadas para produção dos biochars

| Material utilizado | Empresa | Cidade de Minas Gerais |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| Casca de café | Fazenda Limeira | Santo Antônio do Amparo |
| Bagaço de Cana | Alambique Júlio Penha | Nepomuceno |
| Palha de milho | Fazenda Lage | Nepomuceno |
| Cama de Frango | Granja Almeida | Nepomuceno |

Fonte: Do autor (2021)

2.2 Preparação dos biochars

As biomassas foram moídas e passadas em peneiras com malha de 2,5 mm. Em seguida foram secas em estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por, aproximadamente, 24 horas e pesadas para obtenção da massa seca. Posteriormente, cerca de 16 litros de cada tipo de material foram submetidos à temperatura inicial de 100°C e temperaturas finais de pirólise de 350 e 450°C , permanecendo 30 minutos na temperatura final. Foram necessárias 8 fornadas de cada material para produzir os 16 litros de biochar. A taxa de aquecimento aplicada foi de $1,67^\circ\text{C}/\text{min}$.

As temperaturas foram escolhidas com base nos trabalhos realizados por Lehmann (2007) e Veiga (2016), que indicaram que as melhores temperaturas para produção de biochars com intuito agrônômico correspondem à faixa entre 350 e 550°C.

2.3 Rendimento gravimétrico

Após serem retirados do forno, os biochars foram pesados, para obtenção da massa seca. O rendimento gravimétrico (RGC) foi expresso pela relação entre a massa seca de biochar e a massa seca de biomassa seca (EQUAÇÃO 1).

$$RGC = \frac{MC}{MMS} * 100 \quad (1)$$

Em que RGC é o rendimento gravimétrico de biochar com relação à base seca (%); MC é a massa de biochar com relação à base seca (g); MMS é a massa de biomassa seca (g).

2.4 Caracterização do Biochar

As propriedades físicas e químicas dos biochars foram avaliadas segundo as normativas citadas a seguir.

2.4.1 Análise da química imediata

A análise química imediata foi realizada conforme o procedimento descrito na Norma D1762-84 (ASTM, 2007). Por meio desta análise, determinaram-se os teores de materiais voláteis e de cinzas e, por diferença, o teor de carbono fixo do material.

2.4.2 Potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica (C.E.)

As análises de potencial hidrogeniônico (pH) e de condutividade elétrica (C.E.) foram determinadas, segundo a metodologia proposta por Rajkovich et al. (2011), em que 1 g absolutamente seco (a.s.) de biochar foi pesado em frascos de plástico e adicionados 20 mL de água deionizada. A mistura foi agitada em mesa agitadora orbital por 1,5 h. Após agitação, foi utilizado pHmetro previamente calibrado, com soluções padrão de pH 4,0 e 7,0, para determinar os valores de pH das amostras.

As amostras foram deixadas em repouso e, após 12 h, foi determinada a condutividade elétrica com o auxílio de condutivímetro previamente calibrado com solução padrão de C.E. igual a 1,4 mS/cm.

2.4.3 Capacidade de troca cátions (CTC)

A capacidade de troca de cátions dos biochars foi determinada pelo método de deslocamento de acetato de amônio, proposto por Gaskin et al. (2008) e modificado por Domingues et al. (2017). Foram pesados 0,20 g de biochar que, em seguida, foram colocados em sistema de filtragem a vácuo contendo filtro de 0,45 μm . As amostras de biochar foram então lavadas cinco vezes com 20 mL de água deionizada para remoção de íons solúveis. Em seguida as amostras foram lavadas cinco vezes com 20 mL de acetato de sódio (1 mol L^{-1} , pH 7), para saturar os locais de permuta com Na^+ . Depois de saturadas, as amostras foram lavadas cinco vezes com etanol para remoção do excesso de Na^+ não adsorvido. Por fim, os íons Na^+ foram deslocados por lavagem com acetato de amônio (1 mol L^{-1} , pH 7, cinco lavagens com 20 mL cada) e analisados por fotometria de chama Digimed DM 61, para determinação de Na^+ .

2.4.4 Teor de nutrientes

A análise do teor de nutrientes foi realizada, segundo a metodologia de digestão nitroperclórica, proposta por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

Pesou-se 0,5 g da amostra no tubo de digestão e foram adicionados 6 mL da mistura de ácido nítrico (HNO_3) e ácido perclórico (HClO_4) na proporção de 2:1 (v/v). Em seguida, as

amostras foram digeridas em bloco digestor, aumentando, gradativamente, a temperatura até atingir 210°C. As amostras foram, então, mantidas nesta temperatura até o volume ser reduzido a, aproximadamente, 5 mL (cerca de 6 horas). Após o resfriamento das amostras, foram adicionados, aproximadamente, 15 mL de água destilada e o volume final foi pesado.

Os teores de nutrientes foram determinados, conforme métodos descritos por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), por meio da técnica de espectrometria de absorção atômica, espectrômetro de UV- visível a 420 nm e fotômetro de chama. Os teores de macronutrientes foram expressos em g kg^{-1} e os de micronutrientes em mg kg^{-1}

2.4.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os biochars foram avaliados, quanto à morfologia de sua estrutura microscópica, por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando-se aparelho LEO EVO 40XVP e empregando tensão de 25kV. As amostras foram colocadas sobre suportes de alumínio cobertos com fita de carbono dupla face, para posterior obtenção das micrografias.

2.4.6 Análise termogravimétrica

O comportamento e a estabilidade térmica dos biochars foram investigados por análise termogravimétrica (TGA), em analisador Shimadzu-DTG 60 H. As varreduras foram realizadas entre as temperaturas de 40 e 600°C com taxa de $10^\circ\text{C min}^{-1}$ sob atmosfera inerte de N_2 e fluxo de $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

2.4.7 Análise de espectroscopia vibracional na região do infravermelho

Realizou-se a análise espectroscópica vibracional, na região do infravermelho, a fim de identificar a presença de grupos funcionais e possíveis alterações em virtude do aumento da temperatura durante o processo de pirólise.

Os espectros, na região do infravermelho dos biochars, foram obtidos em um espectrofotômetro Digilab série Excalibur, utilizando pastilhas de KBr (resolução de 4 cm^{-1} com 8 acumulações). Foram utilizados, aproximadamente, 3,0 mg de amostra para 97 mg de KBr.

2.5 Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, utilizando 4 resíduos (CC, CF, PM, BG), 2 temperaturas de pirólise (350 e 450°C), com 3 repetições totalizando 24 amostras.

Os dados foram submetidos à análise de variância. Quando significativo, foi utilizado o teste de Scott-knott a 1% de probabilidade como teste de comparação múltipla para avaliar se houve diferença entre os tratamentos. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa estatístico R Studio.Version (2020).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades físico-químicas e conteúdo de nutrientes nos biochars

Na Tabela 2 encontram-se as características físicas médias dos biochars produzidos nas temperaturas de 350 e 450°C. Houve elevação do pH e condutividade elétrica com o incremento da temperatura final de pirólise. Para todos os biochars e nas duas temperaturas de pirólise, o pH em água foi superior a 6.

Tabela 2 - Valores médios das propriedades físicas dos biochars de bagaço de cana-de-açúcar (BC), casca de café (CC), cama de frango (CF) e palha de milho (PM).

| Biochar | Temperatura °C | pH em água | Condutividade (μScm^{-1}) | CTC (T) cmolc/dm^3 |
|---------|----------------|------------|----------------------------------------|------------------------------------|
| PM | 350 | 8,2 | 708,0 | 11,8 |
| | 450 | 9,0 | 1041,0 | 10,3 |
| CC | 350 | 10,6 | 4770,0 | 49,0 |
| | 450 | 10,6 | 5410,0 | 47,6 |
| CF | 350 | 8,0 | 2680,0 | 26,6 |
| | 450 | 10,0 | 3570,0 | 25,9 |
| BC | 350 | 7,5 | 682,8 | 36,4 |
| | 450 | 8,8 | 1558,0 | 13,2 |

pH calibrado em pH 4,0 e 7,0; Condutividade calibrada em $1,4 \text{ mScm}^{-1}$

Fonte: Do Autor (2021)

O aumento do pH está relacionado com o enriquecimento de cátions básicos nas cinzas, que podem estar associados a espécies alcalinas, como carbonatos, óxidos e hidróxidos; e com a liberação de grupos funcionais ácidos presentes na estrutura da biomassa à medida que a temperatura de pirólise se eleva (JOSEPH et al., 2009). Os resultados obtidos concordam com os obtidos corroboram com os de Veiga (2016) e Domingues et al. (2017), que ao avaliarem o comportamento das biomassas de eucalipto, bagaço de cana-de-açúcar, esterco de galinha e casca de pinus, observaram tendência de elevação do pH com o incremento da temperatura.

O poder de neutralização de acidez do biochar é regulado por sua composição química (especialmente de cátions básicos), pelo teor de cinzas e pelo pH (DOMINGUES et al., 2017).

Dentre os biochars, o CC foi o que apresentou maior pH, nas temperaturas de 350 e 450°C, seguido de CF a 450°C e PM a 450°C. Quanto maior a presença de carbonatos e sais, maior será o pH dos biochars (LEHMANN et al., 2011).

A condutividade elétrica (CE) do biochar é responsável pela troca de íons no solo, sendo que, quanto maior o valor de C.E., mais eficaz será a troca de íons (JOSEPH et al., 2010). Assim como estudo realizado por Veiga (2016), a C.E. foi influenciada pelo tipo de biomassa. Os biochars CF e CC apresentaram C.E. superior aos demais, o que ocorreu, provavelmente, em razão de maior quantidade de nutrientes presentes nesses materiais (TABELA 2 e 3).

Estes resultados foram semelhantes aos encontrados nos relatos de outras investigações, que demonstraram que as propriedades dos biochars são dependentes do tipo de biomassa e do processo de produção. Temperaturas mais elevadas de pirólise proporcionaram aumento da C.E. em biochars de palha de arroz, palha de trigo, casca de laranja e resíduos de madeira (KLOSS et al., 2012; OH et al., 2012; ZHANG et al., 2012; DOMINGUES et al., 2017; VEIGA, 2016).

Com relação à capacidade de troca catiônica (CTC), os maiores valores foram encontrados para CC a 350 e 450°C seguidos de BC a 350°C, e CF a 350 e 450°C. De acordo com Zhang et al. (2012) a CTC está relacionada a presença de grupos funcionais (carboxílico, fenólico e lactônico) na estrutura do biochar, sendo tanto maior, quanto a presença destes.

A temperatura influenciou de modo negativo na CTC. Para todos os biochars, houve redução da CTC com o incremento da temperatura (TABELA 2). É reconhecido que o aumento da temperatura promove redução do teor de oxigênio presente nos grupos funcionais que compõem a porção dos materiais voláteis presentes no biochar (JOSEPH et al., 2009; MITCHELL; DALLEY; HELLEUR, 2013).

Existe influência do tipo biomassa na quantidade de nutrientes presentes no biochar (TABELA 3). Os biochars de CC e CF foram os materiais que apresentaram a maior quantidade de macronutrientes por quilograma de biochar produzido. Os biochars de CF são os mais ricos em nitrogênio (N), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), enquanto os de CC são os que possuem a maior quantidade de potássio (K) por Kg de biochar. Os resultados encontrados corroboram com as investigações realizadas por Gaskin (2008) e Veiga et al. (2017).

Com relação aos micronutrientes, os biochars CF foram os que apresentaram os maiores teores de cobre (Cu), zinco (Zn) e ferro (Fe), enquanto os de CC apresentaram os maiores teores de cobre (Cu).

Os resultados evidenciam o maior potencial de utilização de CF e CC frente aos demais biochars analisados. A utilização de CF e CC, separados ou de forma combinada, pode contribuir para com o aumento da fertilidade de solos que necessitem de correção, incluindo os degradados.

Tabela 3 - Quantidade de nutrientes presentes nos biochars de bagaço de cana-de-açúcar, casca de café, cama de frango e palha de milho, nas temperaturas de 350 e 450°C.

| Biochar | Bagaço de cana-de-açúcar | | Casca de Café | | Cama de Frango | | Palha de Milho | | |
|------------------------------|--------------------------|----------|---------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------|
| | Temp. °C | 350 | 450 | 350 | 450 | 350 | 450 | 350 | 450 |
| Macronutrientes g/kg | | | | | | | | | |
| N | | 7,73 E | 7,21 E | 8,24 E | 16,62 C | 57,25 A | 35,31 B | 9,58 D | 9,63 D |
| P | | 1,17 E | 1,34 E | 2,21 D | 2,43 C | 7,80 A | 7,84 A | 2,41 C | 2,79 B |
| K | | 18,80 E | 20,13 E | 44,16 B | 56,62 A | 25,68 D | 28,95 C | 16,65 F | 18,67 E |
| Ca | | 2,99 E | 3,14 E | 9,36 D | 10,59 C | 24,86A | 27,39 B | 3,20 E | 3,50 E |
| Mg | | 2,19 E | 2,29 E | 2,75 D | 2,98 C | 3,78 A | 3,80 A | 3,15 B | 3,32 B |
| S | | 2,03 D | 2,17 D | 2,96 C | 2,98 C | 3,78 B | 4,10 A | 1,40 E | 1,58 E |
| Micronutrientes mg/kg | | | | | | | | | |
| B | | 2,33 C | 36,95 B | 44,48 A | 54,35 A | 24,18 C | 34,78 B | 9,5 D | 11,09 D |
| Cu | | 14,58 E | 15,02 E | 30,36 D | 36,49 C | 63,67 B | 69,77 A | 8,89 F | 8,10 F |
| Mn | | 157,56 E | 171,55 E | 73,33 D | 74,30 C | 475,42 B | 531,64 A | 70,29 E | 73,81 E |
| Zn | | 42,40 C | 39,91 C | 21,45 D | 18,01 D | 108,24 A | 107,08 A | 73,89 B | 75,70 B |
| Fe | | 422,75 C | 374,98 D | 274,71 E | 365,03 C | 825,18 A | 820,93 A | 561,17 B | 537,36 B |

N: Nitrogênio; P: Fósforo; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; S: Enxofre; B: Boro; Cu: Cobre; Mn: Manganês; Zn: Zinco; Fe: Ferro. Valores seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-knott ($\alpha=0,01$).

Fonte: Do Autor (2021)

Assim como o tipo de biomassa, a temperatura influenciou na quantidade de nutrientes presentes no biochar. De modo geral, com exceção do N, houve aumento de todos os nutrientes nas temperaturas de 450°C. O biochar de CC foi o único que apresentou comportamento inverso para alguns nutrientes, sendo relatado aumento de N, e redução de Zn com o incremento da temperatura.

3.2 Rendimento gravimétrico e análise química imediata

Na Tabela 4, encontram-se os valores médios de rendimento gravimétrico e química imediata, para os quatro biochars analisados, nas duas temperaturas finais de pirólise.

Tabela 4 - Valores médios de rendimento gravimétrico médio e química imediata média dos biochars de bagaço de cana-de-açúcar (BC), casca de café (CC), cama de frango (CF) e palha de milho (PM), nas temperaturas finais de pirólise de 350 e 450°C.

| Biochar | Temperatura °C | Rendimento (%) | Análise Química Imediata (%) | | |
|--------------------------|----------------|----------------|------------------------------|---------|----------------------|
| | | | Materiais Voláteis | Cinzas | Teor de Carbono Fixo |
| Bagaço de Cana-de-açúcar | 350 | 38,2 D | 31,44 C | 5,00 F | 63,56 C |
| | 450 | 32,6 E | 21,31 F | 6,10 E | 72,59 A |
| Casca de Café | 350 | 40,9 C | 27,85 D | 9,07 D | 63,08 C |
| | 450 | 37,4 D | 23,87 E | 10,82 C | 65,31 B |
| Cama de Frango | 350 | 53,7 A | 35,10 A | 22,78 A | 42,12 E |
| | 450 | 46,7 B | 23,72 E | 25,94 B | 50,34 D |
| Palha de Milho | 350 | 37,8 D | 33,38 B | 4,18 F | 62,45 C |
| | 450 | 31,9 E | 21,72 F | 4,87 F | 73,41 A |

Valores seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-knott($\alpha=0,01$).

Fonte: Do Autor (2021)

Houve redução do rendimento gravimétrico e elevação do teor de cinzas com a elevação da temperatura de pirólise (TABELA 4). Os biochars CF e CC nas temperaturas de 350 e 450°C apresentaram maior rendimento gravimétrico e teor de cinzas, provavelmente devido à grande quantidade compostos inorgânicos (K, P, Ca e Mg), presentes nesses biochars (TABELA 4), que estarão mais concentrados na nova massa, após a volatilização dos compostos C, O e H. Os biochars de BC e PM foram os que apresentaram menor conteúdo de cinzas, em função da baixa quantidade de nutrientes presentes nesses biochars. Quanto maior a quantidade de nutrientes presentes, maior será o teor de cinzas no material (ZHAO et al., 2013). Esse mesmo comportamento foi relatado em outros estudos envolvendo casca de café, bagaço de cana-de-açúcar e esterco de galinha (VEIGA, 2016; DOMINGUES et al., 2017).

A porcentagem de materiais voláteis reduziu com o aumento da temperatura. Isso ocorreu devido ao aumento da aromatização e maiores perdas de gases, alcatrão e hidrocarbonetos de baixo peso molecular perante o aumento da temperatura de pirólise (SANTOS et al., 2009).

Os biochars de CF apresentaram o maior teor de materiais voláteis, nas temperaturas de 350 e 450°C. O conteúdo de cinzas foi menor para os biochars de BC, PM e CC. Ocorreu tendência de aumento do teor de carbono fixo com o incremento da temperatura de pirólise. Os resultados corroboram com os relatados em estudos envolvendo serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho, casca de café e esterco de galinha (DOMINGUES et al., 2017; VEIGA, 2016).

3.3 Análise Termogravimétrica

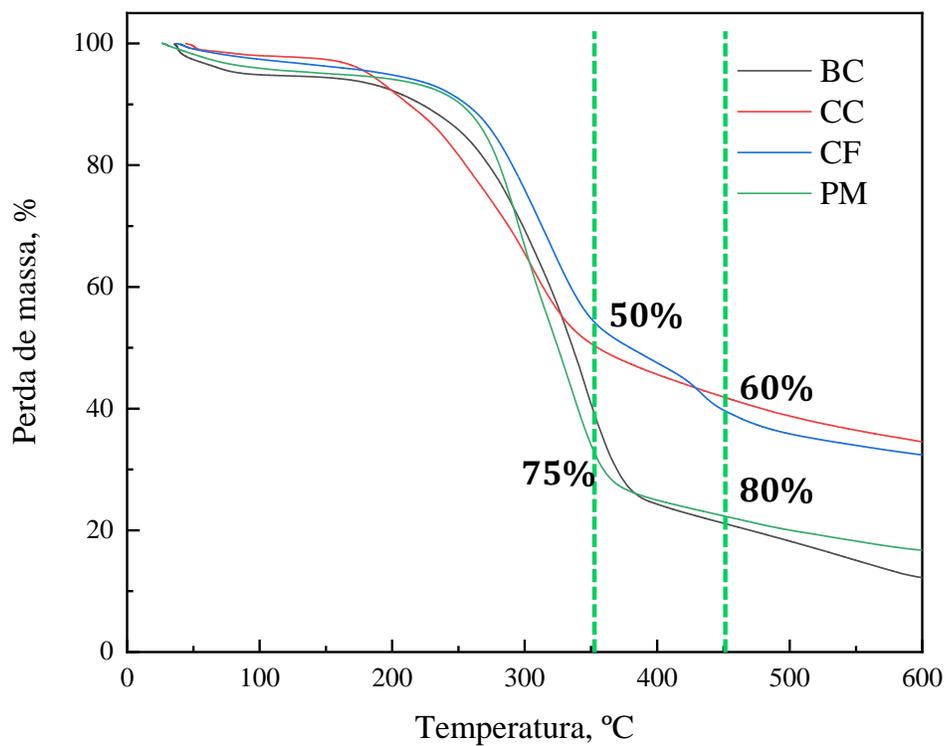
Os termogramas mostrados nas Figuras 2 e 3 fornecem informações sobre estabilidade térmica e composição dos resíduos analisados.

Os resíduos apresentaram três zonas de perda de massa. A primeira e menor perda de massa, na temperatura próxima de 100°C, em que está relacionada à perda de água. A segunda entre 250 e 350°C, referente à degradação das hemiceluloses e parte da celulose; e a terceira entre 350 e 500°C, atribuída à degradação da celulose e lignina, como relato por Ouajai e Shanks (2005).

BC e PM apresentaram estabilidade térmica semelhante e menor que CC e CF. Na temperatura de 350°C e 450°C BC e PM apresentaram, respectivamente, 75% e 80 % de perda de massa, enquanto CC e CF apresentaram em torno de 50% e 60 %, respectivamente.

A elevada perda de massa de BC e PM entre 250 e 350°C pode estar relacionada ao alto conteúdo de celulose presente neste tipo de resíduo (SANTOS et al., 2009), que é facilmente degradada durante baixas temperaturas de pirólise.

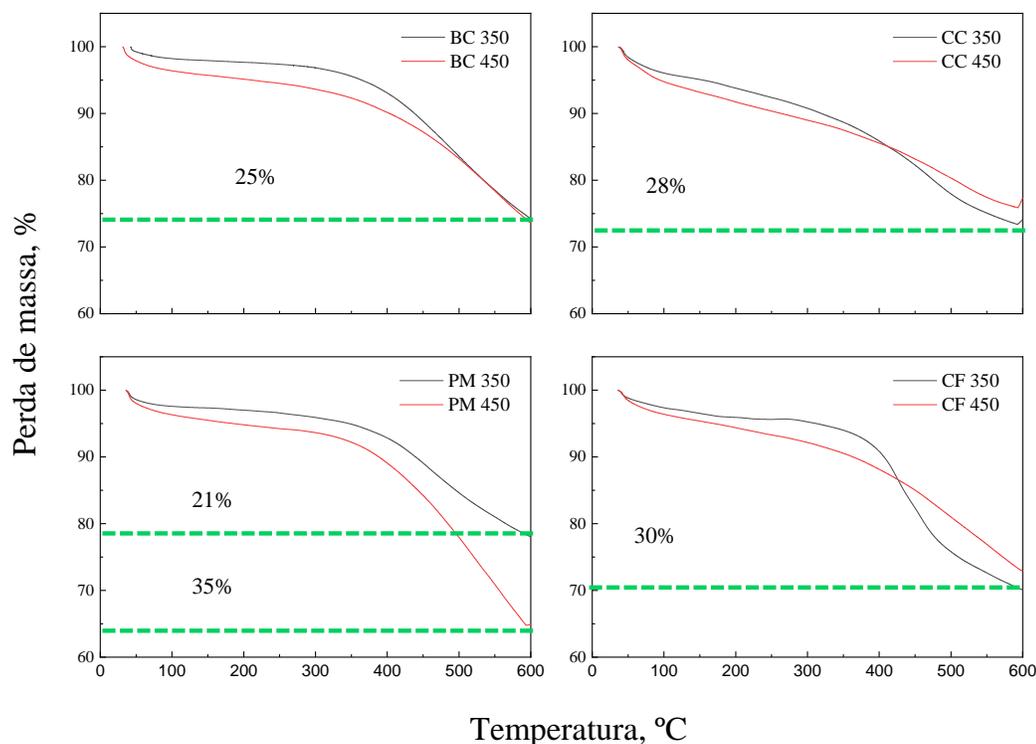
Figura 2 - Perda de massa em função da temperatura dos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar (BC), palha de milho (PM), casca de café (CC) e cama de frango (CF).



Fonte: Do Autor (2021)

Houve aumento da resistência à degradação térmica dos resíduos com o processo de pirólise, uma vez que durante o tratamento térmico houve degradação de componentes moleculares, e conseqüente fixação de carbono.

Figura 3 - Perda de massa em função da temperatura dos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar (BC), palha de milho (PM), casca de café (CC) e cama de frango (CF) pirolisados a 350 e 450°C.



Fonte: Do Autor (2021)

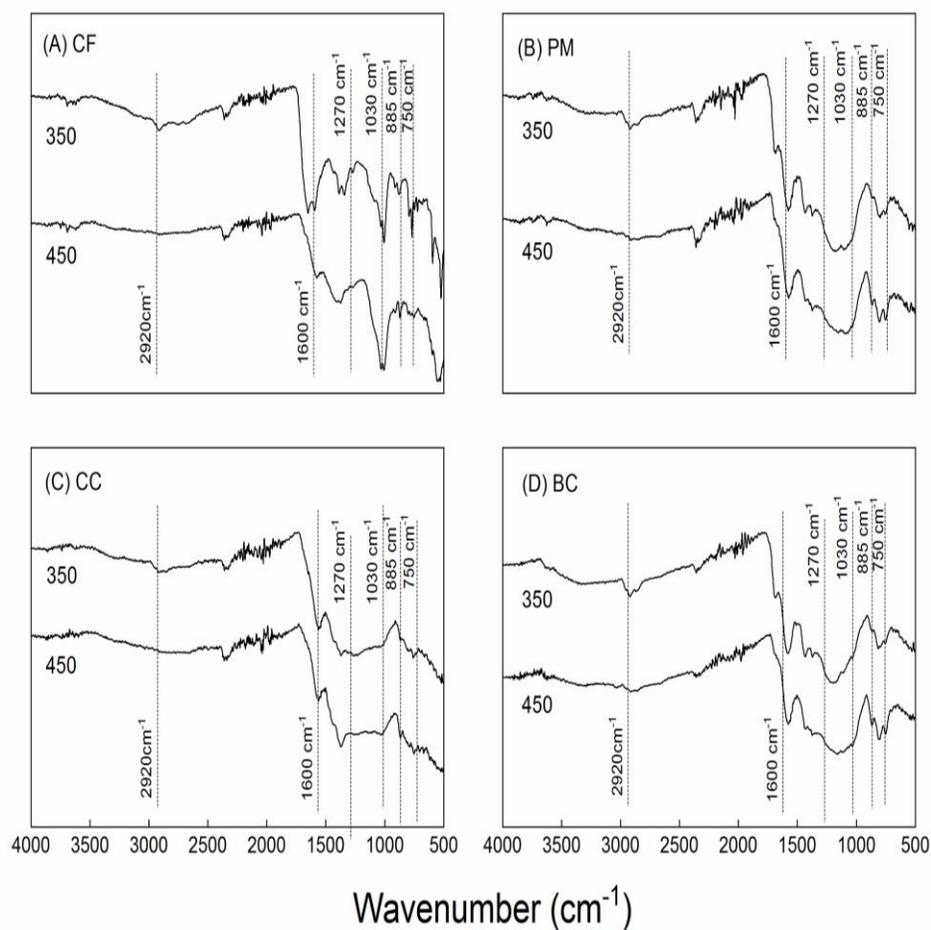
É esperado que materiais com maior conteúdo de carbono fixo apresentem maior resistência à degradação térmica, pois de acordo com Brand (2010), materiais com alto teor de carbono fixo tendem a queimar mais lentamente.

Para BC, PM e CF não houve aumento de resistência à degradação com a elevação da temperatura de pirólise de 350 para 450°C. A perda de massa ficou em torno de 25 e 30%, respectivamente. Enquanto para PM a temperatura de 350°C favoreceu a formação de biochars com maior resistência a degradação do que a temperatura de 450°C.

3.4 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho (FTIR)

A técnica de infravermelho pode ser usada como ferramenta para compreender a estrutura dos materiais, mostrando informações sobre grupos químicos presentes nos seus constituintes básicos. Os espectros resultantes da análise de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier estão mostrados na Figura 4.

Figura 4 - Espectros de FTIR dos biochars de bagaço de cana-de-açúcar (BC), casca de café (CC), cama de frango (CF) e palha de milho (PM), nas temperaturas de 350 e 450°C.



Fonte: Do Autor (2021).

Pode-se observar alterações de grupos funcionais de acordo com temperatura de pirólise (350 ou 450°C), mostrando a sua influência da temperatura nas mudanças da estrutura orgânica do biochar.

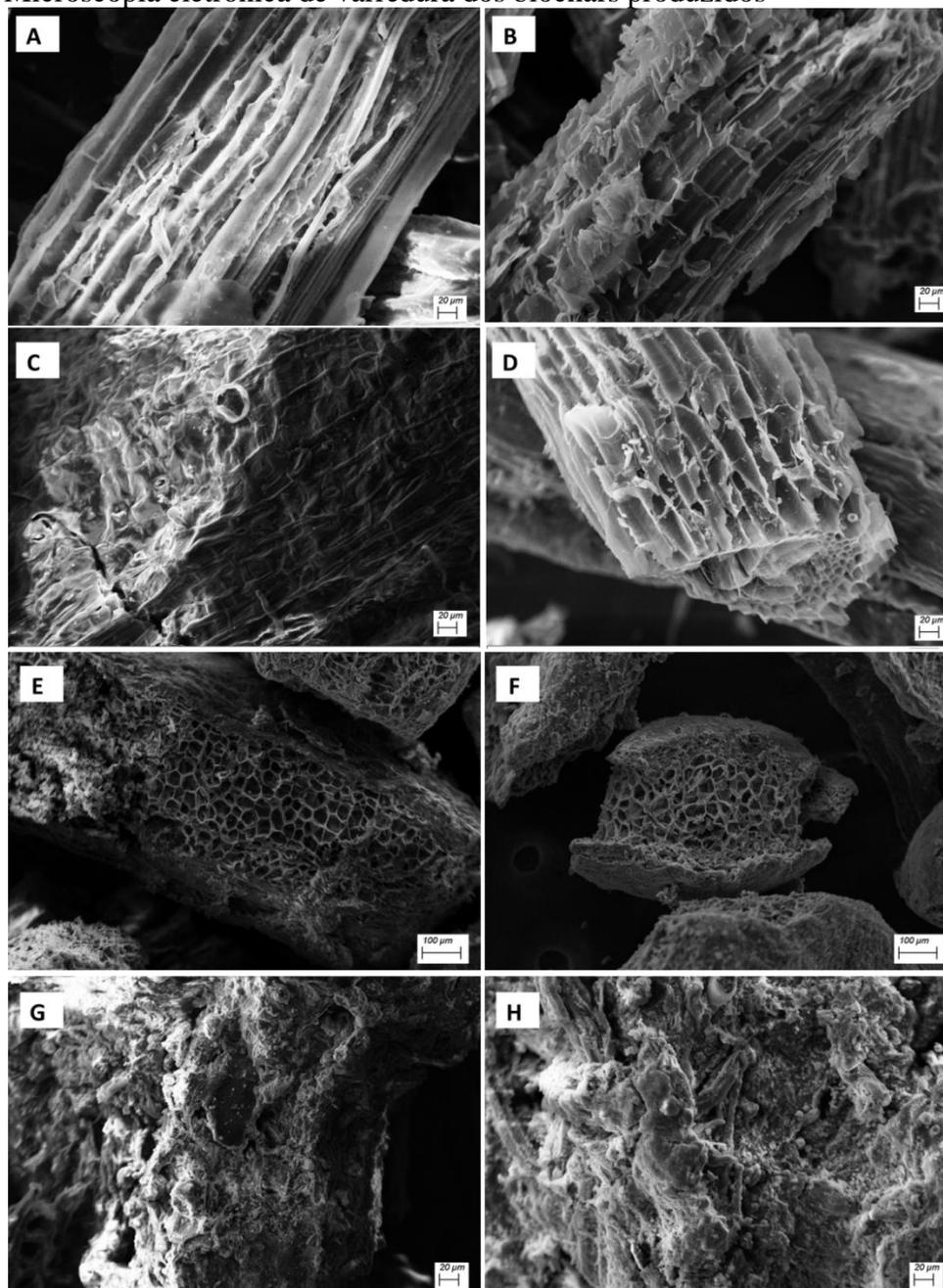
Devido à degradação e desidratação de componentes celulósicos e lenhosos (CHEN et al., 2008), houve decréscimo da intensidade das bandas em 2920 cm^{-1} , 1270 cm^{-1} e 1030 cm^{-1} , referentes ao alongamento C-H alifático, -OH fenólico (1270 cm^{-1}) e a região de alongamento C-O (1030 cm^{-1}), respectivamente.

Por outro lado, ocorreu aumento da intensidade da banda na região de 1600 cm^{-1} , referente a grupos funcionais com dupla ligação com oxigênio, como carboxilas (ácido carboxílico) e carbonilas (cetona e ésteres), responsáveis pela recalcitrância dos biochars no solo; e também das pequenas bandas em 885 e 750 cm^{-1} referentes a CH aromático fora do plano, atribuídas a um grau crescente de condensação dos compostos orgânicos de biochar, correlacionado com o aumento da temperatura de pirólise, que corrobora com alguns estudos já relatados (JINDO et al., 2014; MELO et al. 2013).

3.5 Microscopia eletrônica de Varredura

As morfologias das superfícies dos biochars de CC, CF, BC, PM nas temperaturas de 350 e 450°C podem ser observadas pelas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) na Figura 5. É possível observar que houve modificação na superfície de todos os biochars com a elevação da temperatura de pirólise, que se tornou mais quebradiça e rugosa.

Figura 5 - Microscopia eletrônica de varredura dos biochars produzidos



A-Bagaço de cana de açúcar a 350°C; B- Bagaço de cana de açúcar a 450°C; C- Palha de milho a 350°C; D-Palha de milho a 450; E- Casca de café a 350°C; F- Casca de café a 450°C; G- Cama de frango a 350°C; H-Cama de frango a 450°C.

Fonte: Do Autor (2021).

Dentre todos os materiais, BC e PM são os que apresentaram características mais semelhantes, com seção longitudinal fibrosa rugosa mais alongada, enquanto CC apresentou seção transversal mais alongada e com maior área de poros heterogêneos. A formação destes poros na superfície do biochar ocorre devido à remoção de material volátil e degradação dos componentes da parede celular durante a pirólise (PRADHAN et al., 2016; ZHAO et al., 2017). A presença de poros contribui para aumentar a área superficial e a CTC do biochar, conseqüentemente, elevando o número de sítios de adsorção que oferece espaço para retenção de água e nutrientes no solo (VARMA; MONDAL, 2016). Estas observações concordam com os resultados apresentados na Tabela 2, em que CC apresentou valores de CTC superiores a BC, PM e CF, tanto na temperatura de 350 quanto de 450°C.

4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DOS BIOCHARS

Solos degradados geralmente apresentam pH ácido e elevada saturação por alumínio, além de baixa matéria orgânica, baixa CTC e baixa quantidade de nutrientes disponíveis. A maior disponibilidade de nutrientes ocorre na faixa de pH entre 6,0 e 7,0, pois em condições de acidez excessiva tem-se uma baixa disponibilidade de nutrientes para as plantas, mesmo que estes nutrientes estejam em quantidades consideradas adequadas no solo. Portanto, antes de se pensar em adicionar nutrientes ao solo, é preciso corrigir a acidez.

Geralmente, os solos ácidos apresentam elevada toxidez por Al^{3+} e Mn^{2+} , provocando alterações na disponibilidade de nutrientes e no crescimento vegetativo, baixa eficiência no aproveitamento de fertilizantes, bem como baixa atividade biológica.

Atualmente, a forma mais prática de se corrigir acidez do solo é por meio da calagem, que promove a neutralização da acidez pela incorporação de cálcio e magnésio no solo. O biochar vem sendo estudado como alternativa de promover melhorias na fertilidade destes solos. Segundo Domingues et al. (2017), o valor de neutralização de acidez do biochar é regulado por sua composição química (especialmente cátions básicos), pelo teor de cinzas e pelo pH.

A análise de cinzas (TABELA 4) e de teor de nutrientes (TABELA 3) dos biochars demonstra a grande diferença entre eles. CC e CF tanto na temperatura de 350°C quanto na de 450°C foram os biochars que apresentaram maior teor de cinzas e nutrientes, além de pH mais elevado. Estes resultados sugerem o potencial de neutralização e de fertilização destes biochars frente aos de BC e PM.

O alto teor de Ca, P e K nos biochars de casca de café e cama de frango, principalmente na temperatura de 450°C, fornecem indícios do poder de fertilização desses materiais, podendo ser utilizados juntamente ou em substituição a fertilizantes convencionais.

Acredita-se que CC e CF podem ser utilizados, portanto, para reduzir a acidez do solo, reduzir disponibilidade de Fe e Mn, além de aumentar a condutividade elétrica do solo, o que pode diminuir a precipitação e adsorção de P, assim como fornecer Ca e K para as plantas. Os resultados refletem a presença de nutrientes no biochar, porém o modo como eles ficarão disponíveis no solo degradado ainda precisa ser investigado para validar o real potencial de utilização destes materiais.

Os biochars de BC e PM apresentaram baixas quantidades de nutrientes, porém as análises termogravimétricas e de FTIR mostram maior estabilidade térmica e aromaticidade mostrando seu potencial para imobilização de nutrientes e de persistência no solo sob diferentes condições, contribuindo para com o aumento do estoque e sequestro de carbono. Além disso, de acordo com Domingues et al. (2017), o potencial de biochar de bagaço de cana-de açúcar para remediar solos contaminados e / ou aumentar a capacidade de retenção de água não deve ser negligenciado, e precisa ser estudado.

Um fator que merece atenção é com relação à praticidade destes materiais. O rendimento gravimétrico, bem como a massa específica (TABELA 4) de CF e CC foi superior a PM e BC, indicando que na prática, a produção de CF e CC é mais viável.

Caso fosse preciso produzir a mesma massa de todos estes biochars, a quantidade requerida do resíduo *in natura* de PM e BC seria muito superior, além do fato de que, a produção de 1 kg biochar de CC e PM ocuparia um volume de 4,5 m³, enquanto a mesma massa de PM e BC ocuparia volume de 14,28 m³. Isto indica que BC e PM devem ser usados preferencialmente combinados com o objetivo de retenção de carbono e aumento da recalcitrância em solos degradados.

A elevada persistência do carbono encontrado em biochars é um fator importante que dita o tempo de persistência de biochar nos solos, o que pode ajudar a compensar as emissões de GEE (Zhang et al., 2016), bem como determina a longevidade de outros benefícios, como o aumento do CTC e aumento capacidade de retenção de água.

5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o tipo de resíduo foi o fator que mais influenciou nas características agronômicas dos biochars. A temperatura de pirólise por sua vez, potencializou as características químicas, alterou o caráter aromático dos materiais, além de reduzir o rendimento gravimétrico.

Os biochars CC e CF foram os que apresentaram maior pH, CE, CTC, teor de cinzas e nutrientes, indicando seu potencial de utilização para correção de acidez do solo e fornecimento de Ca, P e K.

Por outro lado, os biochars de BC e PM foram os que apresentaram maior teor de carbono fixo, maior estabilidade térmica e presença de grupos funcionais aromáticos, indicando ser adequados para imobilização de nutrientes no solo e sequestro de C.

A caracterização foi importante para demonstrar o ponto forte de aplicação de cada biochar, que deve ser direcionada com base nos aspectos que precisam ser melhorados no solo degradado.

Acredita-se que a utilização de CC e CF combinados com PM ou BC pode ser ótima opção quando se deseja atuar tanto na manutenção da fertilidade de solos degradados, quanto no aumento do estoque de C e imobilização de nutrientes.

REFERENCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 5 p.
- ABDELHAFEZ, A. A.; LI, J.; ABBAS, M. H. H. Feasibility of biochar manufactured from organic wastes on the stabilization of heavy metals in a metal smelter contaminated soil. **Chemosphere**, v. 117, p. 66-71, 2014.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.
- CASE, S. D. The effect of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from a sandy loam soil – the role of soil aeration. **Soil Biology and Biochemistry**, v.51, p.125-134, 2012.
- CHEN, B.; ZHOU, D.; ZHU, L. Transitional Adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. **Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 5137–5143, 2008.
- DEMIRBAS, A. Effects of temperature and particle size on biochar yield from pyrolysis of agricultural residues. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 72, p.243-248, 2004.
- DEY, D; MONDAL, P.A. Comprehensive review on biochar - the black carbon: production technologies, physico-chemical properties and utilization for sustainable. **Environmental Chemistry Letters**, v. 9, n. 34, p. 578-594, 2020.
- DOMINGUES, R. R. et al. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **Plos one**, p. 1-19, 2017.
- GASKIN, J. W. et al. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. **Transactions of the ASABE**, Saint Joseph, v. 51, n. 6, p. 2061-2069, 2008.
- JEFFERY, S. et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v. 1, n.144, p.175-187, 2011.
- JINDO, K. et al. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. **Biogeosciences.**, v. 11, p. 6613–6621, 2014.
- JOSEPH, S. et al. Developing *biochar* classification and test methods. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Ed.). **Biochar for environmental management science and technology**. New York: Earthscan, 2009. p. 107-126.

JOSEPH, S. D. et al. An investigation into the reactions of *biochar* in soil. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 48, n. 7, p. 501-515, 2010.

KAJITANI, S.; TAY, L. H. S.; ZHANG, Z. C. LI. Mechanisms and kinetic modelling of steam gasification of brown coal in the presence of volatile-char interactions. **Fuel**, v.103, p.7-13, 2013.

KLOSS, S. et al. Characterization of slowpyrolysis *biochars*: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on *biochar* properties. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 41, n. 4, p. 990-1000, 2012.

LEHMANN, J. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, Washington, v. 5, n. 7, p. 381-387, 2007.

LEHMANN, J. et al. *Biochar* effects on soil biota: a review. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: an introduction. **Science and Technology**, Mysore, v. 1, p. 1-12, 2009.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MELO, L. C. A. et al. Influence of pyrolysis temperature on cadmium and zinc sorption capacity of sugar cane straw- derived *biochar*. **Bio Resources**, Raleigh, v. 8, n. 4, p. 4992-5004, 2013.

MITCHELL, P. J.; DALLEY, T. S. L.; HELLEUR, R. J. Preliminary laboratory production and characterization of *biochars* from lingo cellulosic municipal waste. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 99, n. 2, p. 71-78, Feb. 2013.

OH, T. K. et al. Characterization of *biochar* derived from three types of biomass. **Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University**, Fukuoka-Shi, v. 57, n. 1, p. 61-66, 2012.

OUAJAI, S.; SHANKS, R. A. Composition, structure and thermal degradation of hemp cellulose after chemical treatments. **Polymer Degradation and Stability**, Essex, v. 89, n. 2, p. 327-335, Aug. 2005.

PRADHAN, D. et al. Pyrolysis of Mahua seed (*Madhuca indica*) – Production of biofuel and its characterization. **Energy Conversion and Management**, v. 108, p. 529-538, 2016.

RAJKOVICH, S. et al. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of *biochars* with varying properties to a temperate soil. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 48, n. 3, p. 271-284, Apr. 2011.

RStudio Team (2020). **RStudio**: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA
URL <http://www.rstudio.com/>.

SANTOS, J. R. A., GOUVEIA, E. R. Produção de bioetanol de bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 11, p. 27 – 33, 2009.

SINGH, R. et al. Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: An ecological perspective. **Ecological Engineering**, v. 72, p. 324-347, 2015.

VARMA, A. K.; MONDAL, P. Physicochemical characterization and pyrolysis kinetics of wood sawdust. **Energy Sources**, v. 38, n. 17, p. 2536-2544, 2016.

VEIGA, T. R. A. L. **Síntese e caracterização de biochars de biomassa de casca de café e de madeira de eucalipto**. Lavras: Ed. UFLA, 2016. 115 p.

VEIGA, T. R. A. L. et al. Different plant biomass characterizations for biochar production. **Cerne**, Laras, v.23, n.4, p. 529-536, 2017.

WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A Review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1002-1022, 2019.

YANG, H., YAN, R., CHEN, H., LEE, D. H., ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel.**, v. 86, n. 1781–1788, 2007. Doi:10.1016/j.fuel.2006.12.013

ZIMMERMAN, R. R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). **Environmental Science and Technology**, v. 44, n. 1295-1301, 2010.

ZHANG, A. et al. Effect of *biochar* amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 351, n. 1/2, p. 263-275, 2012.

ZHANG, J.; WANG, Q. Sustainable mechanisms of biochar derived from brewers' spent grain and sewage sludge for ammonia-nitrogen capture. **Cleaner Production**, v. 112, p. 3927-3934, 2016.

ZHAO, L. et al. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 256 - 257, p. 1-9, 2013.

ZHAO, B. et al. Surface characteristics and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the bio-char produced by co-pyrolysis from municipal sewage sludge and hazelnut shell with zinc chloride. **Bioresource Technology**, v. 243, p. 375-383, 2017.

CAPÍTULO 3: EFEITO DA APLICAÇÃO DE BIOCHAR NO DESENVOLVIMENTO DE VEGETAÇÃO E NA FERTILIDADE EM SOLO DEGRADADO POR EROSÃO

RESUMO

O uso de biochars no gerenciamento de resíduos, bem como na melhoria das propriedades químicas e físicas do solo pode viabilizar processos de recuperação de áreas degradadas dentro de propriedades rurais. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de utilização de biochars produzidos com resíduos da agroindústria no processo de recuperação de voçorocas. De forma específica: (i) avaliar as modificações ocorridas no solo-sedimento após sua aplicação e (ii) avaliar o efeito do biochar no desenvolvimento de uma planta indicadora, o Capim Vetiver. Foram produzidos biochars de casca de café (CC), cama de frango (CF) e bagaço de cana-de-açúcar (BC), na temperatura final de pirólise de 450°C. Em seguida, foi coletado, no horizonte C, solo-sedimento de uma voçoroca ativa, que foi caracterizado quanto aos seus atributos físicos e químicos. O solo-sedimento foi incubado por 30 dias com diferentes doses de biochars, a fim de avaliar o efeito dos tratamentos sobre a fertilidade do mesmo. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, contendo 5 biochars, sendo 2 puros (CC e CF) e 3 misturas (CC+CF, CC+BC, CF+BC), em 6 diferentes concentrações v/v (0, 0,5;1;2;5;10%) e 4 repetições, totalizando 104 amostras. A planta indicadora utilizada foi o capim *Vetiveria zizanioides L.*, que foi avaliado quanto ao seu desenvolvimento em parte aérea e raiz. Os resultados indicaram que houve aumento significativo na fertilidade do solo-sedimento à medida que se elevou a concentração dos biochars. Os melhores resultados do teste de incubação foram para os tratamentos CF, CC+CF e CC, principalmente devido à grande quantidade de cinzas e nutrientes presentes neste tipo de biochar, que promoveram aumentos consideráveis no pH, e na quantidade de fósforo e potássio disponíveis. Com relação ao efeito dos tratamentos sobre desenvolvimento da planta indicadora, CC+BC e CF+BC, principalmente a 2 e a 5%, foram os que apresentaram os melhores resultados, proporcionando aumento de até 4 vezes na quantidade de massa seca total das plantas. A aplicação de CC+BC e CF+BC a 2 equivale a uma dose de 5,4 ton/ha, enquanto que a 5% equivale a 13,5 toneladas desses biocarvões por hectare.

Palavras-chave: Biocarvão. Biomassa vegetal. Fertilidade do solo. Imobilização de carbono. Erosão.

ABSTRACT

The use of biochars in waste management, as well as in improving the chemical and physical properties of the soil, can facilitate the recovery of degraded areas within rural properties. The objective of this work was to evaluate the potential use of biochars produced with agro-industrial residues in the gullies recovery process. Specifically: (i) to evaluate the modifications that occurred in the soil-sediment after its application and (ii) to evaluate the effect of biochar on the development of an indicator plant, Vetiver grass. Coffee husk biochars (CC), chicken litter (CF) and sugarcane bagasse (BC) were produced at the final pyrolysis temperature of 450°C. Then, soil-sediment from an active gully was collected, at horizon C, which was characterized in terms of its physical and chemical attributes. The soil-sediment was incubated for 30 days with different doses of biochars, in order to evaluate the effect of the treatments on its fertility. The experimental design was completely randomized, containing 5 biochars, 2 pure (CC and CF) and 3 mixtures (CC+CF, CC+BC, CF+BC), at 6 different v/v concentrations (0, 0,5 ;1;2;5;10%) and 4 repetitions, totaling 104 samples. The indicator plant used was the grass *Vetiveria zizanioides* L, which was evaluated for its development in aerial part and root. The results indicated that there was a significant increase in soil-sediment fertility as the concentration of biochars increased. The best results of the incubation test were for the treatments CF, CC+CF and CC, mainly due to the large amount of ash and nutrients present in this type of biochar, which promoted considerable increases in pH, and in the amount of phosphorus and potassium available. Regarding the effect of treatments on indicator plant development, CC+BC and CF+BC, mainly at 5%, were the ones that showed the best results, providing an increase of up to 4 times in the amount of total plant dry mass. The application of CC+BC and CF+BC at 2% is equivalent to a dose of 5.4 tons per hectare, while at 5% it is equivalent to 13.5 tons of these biochars per hectare.

Keywords: Biochar. Plant biomass. Soil fertility. Carbon immobilization. Erosion

1 INTRODUÇÃO

Ameaças como erosão, compactação e perda da matéria orgânica atingem quase um terço das terras do planeta. Estima-se que cerca de 30% dos solos do mundo estão degradados (FAO, 2019). Perdas anuais de culturas causadas por erosão foram estimadas em 0,3% da produção. Se o problema continuar nesse ritmo, uma redução de mais de 10% poderá acontecer até 2050. Entende-se que, uma das maneiras de interromper o ritmo crescente de degradação dos solos é com a adoção de manejo e técnicas sustentáveis (FAO, 2019).

Quando se pensa em erosão, pode-se dizer que a forma mais grave é quando ocorre a total deformação do terreno (voçorocas), com perdas irreparáveis na estrutura física e química do solo, tornando o processo de recuperação e reconstituição da paisagem difícil, caro e lento, principalmente para pequenas propriedades rurais (ARAUJO; ALMEIDA; GERRA, 2017).

O crescimento de plantas em solos com esse nível de degradação é inibido por características desfavoráveis, como pH ácido, baixa matéria orgânica, baixa capacidade de troca de cátions, disponibilidade de nutrientes reduzida e alta compactação do solo. Portanto, é essencial a adoção de medidas que possam melhorar as propriedades físico-químicas desses solos, e consequentemente, que favoreçam a recuperação e estabelecimento da cobertura vegetal.

Dados do IBGE (2019) indicam a tendência de aumento de 60% dos cultivos no Brasil para suprir a demanda populacional, o que resulta na produção de mais resíduos agroindustriais. Dispostos aleatoriamente na natureza esses resíduos podem gerar impactos ambientais, como a poluição das águas e da atmosfera. Esses impactos envolvem desde a degradação da qualidade da água devido ao excesso de matéria orgânica e o consequente aumento descontrolado de algas, provocado pelos nutrientes fósforo e nitrogênio contidos nos resíduos, até a emissão de metano (CH₄) na atmosfera, que é um dos gases responsáveis pelo aquecimento global (EPE, 2019).

A criação de uma tecnologia que atue tanto no gerenciamento de resíduos como na melhoria das propriedades físicas e químicas de solos degradados é de grande importância, uma vez, que poderia viabilizar processos de recuperação de áreas degradadas dentro de propriedades rurais, trazendo vários benefícios que vão desde a melhoria da qualidade do ambiente, até o aumento da capacidade produtiva e valorização da terra.

Pensando nestes dois aspectos, a conversão de resíduos agrícolas em biochar deve ser considerada, uma vez que, trata-se de um produto eficaz no gerenciamento de resíduos (KAJITANI et al., 2013), e que pode atuar tanto na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (MENDES et al., 2021), como no aumento de estoque de carbono (ZIMMERMAN, 2010); além de contribuir no combate às mudanças climáticas, por meio da redução da emissão de gases prejudiciais ao ecossistema (JEFFERY et al., 2011; CASE et al, 2012).

Estudos já foram realizados com intuito de provar as melhorias na fertilidade do solo com a aplicação do biochar (WANG et al., 2019; MENDES et al., 2021), ainda, são bem escassas as pesquisas que avaliam o seu desempenho em solos degradados por processos erosivos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de utilização de biochar de resíduos da agroindústria no processo de recuperação de voçorocas. De forma específica: avaliar as modificações ocorridas no solo após aplicação de biochars, visando entender se os nutrientes presentes possuem capacidade de interagir com o solo; e promover melhorias no desenvolvimento de uma vegetação muito utilizada em recuperação de voçorocas, o capim *Vetiveria zizanioides* L.

2 MATERIAL E METODOS

2.1 Matéria-prima

Para a produção dos biochars foram utilizadas cascas de café (casca + polpa + pergaminho) (CC) da espécie *Coffea arabica*, bagaço de cana-de-açúcar (BC),) e cama de frango (CF). As amostras das diferentes biomassas foram obtidas de acordo com informações apresentadas na Tabela 5.

A cama de frango é produto composto principalmente de palha de arroz, serragem de eucalipto, fezes, urina, restos de ração e penas que se misturam durante o processo de criação das aves. A cama de frango utilizada neste trabalho foi coletada após a criação de um lote de frango (55 dias) e após os procedimentos de trituração e de enleiramento.

Essas matérias primas foram escolhidas devido à grande disponibilidade na região. A origem das diferentes biomassas utilizadas na produção dos biochars encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Origem das biomassas utilizadas para produção dos biochars.

| Material utilizado | Empresa | Cidade (MG) |
|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| Casca de café | Fazenda Limeira | Santo Antônio do Amparo |
| Bagaço de Cana | Alambique Júlio Penha | Nepomuceno |
| Cama de Frango | Granja Almeida | Nepomuceno |

Fonte: Do autor (2021).

2.2 Preparação dos biochars

As biomassas foram moídas e passadas em peneiras com malha de 2,5 mm. Em seguida foram secas em estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por, aproximadamente, 24 horas e pesadas para obtenção da massa seca. Posteriormente, cerca de 16 litros de cada tipo de material foram submetidos à temperatura inicial de 100°C e temperatura final de pirólise de 450°C , permanecendo 30 minutos na temperatura final. Foram necessárias 8 fornadas de cada material para produzir os 16 litros de biochar. A taxa de aquecimento adotada foi de $1,67^\circ\text{C}/\text{min}$.

A temperatura foi escolhida com base nos trabalhos realizados por Lehmann (2007) e Veiga (2016), que relataram que as melhores temperaturas para produção de biochars com intuito agrônômico correspondem de 350 a 550°C.

2.3 Caracterização da voçoroca

A voçoroca está localizada em Santo Antônio do Amparo, MG na latitude -20.968248° e longitude -44.897708° , dentro da Fazenda Samambaia (FIGURA 6). De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima predominante na região é o Cwb- Clima temperado úmido com inverno seco e verão quente, com temperatura média de $19,6^\circ\text{C}$ e média anual de pluviosidade de 1648 mm.

Figura 6 - Localização da Voçoroca



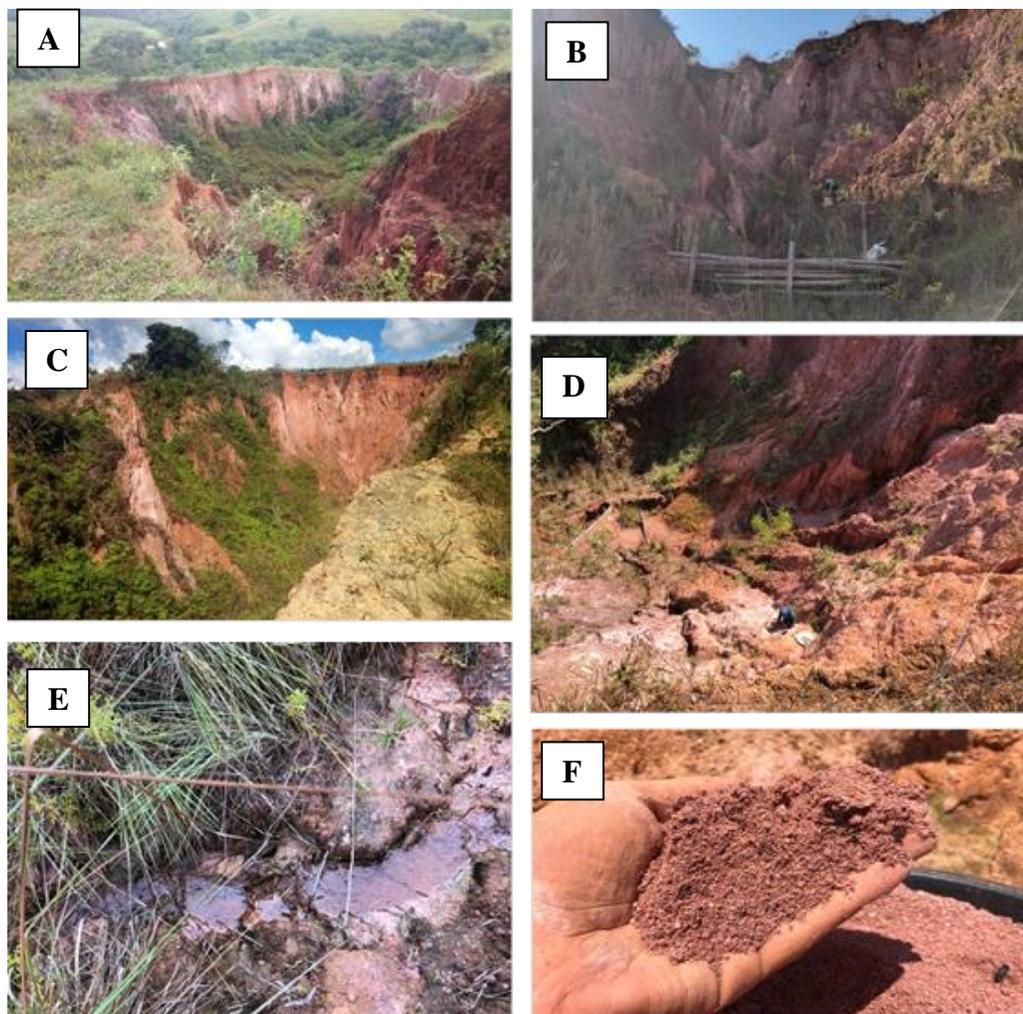
Fonte: Do autor (2021).

Segundo os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) os tipos de solo predominantes no município de Santo Antônio do Amparo são: Latossolo Vermelho Distrófico,

Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico e Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, que ocorre principalmente na região de estudo.

A voçoroca possui área de 0,6 hectares, com classe de erosão forte, com presença de sulcos profundos (>15 metros) e com histórico de início de ocorrência datado antes de 2003 (FIGURA 7).

Figura 7 - Voçoroca, Fazenda Samambaia, Santo Antônio do Amparo-MG



A) Vista de cima da voçoroca, B) Vista da cabeceira, local de erosão ativa, C) Vista da lateral da voçoroca onde se pode notar a presença de vegetação nos braços e porções mais estáveis da voçoroca, D) Local da coleta de solo-sedimento para montagem do experimento, E) Água abundante correndo dentro da voçoroca, proveniente do afloramento de água subterrânea na cabeceira da voçoroca, F) Solo-sedimento coletado na cabeceira da voçoroca.

Fonte: Do autor (2021).

A voçoroca apresenta taludes íngremes e ocorrência de cristas de material rochoso com tom claro e composição mineralógica mais resistente. Nota-se a crescente presença de vegetação em algumas porções internas da voçoroca, como braços e zonas mais estáveis. A distribuição da vegetação ocorre de forma desigual, com predominância de gramíneas, samambaias e arbustos. A região com ausência de vegetação consiste na cabeceira, local alvo do estudo, principalmente onde se encontra afloramento de água subterrânea que se espalha e torna o local úmido. Nesse local, a fertilidade baixa e a umidade excessiva dificultam o estabelecimento da cobertura vegetal.

2.4 Coleta do solo-sedimento

Para a realização do experimento foi coletado solo-sedimento na porção mais interna da voçoroca, correspondente ao horizonte C (FIGURA 7D e 7F). Após a coleta o sedimento foi peneirado (< 5 mm), seco em ambiente aberto e sombreado.

2.5 Caracterização química e física do solo-sedimento da voçoroca

Os atributos químicos da voçoroca foram determinados conforme procedimentos da Embrapa (1997): pH (H₂O) = 5,0; M.O = 0,3 %; P = 2,3 mg dm⁻³; K = 10,8 mg dm⁻³; Ca = 0,3 cmolc dm⁻³; Mg = 0,1 cmolc dm⁻³; Al = 0,9 cmolc dm⁻³; (H+Al) = 1,5 cmolc dm⁻³; B = 0,04 mg dm⁻³; Cu = 0,2 mg dm⁻³; Fe = 38,7 mg dm⁻³; Mn = 2,4 mg dm⁻³; Zn = 0,7 mg dm⁻³; Soma de Bases (SB) = 0,44 cmolc dm⁻³; CTC (T) = 1,94 cmolc dm⁻³; Índice de saturação de base = 22,68 %, Argila = 21,5 %, Silte = 19,2% e Areia total = 59,3%.

2.6 Ensaio de incubação

Foram testadas doses de 0 (controle), 0,5; 1; 2; 5; 10% dos biochars de CC, CF, e as misturas de 50% (V/V) de CC+CF, CC+BC, CF+BC. A escolha de utilização de 100% dos biochars de CC e CF foi com base na maior quantidade de nutrientes presentes nesses biochars.

A característica porosa do biochar de bagaço de cana-de-açúcar (BC) é muito interessante, no entanto, devido a sua baixa massa específica e baixa quantidade de nutrientes, optou-se por utilizá-lo apenas de forma misturada.

Para as diferentes concentrações propostas, foi calculado os valores correspondentes em tonelada por hectare (ton/ha), levando-se em consideração a densidade dos biochars e suas misturas, bem como a densidade do solo-sedimento (TABELA 6).

Tabela 6 – Valores em toneladas por hectare correspondente as diferentes concentrações propostas.

| Concentração (%) | Biochars | | | | |
|------------------|-----------------------------|----|-------|-------|-------|
| | CC | CF | CC+CF | CC+BC | CF+BC |
| | Toneladas/hectares (ton/ha) | | | | |
| 0,5 | 2 | 2 | 2 | 1,4 | 1,4 |
| 1 | 4 | 4 | 4 | 2,7 | 2,7 |
| 2 | 8 | 8 | 8 | 5,4 | 5,4 |
| 5 | 20 | 20 | 20 | 13,5 | 13,5 |
| 10 | 40 | 40 | 40 | 27 | 27 |

Fonte: Do autor (2021).

Os biochars nas diferentes concentrações foram misturados no solo-sedimento e colocados em copos plásticos de 700 ml, adotando-se quatro repetições por tratamento. As amostras foram cobertas com papel alumínio e mantidas à temperatura ambiente por 30 dias. A quantidade de água dos tratamentos foi mantida constante, sempre a 70% da capacidade de campo. Pesagens foram feitas a cada 3 dias para certificar que a quantidade de água presente correspondia a 70% da capacidade de campo.

2.7 Caracterização química do solo-sedimento após a incubação

Após os 30 dias de incubação, as 4 repetições de cada tratamento foram misturadas, e então obtida uma amostra composta para realização da análise química de cada tratamento.

Assim como no solo-sedimento recém-retirado da voçoroca, os atributos químicos da voçoroca foram determinados conforme o procedimento da Embrapa (1997), onde foram apresentados os teores de macro e micronutrientes, pH, CTC e matéria orgânica.

2.8 Montagem do experimento

A montagem do experimento ocorreu em viveiro, utilizando vasos de 1 litro contendo solo-sedimento da voçoroca e os biocarvões de CC, CF, CC+CF, CC+BC, CF+BC, nas doses de 0 (controle), 0,5; 1; 2; 5; 10%.

Como planta indicadora para avaliar o efeito da aplicação dos biochars no solo da voçoroca utilizou-se o Capim Vetiver (*Vetiveria zizanioides* L) (FIGURA 8). Trata-se de um capim muito utilizado para contenção de encostas, taludes, proteção de margens de cursos d'água e fitorremediação. As barreiras vivas de vetiver reduzem a velocidade de escoamento superficial, proporcionando a infiltração da água no perfil do solo e a retenção de sedimento. As raízes do vetiver formam densa rede, alcançando até 5 metros de profundidade, promovendo a estabilidade das encostas.

Figura 8 - Planta indicadora



Fonte: Do autor (2021).

Foi plantada uma muda por vaso, e realizadas irrigações em dias alternados para manter a umidade do solo. Após o período de 40 dias as plantas foram retiradas dos vasos, em seguida

colocadas em sacos de papel e secas em estufa com circulação forçada na temperatura de $65\pm 2^{\circ}\text{C}$ por 72 horas, até atingirem massa constante. Depois disso, foram feitas medidas da massa seca da parte aérea (MSPA) e da massa seca das raízes (MSR), e além de calculada a massa seca total (MST), como sendo a soma da MSPA com MSR.

2.9 Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, utilizando 5 biochars (CC450, CF450, CC450+CF450, CC450+BC450, CF450+BC450) em 6 concentrações (0; 0,5; 1; 2; 5; 10), com 4 repetições totalizando 104 amostras.

Os dados foram submetidos à análise de variância. Quando significativo, foi utilizado o teste de Scott-knott a 1% de probabilidade como teste de médias para avaliar se houve diferença entre os tratamentos. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa estatístico R Studio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

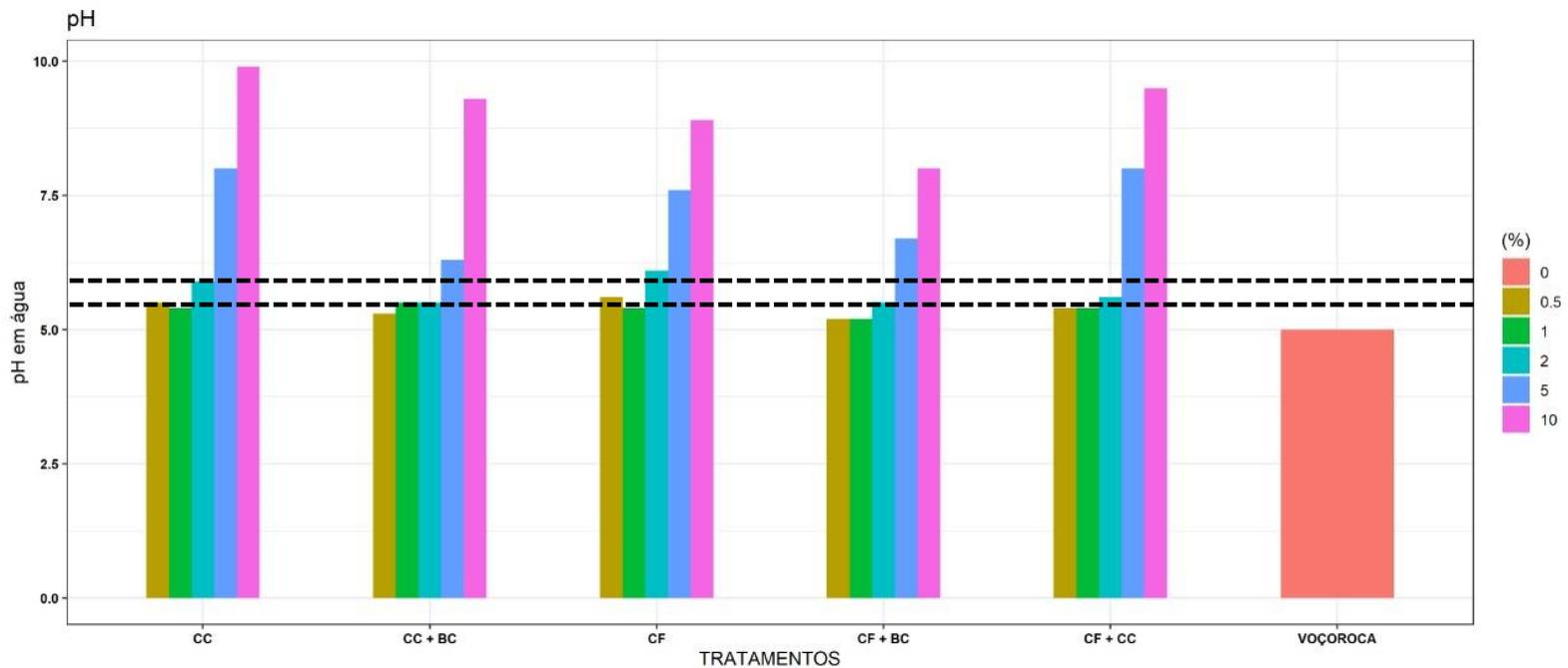
3.1 Efeitos na acidez do solo

A grande maioria dos solos brasileiros apresentam pH menor que 5,5, condição química que pode se desdobrar em baixa fertilidade e baixo desenvolvimento da vegetação. Em situações de pH menor que 5,5, o hidrogênio (H^+) atua sobre a fase mineral do solo, liberando íons Al^{3+} trocáveis a solução do solo, dificultando o crescimento da maioria das culturas (BOHNEM, 1995).

O solo-sedimento coletado dentro da voçoroca apresentou pH ácido, em torno de 5 (FIGURA 9). Com a adição dos biochars teve-se aumento linear do pH em todas as concentrações aplicadas. Considerando-se como recomendado o pH em torno de 5,5 a 6, doses de 0,5 e 2% de CC e de CF seriam suficientes para reduzir a acidez do solo-sedimento. Estas doses correspondem a 2 e 8 ton/ha, respectivamente. Enquanto para os biochars de CF+BC e de CC+BC seriam necessárias doses de 5%, ou seja, aplicações superiores a 13,5 ton/ha destes biochars.

Todos os biochars a 10% elevam demais o pH, podendo gerar consequências negativas por meio da alcalinização excessiva do solo-sedimento. Para CC e CC+CF, na dose de 10%, o pH pode chegar a 9.9 e 9.5, respectivamente.

Figura 9 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CF+CC) sobre o pH do solo-sedimento.



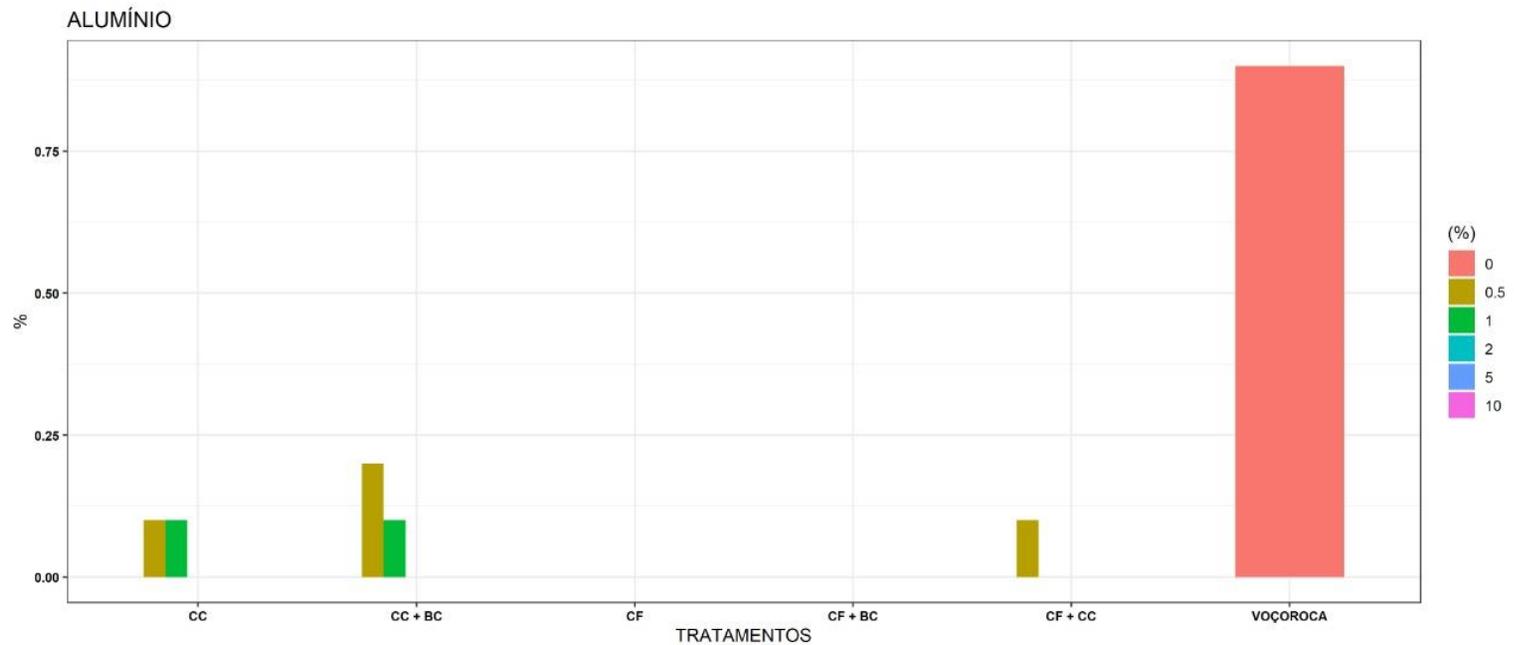
Fonte: Do autor (2021).

O aumento do pH no solo-sedimento tratado acompanhou os valores de pH dos biochars e está relacionado à maior quantidade de cinzas e, conseqüentemente, espécies alcalinas presentes em CC e CF. Os valores de Al^{3+} no solo-sedimento antes da incubação estavam em torno de $0,9 \text{ cmol/dm}^3$. Todos os tratamentos diminuíram a quantidade de Al^{3+} no solo-sedimento tratado (FIGURA 10).

O aumento do pH no solo-sedimento tratado acompanhou os valores de pH dos biochars e está relacionado à maior quantidade de cinzas e, conseqüentemente, espécies alcalinas presentes em CC e CF.

Os valores de Al^{3+} no solo-sedimento antes da incubação estavam em torno de $0,9 \text{ cmol/dm}^3$. Todos os tratamentos diminuíram a quantidade de Al^{3+} no solo-sedimento tratado (FIGURA 10).

Figura 10 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a quantidade de Al^{3+} do sol.



Fonte: Do autor (2021).

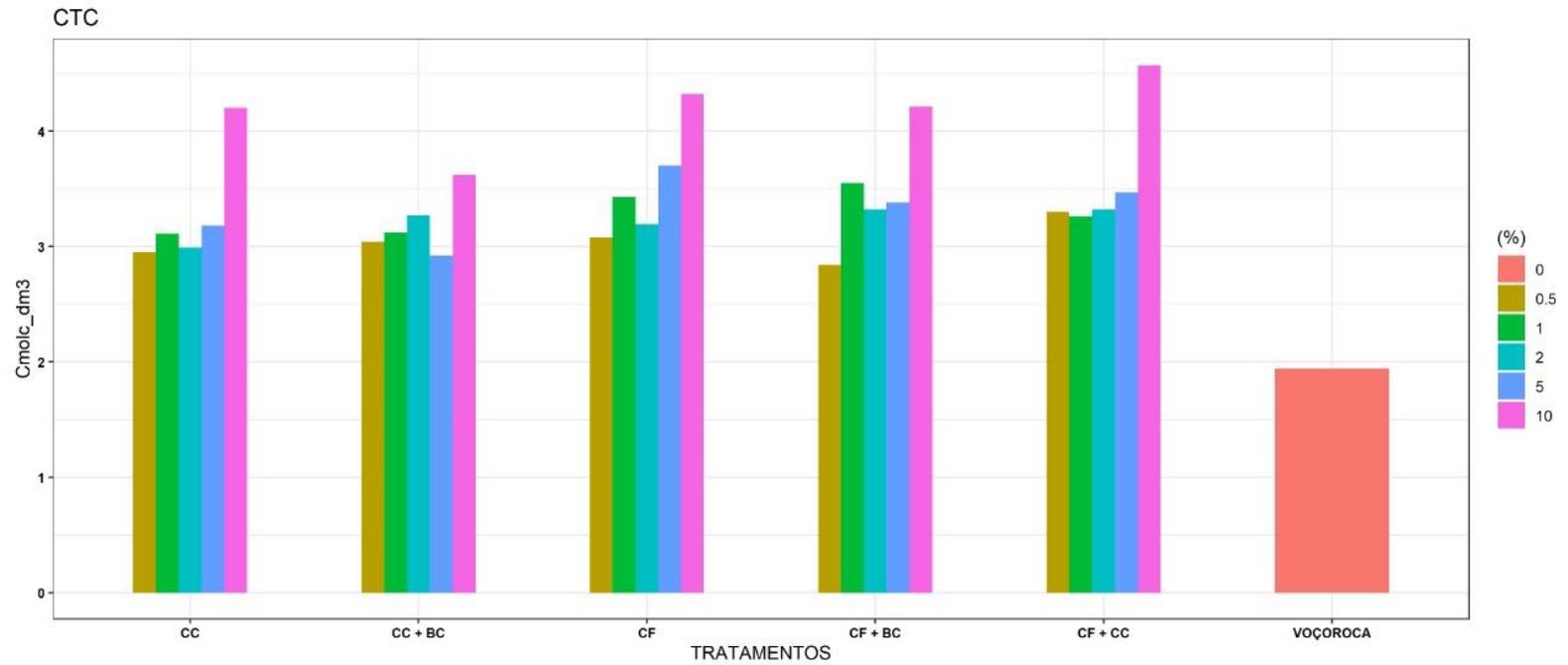
3.2 Efeitos na CTC e matéria orgânica do solo

A CTC (capacidade de troca de cátions) é dada pela quantidade de cátions retidos, por unidade de massa ou volume do solo. Ela é influenciada por alguns fatores do solo como: mineralogia, textura, teor de matéria orgânica e pH.

Com a adição de biochar no solo-sedimento, mudanças na CTC foram observadas (FIGURA 11). No geral, a CTC respondeu de forma positiva com o aumento da concentração dos biochars. CC+CF foi o material que apresentou a melhor resposta com relação à CTC. Na dose de 10%, a CTC foi 3 vezes maior que a do solo-sedimento sem tratamento. A dose 10% de CC+CF corresponde a uma aplicação de 27 ton/ha.

Os altos valores de CTC resultantes da aplicação de CF, CC, e CC+CF podem ser explicados devido à alta concentração de K nestes resíduos que, durante a pirólise, pode se intercalar e causar a separação das lamelas de carbono pela oxidação de átomos de carbono reticulados, resultando na formação de grupos de superfície na borda das lamelas de carbono (ADINATA et al., 2007).

Figura 11 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a CTC (capacidade de troca de cátions) do solo-sedimento.



As mudanças de CTC do solo-sedimento é resultado dos altos valores de CTC dos biochars, que está associada à combinação de características de matéria-prima com as condições de pirólise.

As terras prestas de índio (TPI's) apresentam CTC 2 vezes maior que os solos adjacentes. Este fato é atribuído à alta quantidade de C presente na matéria orgânica que foi adicionada a esses solos por meio da incorporação de materiais carbonizados (LIANG et al., 2006).

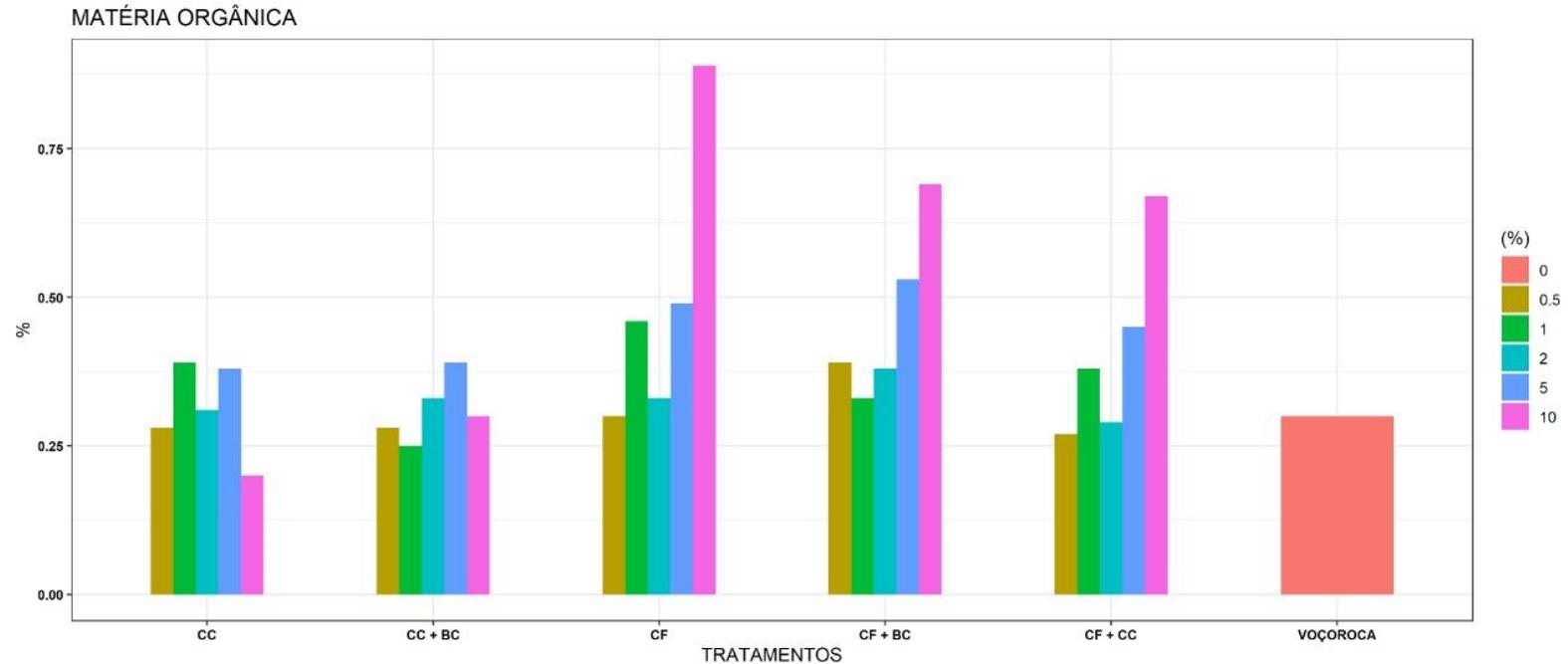
A CTC é fortemente dependente da presença de matéria orgânica e do pH (HOSSAIN et al., 2011; MELO et al., 2013; NOVAK et al., 2009). Já foi comprovado que biochars alcalinos são capazes de elevar pH do solo-sedimento, e conseqüentemente a CTC.

O aumento observado pela adição de biochars que contêm CC e CF é resultado da alta CTC destes materiais, bem como do alto poder de calagem deles. Todos os resultados apresentados indicam que a CTC será consistentemente maior quando o biochar possuir alto teor de nutrientes e cinzas.

Durante o processo de pirólise elementos químicos como Mg, K, P e Na catalisam a formação de grupos oxigenados na borda dos biochars (DIAZ-TERÁN et al., 2003), que contribuem para o aumento de cargas negativas. No entanto, é preciso estar atento à temperatura de pirólise às quais estes biochars são submetidos, uma vez que o aumento da temperatura poderá reduzir drasticamente estes grupos. Portanto, as temperaturas mais indicadas estão entre 350 e 450°C (SONG; GUO, 2012). Tais afirmações explicam porque CC e CF resultaram em maior CTC.

Os tratamentos contendo biochars de CC e principalmente de CF proporcionaram um maior incremento de matéria orgânica (FIGURA 12). Tal resultado pode estar associada a baixa relação C/N deste tipo de biochar, frente a BC, que se caracteriza por ser mais fibroso e com relações C/N mais altas, portanto, demorando mais para decompor.

Figura 12 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a matéria orgânica do solo-sedimento.



Fonte: Do autor (2021).

A matéria orgânica está intimamente ligada a CTC do solo, portanto os resultados apresentados na Figura 11 para CTC se relacionam com os resultados apresentados para matéria orgânica.

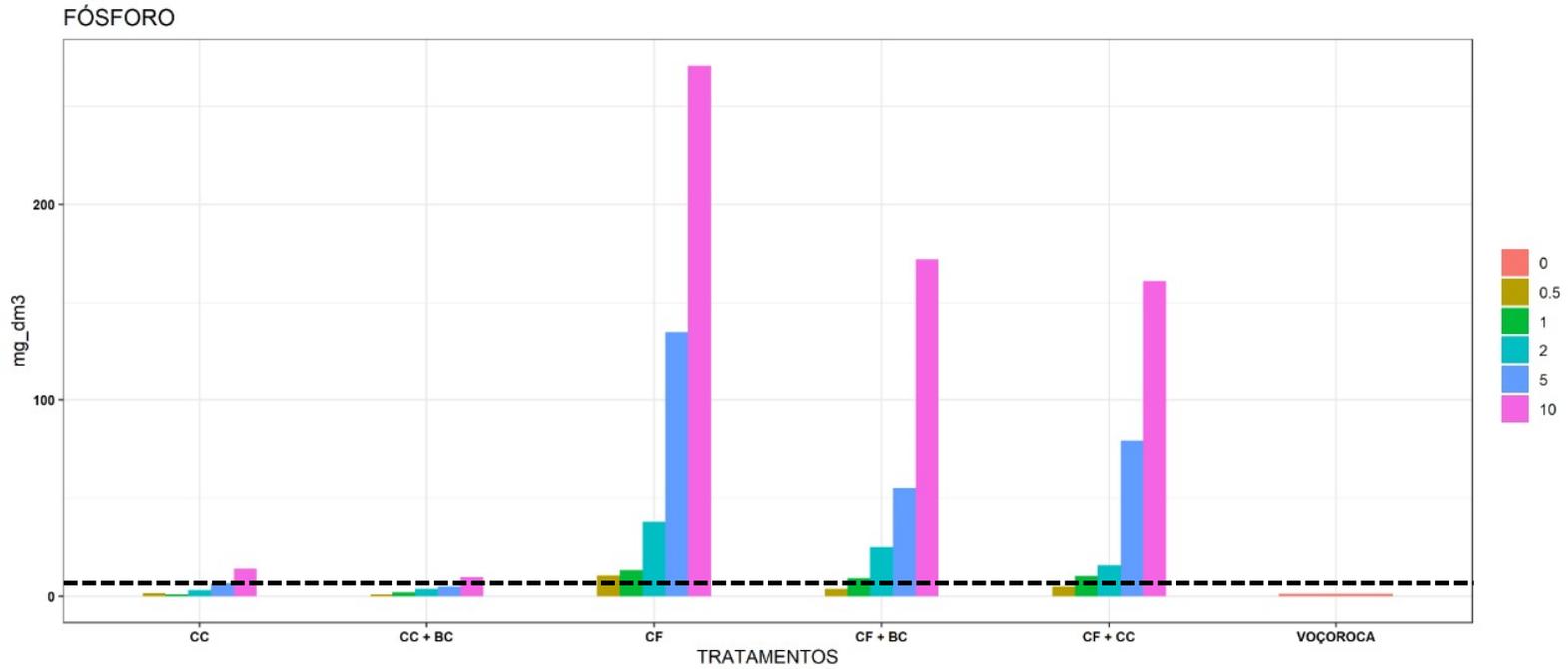
3.3 Efeitos da aplicação dos biochars na disponibilidade de fósforo, potássio, cálcio e magnésio.

A disponibilidade de fósforo aumentou com adição de todos os tratamentos, e de forma mais pronunciada para aqueles que contêm biochar de CF, CF+CC e CF+BC (FIGURA 13). Este resultado está atrelado a grande quantidade de fósforo presente no biochar de CF (7,8g/kg), que é cerca de três vezes maior que a quantidade presente em CC (2,4 g/kg), e 6 vezes maior que BC (1,3 g/kg).

O aumento de fósforo (P) disponível no solo foi de 1,1 mg/dm³ para 10,58 mg/dm³ (CF 0,5%), 13,25 mg/dm³ (CF 1%), 37,86 mg/dm³ (CF 2%), 135,03 mg/dm³ (CF5%) e 270,54 mg/dm³ (CF 10%). Correspondentemente, para o tratamento CF+CC, 5,05 mg/dm³ (CF+CC 0,5%), 10,06 mg/dm³ (CF+CC 1%), 15,88 mg/dm³ (CF+CC 2%), 79,12 mg/dm³ (CF+CC 5%), 160,92 mg/dm³ (CF+CC 10%).

Os tratamentos que contêm CC e CC+BC por lado, influenciaram em menor proporção na quantidade de fósforo disponível. Considerando o nível satisfatório de 20 mg/dm³ de fósforo disponível para o bom desenvolvimento da vegetação em solos degradados, aplicações de CC, CC+BC não seriam suficientes, enquanto para CF, CF+BC a concentração de 2% (8 e 5,4 ton/ha, respectivamente) e para CF+CC a concentração de 5% (13,5 ton/ha) seriam suficientes.

Figura 13 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a quantidade de fósforo do solo-sedimento.

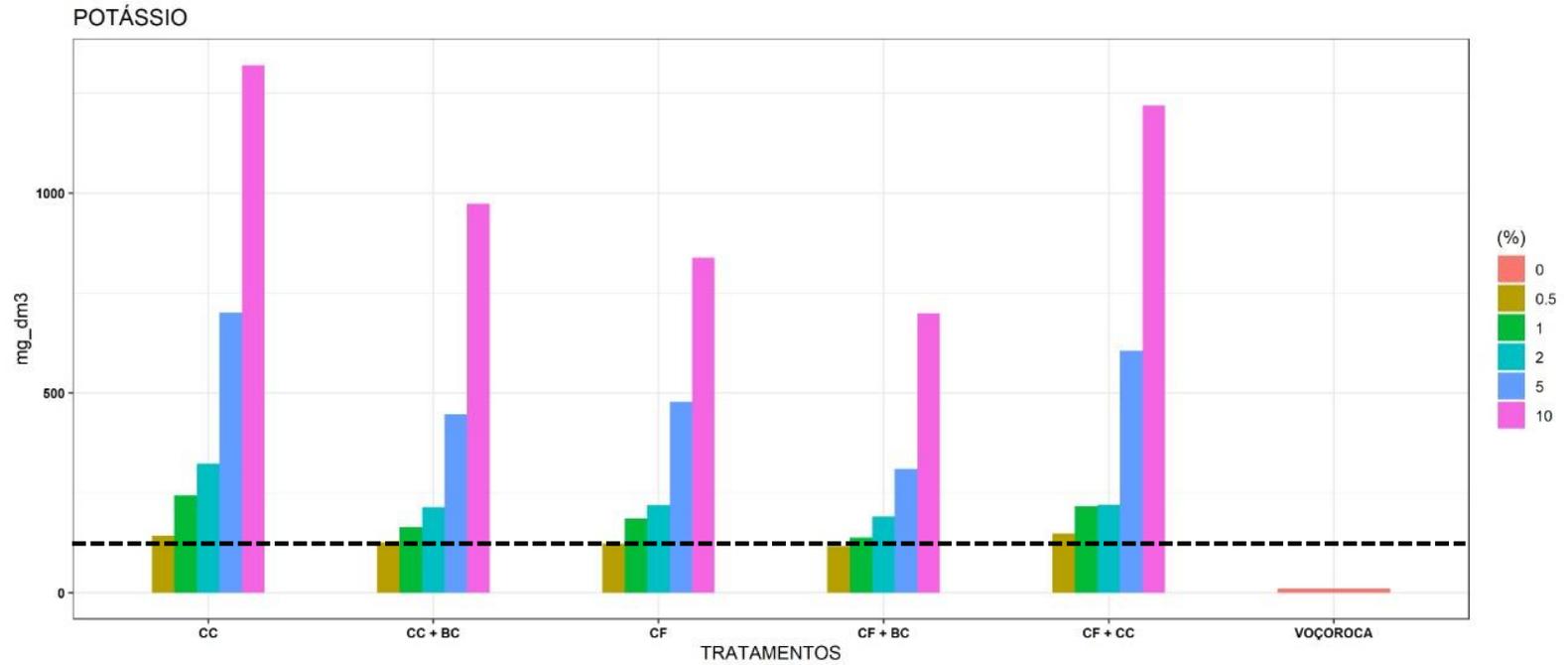


Fonte: Do autor (2021).

Segundo Domingues et al. (2017) biochar de casca de café e esterco de galinha são bons para promover aumento de P disponível no solo. No entanto, os autores enfatizam a importância da escolha da temperatura de pirólise na produção do biochar. Em temperaturas acima de 500°C, com relação ao P, pode ocorrer a formação de compostos de estabilidade diferentes e de baixa solubilidade à medida que a temperatura se eleva, influenciando negativamente na eficiência no uso do fósforo. Gaskin et al. (2008) também observaram menor disponibilidade de fósforo em biochar de casca de café e casca de amendoim quando a temperatura de pirólise passou de 400 para 500°C. Portanto, o alto teor de fósforo e a temperatura de pirólise, que deve ser entorno de 350 a 450°C, são fatores determinantes na quantidade de P disponível e na solubilidade do mesmo.

A quantidade de potássio (K) aumentou com adição de todos os tratamentos, de forma linear crescente com o aumento das concentrações (FIGURA 14). O efeito dos tratamentos que contêm CF, CF+CC foi claramente maior. Tal resultado está relacionado a grande quantidade de potássio presente na casca de café. A quantidade de potássio no biochar de CC (56,6 g/kg), é cerca de duas vezes a maior que a quantidade presente nos de CF (28 g/kg), e 2,8 vezes maior que no de BC (20 g/kg) (TABELA 3).

Figura 14 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a quantidade de potássio do solo-sedimento.



Fonte: Do autor (2021).

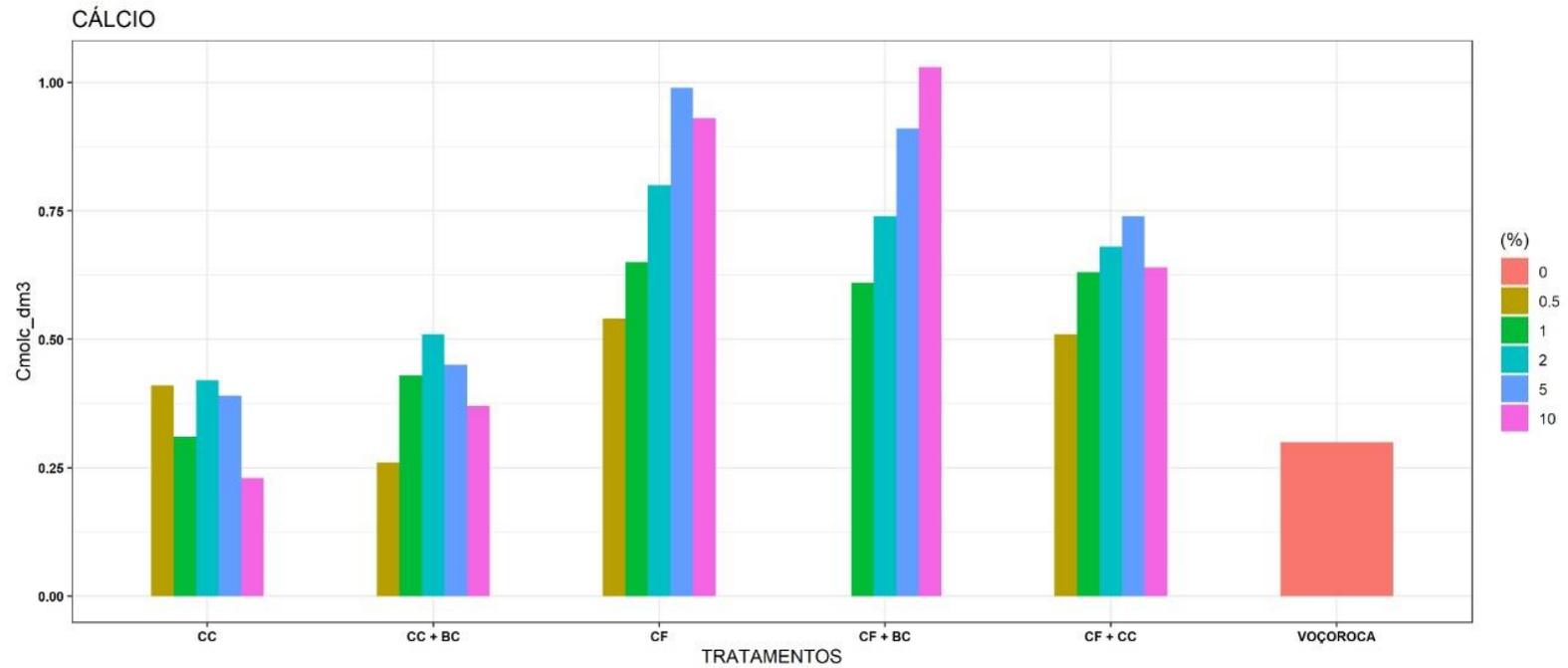
O aumento de potássio no solo foi de 10,8 mg/dm³ para 142,78 mg/dm³ (CC 0,5%), 243,47 mg/dm³ (CC 1%), 322,47 mg/dm³ (CC 2%), 701,56 mg/dm³ (CC5%) e 1319,94 mg/dm³ (CC 10%). Correspondentemente, para o tratamento CF+CC, 148,47 mg/dm³ (CF+CC 0,5%), 216,16 mg/dm³ (CF+CC 1%), 220,53 mg/dm³ (CF+CC 2%), 605,45 mg/dm³ (CF+CC 5%) e 1219,71 mg/dm³ (CF+CC 10%).

Os demais tratamentos CF, CC+BC, CF+BC influenciaram em menor proporção na quantidade de potássio, no entanto, considerando o nível satisfatório de 100 mg/dm³ de potássio para o bom desenvolvimento da vegetação em solos degradados, aplicações de 0,5% de concentração seriam suficientes para elevar o nível de potássio a este ponto satisfatório, ou seja, doses que variam de acordo com o biochar, de 1,4 a 2 ton/ha (TABELA 6).

O aumento de potássio está relacionado ao aumento da condutividade elétrica, uma vez que, a maior parte do potássio presente nos biochars está na forma iônica (ALFARO et al., 2004), promovendo aumento na força iônica da solução do solo, e portanto, na condutividade elétrica (REIS et al., 1999).

Dentro dos tratamentos, CF, CF+BC, CF+CC foi quem apresentou os melhores resultados no incremento de cálcio após a adição no solo-sedimento (FIGURA 15). Isto ocorreu porque o biochar de CF, dentre todos os outros, possui a maior quantidade cálcio, CF (27 g/kg), CC (10,3 g/kg) e BC (3,1 g/kg).

Figura 15 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a quantidade de cálcio do solo-sedimento.

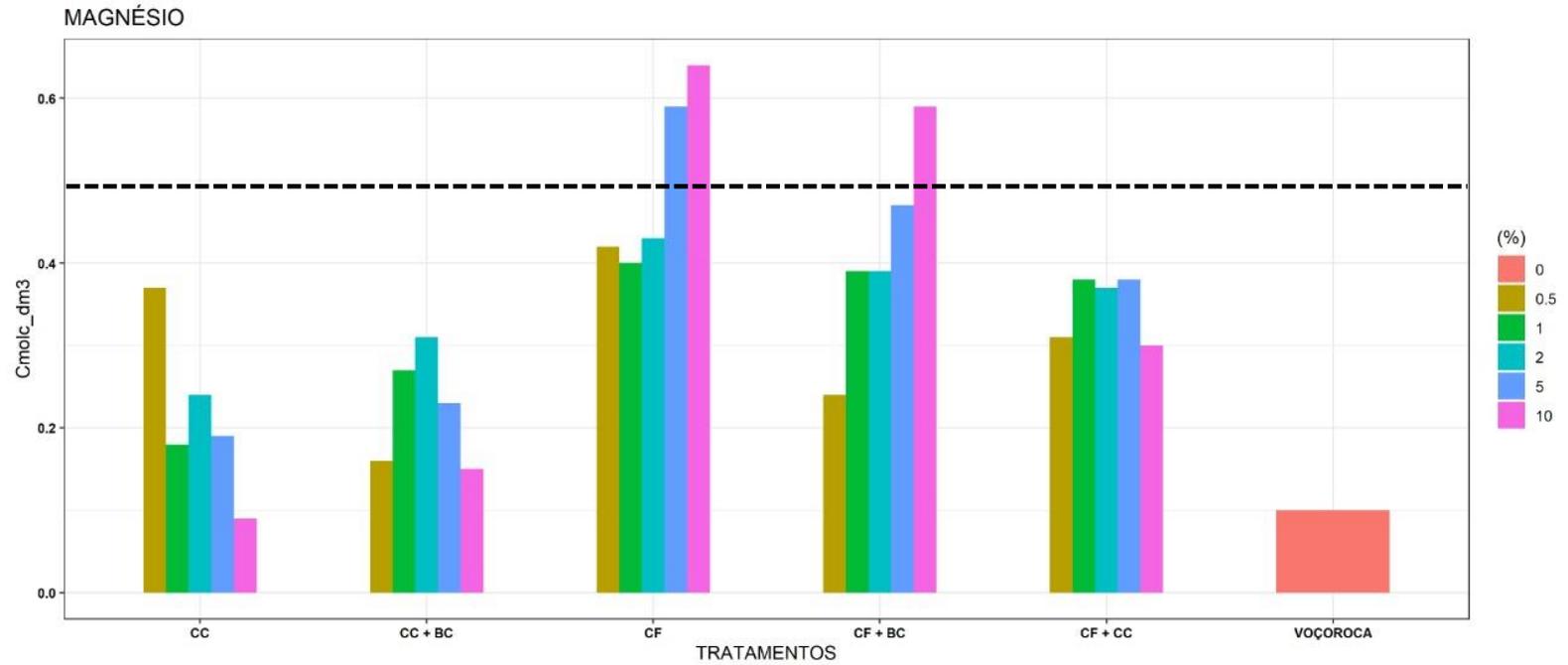


Fonte: Do autor (2021).

No entanto, apesar do aumento observado com relação ao solo-sedimento sem tratamento, principalmente para tratamento CF+BC a 10% que foi de 0,3 para 1,03 cmol/dm^3 , a utilização de biochar como fonte de cálcio não é uma opção viável, pois seria necessário concentrações muito elevadas, acima de 27 ton/ha, para se atingir o nível crítico (2,2 cmol/dm^3). Sendo assim, a aplicação do biochars para este determinado fim só é interessante se complementada com produtos convencionais.

Com relação ao magnésio, também houve aumento com a aplicação dos tratamentos, principalmente naqueles que contêm CF (FIGURA 16).

Figura 16 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a quantidade de magnésio do solo-sedimento.



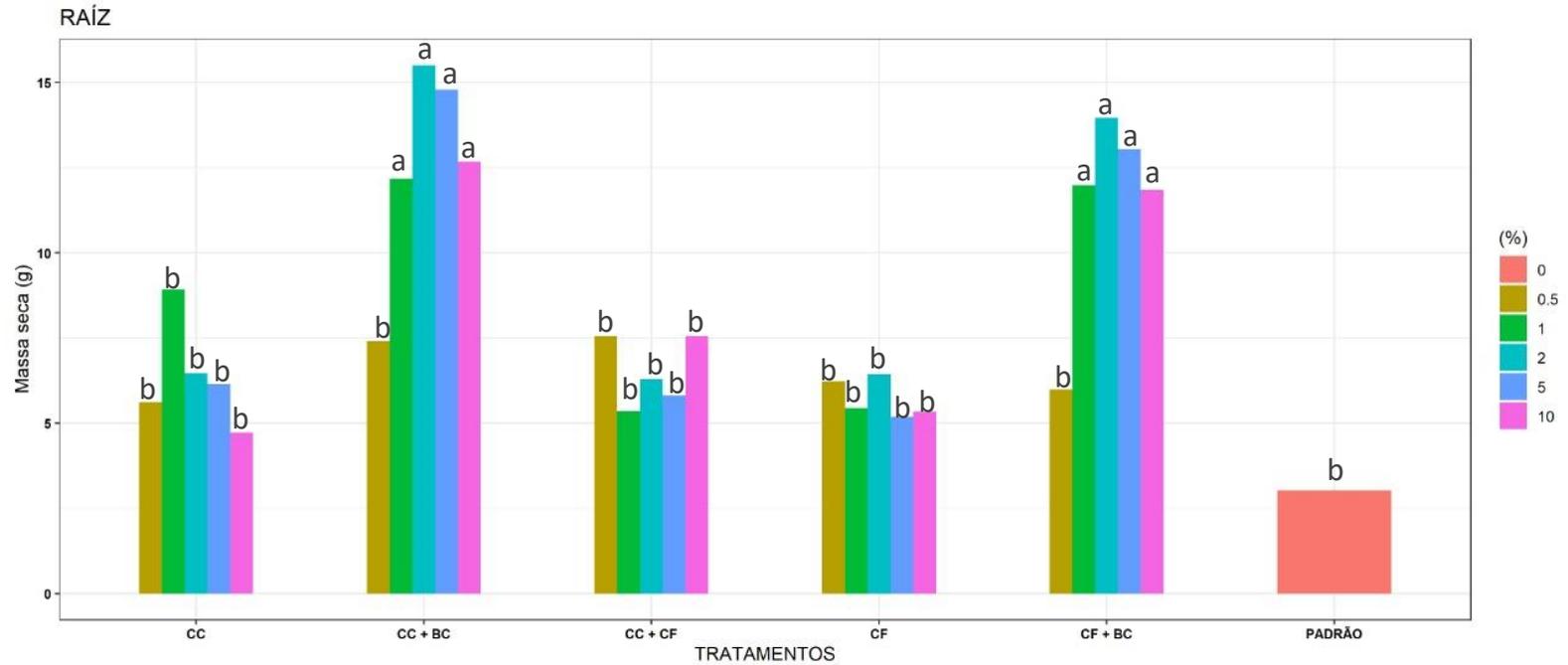
Fonte: Do autor (2021).

Considerando o nível satisfatório para o bom desenvolvimento da vegetação próximo a 0,5 cmol/dm³, apenas o tratamento CF na dose de 5 e 10%; e CF+BC na dose de 10% seriam suficientes para elevar o magnésio a patamares considerados satisfatórios. No entanto, é preciso ressaltar que estas aplicações requerem atenção, pois os tratamentos nas concentrações de 5 e 10% podem propiciar elevação considerada demasiada para o pH e potássio, além de representar doses muito elevadas por hectare. Portanto, assim como o cálcio, o magnésio não deve ser utilizado sozinho com o intuito de aumentar a disponibilidade no solo para atender a total demanda das culturas.

3.4 Efeito da aplicação dos biochars no desenvolvimento do capim vetiver

Analisando o efeito dos tratamentos sobre o crescimento da raiz do capim *Vetiveria zizanioides L.*, observou-se que os melhores resultados foram encontrados para os tratamentos CC+BC e CF+BC a 1, 2, 5 e 10%. Os demais tratamentos não diferiram entre si e não foram superiores ao tratamento controle (FIGURA 17).

Figura 17 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a massa seca de raiz do capim *Vetiveria zizanioides* L.

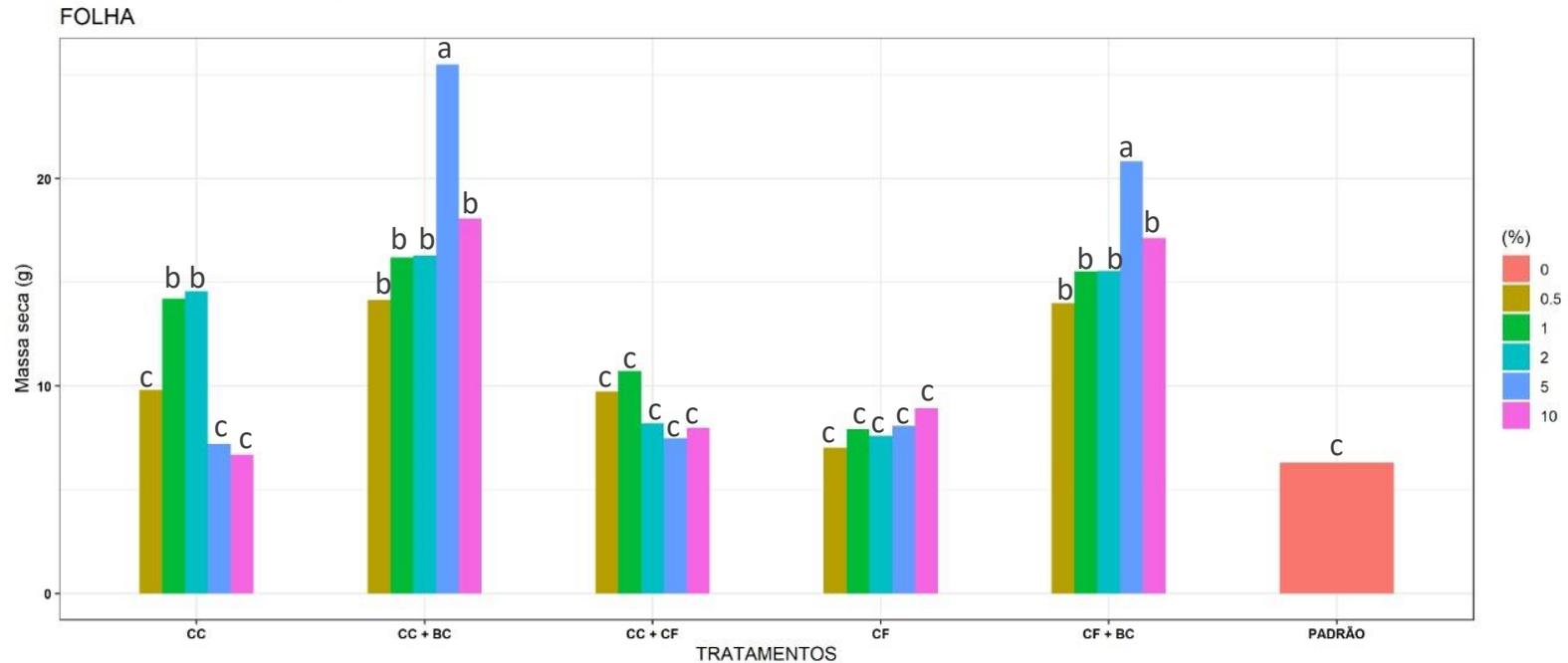


Tratamentos seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-knott ($\alpha=0,01$).

Fonte: Do autor (2021).

Com relação ao efeito dos tratamentos sobre a massa seca da parte aérea do capim *Vetiveria zizanioides* L., os tratamentos CC+BC 5% e CF+BC 5% foram superiores a CC 1%, CC 2%, CC+BC 0,5%, CC+BC1%, CC+BC2%, CC+BC10%, CF+BC 0,5%, CF+BC1%, CR+BC2%, CF+BC10%, que não diferiram entre si. Os demais tratamentos não apresentaram diferenças estatísticas com relação ao tratamento controle (FIGURA 18).

Figura 18 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a massa seca de parte aérea do capim *Vetiveria zizanioides* L.

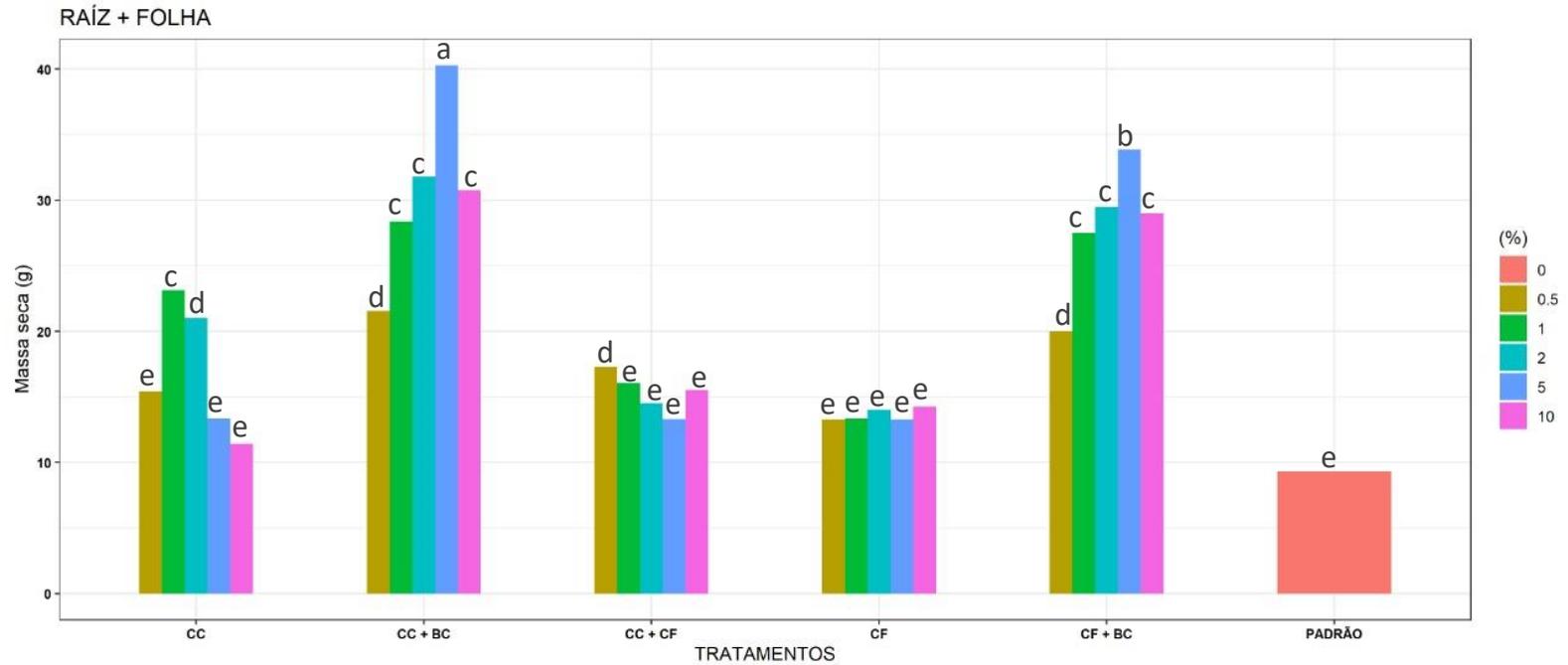


Tratamentos seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-knott($\alpha=0,01$).

Fonte: Do autor (2021).

A massa seca total refere-se ao somatório da massa seca de raiz e massa seca da parte aérea. O tratamento CC+BC 5% foi estaticamente superior aos demais, seguido de CF+BC 5%. Os tratamentos CC 0,5%, CC 5%, CC 10%, CC+CF 1%, CC+CF 2%, CC+CF 5%, CC+CF 10%, CF 0,5%, CF 1%, CF 2%, CF 5%, CF 10% não apresentaram diferenças estatísticas com relação ao tratamento controle (FIGURA 19).

Figura 19 - Efeito dos tratamentos de casca de café (CC), casca de café mais bagaço de cana-de-açúcar (CC+BC), cama de frango (CF), cama de frango mais bagaço de cana-de-açúcar (CF+BC), cama de frango mais casca de café (CC+CF) sobre a massa seca total do capim *Vetiveria zizanioides* L.



Tratamentos seguidos da mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-knott($\alpha=0,01$).

Fonte: Do autor (2021).

De forma geral, observou-se que, para o desenvolvimento do capim *Vetiveria zizanioides* L. em solos degradados por erosão, os melhores tratamentos foram as combinações de CC+BC e CF+BC. A concentração de 5% elevou, cerca de, quatro vezes a massa seca total do capim *Vetiveria zizanioides* L., demonstrando ser a mais adequada para a aplicação em solos com características semelhantes ao que foi estudado neste estudo. A aplicação de CC+BC e CF+BC a 5% corresponde 13,5 toneladas destes materiais por hectare. Os resultados concordam, em parte, com a análise química do solo-sedimento após os 30 dias de incubação, onde os biochars de casca de café e os biochars de cama de frango se destacaram em função das melhorias químicas promovidas no solo-sedimento.

O teste envolvendo o capim *Vetiveria zizanioides* L. demonstrou que os tratamentos contendo CC e CF são adequados para promover melhorias nas características do solo e, conseqüentemente, no crescimento da cobertura vegetal. No entanto, devem ser aplicados combinados com BC. Acredita-se que a interação da casca de café e da cama de frango com o bagaço de cana-de-açúcar deva ter promovido modificações não somente químicas, mas também físicas e biológicas nas propriedades do solo-sedimento, favorecendo o melhor desenvolvimento da planta indicadora. Além disso, o bagaço de cana-de-açúcar pode ter contribuído com a imobilização dos nutrientes no solo. Os resultados encontrados enfatizam a importância da realização de novos estudos envolvendo as modificações das propriedades físicas e biológicas do solo-sedimento, principalmente com relação ao biochar de bagaço de cana-de-açúcar. De acordo com Morais et al. (2014) e Oliveira et al. (2016) o ganho de peso nas raízes está relacionado a estrutura física, química e biológicas do solo, corroborando com os resultados obtidos no presente estudo.

4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DOS BIOCHARS NA RECUPERAÇÃO DE SOLOS DEGRADADOS

Vários estudos têm sido realizados com foco na melhoria do estado de fertilidade do solo após a aplicação de biochar (HANSEN et al., 2016; LIU et al., 2014; WAN et al., 2014), exibindo efeitos positivos na disponibilidade de nutrientes e potencial para aumentar a produtividade das culturas (PANDEY et al., 2016; ZHANG et al., 2016).

Além da estratégia de uso de fertilizantes, biochars também podem ser usados como materiais de calagem para corrigir a acidez do solo (WAN et al., 2014). Assim, a influência do biochar na disponibilidade de nutrientes pode ter diferentes efeitos no estado de fertilidade do solo, condicionando os níveis de nutrientes disponíveis, condutividade elétrica, estoques de carbono e mudanças na taxa de decomposição da matéria orgânica, e no grau de acidez do solo.

Os tratamentos contendo CC e CF mostraram ser mais promissores pelos seguintes motivos: eficácia na correção de acidez do solo, neutralização de Al^{3+} e altas concentrações de nutrientes, enquanto os contendo BC são ideais para promover melhorias nas propriedades físicas do solo, principalmente retenção de água.

O uso desses biochars deve ser ponderado e recomendado com base no pH e na quantidade de nutriente liberado, uma vez que, concentrações muito altas podem elevar demais o pH, gerando risco de alcalinidade, principalmente em solos degradados, com baixo nível de tamponamento.

De acordo com o que foi discutido nos resultados envolvendo os tratamentos no solo-sedimento, concentrações acima 5%, principalmente para tratamentos que contenha somente CF e CC, não devem ser usadas, devido ao risco de alcalinização do solo e a necessidade de elevadas doses por hectare (mais de 20 ton/ha).

Na agricultura convencional, o excesso de calcário reduz a disponibilidade de micronutrientes no solo, afetando a estrutura do solo, favorecendo a precipitação das formas solúveis de fósforo e aumentando a volatilização de NH_3 . Sendo assim, o aumento excessivo do pH pode trazer problemas ao desenvolvimento e crescimento vegetal (FAGERIA et al., 1995). Portanto, para corrigir o pH de solos com características semelhantes ao solo-sedimento coletado na voçoroca, podem ser utilizados os tratamentos CC(0,5%), CF (0,5%), CC+BC (1%), CC(2%),

CF (2%), CC+CF (2%), CF+BC (2%), CC+BC (2%), CF+BC (5%), CC+BC (5%). O mesmo raciocínio deve ser mantido ao se utilizar os biochars como fonte de potássio. As doses devem ser baseadas na quantidade de potássio liberada pelo biochar, de forma a não exceder muito o nível crítico e promover resultados inconvenientes. A aplicação excessiva de potássio pode acarretar problemas de lixiviação, principalmente em solos degradados que apresentam baixa CTC. Além disso, o excesso leva ao desequilíbrio da relação Ca:Mg:K, que pode resultar na redução da absorção de Ca e Mg pelas plantas (ANDREOTTI et al., 2000).

Em solos com características semelhantes ao solo-sedimento coletado na voçoroca, e considerando o nível crítico de 100 mg/dm³ de potássio, pode ser utilizado todos os tratamentos (CC, CF, CC+CF, CC+BC, CF+BC), na concentração de 0,5%, com doses variando de 1,4 a 2 ton/ha dependendo do biochar (TABELA 6).

A quantidade de fósforo liberada pelos tratamentos foi em menor proporção que a quantidade de potássio, no entanto, foi suficiente para elevar para níveis considerados satisfatórios (20 mg/dm³). Pode ser utilizado tanto os tratamentos CF e CF+BC a 2%, quanto CC, CC+BC, CC+CF a 5 e 10%.

Os resultados apresentados demonstraram que as concentrações para elevar a CTC, o cálcio, e o magnésio não são viáveis, uma vez que podem alcalizar o solo, aumentar demais o potássio disponível, além de aumentar os custos. Porém, nada impede que ao se aplicar os tratamentos, principalmente CF, CF+CC, CC+CC com o objetivo de aumentar pH, fósforo e potássio, sejam combinados produtos comerciais que promovam a complementação necessária de cálcio e magnésio.

Os resultados envolvendo o capim *Vetiveria zizanioides L.* demonstraram o efeito positivo da adição dos tratamentos CC+BC e CF+BC, principalmente a 2 e 5%. Além disso, enfatizaram a importância de estudos envolvendo as mudanças nas propriedades físicas e biológicas do solo, pois somente assim será possível ter a visão completa do mecanismo de ação do biochar nas propriedades de solos degradados.

5 CONCLUSÃO

Casca de café e cama de frango são os dois resíduos mais promissores para serem utilizados na recuperação de solos degradados, principalmente quando combinados com bagaço de cana-de-açúcar. O biochar de casca de café foi o que promoveu o maior aumento na disponibilidade de potássio, enquanto o de cama de frango propiciou a maior quantidade de fósforo disponível. Acredita-se que o bagaço de cana-de-açúcar seja importante para imobilizar nutrientes no solo, melhorar as propriedades físicas, bem como promover a retenção de água e carbono no solo.

A correção do pH no solo é fortemente dependente do próprio pH do biochar, bem como da quantidade de cinzas e nutrientes, e, neste sentido, tanto o biochar de cama de frango quanto da casca de café se mostraram adequados, elevando tanto o pH, quanto os teores de potássio e fósforos a níveis considerados adequados agronomicamente.

Os biochars não foram capazes de fornecer cálcio e magnésio de forma integral para o solo-sedimento após os 30 dias de incubação, sendo assim, devem ser utilizados de forma combinada a adubos convencionais para este determinado fim.

A utilização de CF+BC e CC+BC promoveu aumento significativo na massa seca de raiz, parte aérea e massa seca total da planta indicadora, principalmente a 2 e 5% (5,4 a 13,5 ton/ha). Portanto, os mais indicados para serem utilizados na recuperação de voçorocas com capim *Vetiveria zizanioides* L.

Mais testes envolvendo plantas indicadoras devem ser realizados com intuito de avaliar os reais efeitos dos biocarvões na interação solo x planta x biocarvão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização foi importante para demonstrar o ponto forte de aplicação de cada biochar, que deve ser direcionada com base nos aspectos que precisam ser melhorados no solo degradado.

O tipo de resíduo foi o fator que mais influenciou nas características agrônômicas dos biochars. A temperatura de pirólise por sua vez, favoreceu as características químicas e alterou o caráter aromático dos materiais.

Os biochars de CC e CF foram os que apresentaram o maior pH, CE, CTC, teor de cinzas e nutrientes. Conseqüentemente, foram os que mais modificaram as características químicas do solo-sedimento após a incubação, principalmente para os parâmetros pH, P e K disponível.

O biochars de BC e PM foram os que apresentaram maior teor de carbono fixo, maior estabilidade térmica e presença de grupos funcionais aromáticos, indicando ser adequados para imobilização de nutrientes no solo e sequestro de carbono.

Os testes envolvendo o capim vetiver demonstraram que os tratamentos que contêm biochar de CC+BC e os que possuem CF+BC a 2% e a 5% (5,4 a 13,5 ton/ha), foram os que promoveram o maior crescimento em raiz e parte aérea. Isto indica que as combinações de materiais ricos em nutrientes com materiais estáveis e ricos em grupos aromáticos são as mais adequadas para promover melhorias nas condições do solo e, conseqüentemente, promover o ambiente mais propício para o bom estabelecimento e crescimento da vegetação.

Estes resultados demonstram a necessidade de novos trabalhos que analisem as modificações físicas e biológicas, juntamente com as químicas, pois é preciso entender a real interação solo x planta com adição do biochar.

REFERENCIAS

- ADINATA, D.; WAN DAUD, W. M. A.; AROUA, M. K. Preparation and characterization of activated carbon from palm shell by chemical activation with K_2CO_3 . **Bioresource Technology**, v. 98, p. 145–9, 2007. Doi: 10.1016/j.biortech.2005.11.006.
- ALFARO, M. A.; JARVIS, S.C.; GREGORY, P.J. 2004. Factors affecting potassium leaching in different soils. **Soil Use and Management**, v. 20, p. 182–189. Doi:10.1079/SUM2004249
- ARAUJO, G. H. de S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. 12ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2017. 322p.
- BOHNEN, H. Acidez e Calagem. In: GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J. (Ed.). **Princípios de fertilidade de solo**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.51-76, 1995.
- CASE, S. D. et al. The effect of biochar addition on N_2O and CO_2 emissions from a sandy loam soil – the role of soil aeration. **Soil Biology and Biochemistry**, v.51, p.125-134, 2012.
- DÍAZ-TERÁN, J. et al. Study of chemical activation process of a lignocellulosic material with KOH by XPS and XRD. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 60, p. 173–181, 2003. Doi:10.1016/S1387-1811(03)00338-X.
- DOMINGUES, R. R. et al. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **Plos one**, p. 1-19, 2017.
- EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/sienergia>>
- FAO, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2019. FAOSTAT. Disponível em: <<http://fenix.fao.org/faostat/internal/en/#data/QC>> Acessado em 30 setembro de 2019.
- FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P.; BALIGAR, V.C. Lime and phosphorus interactions on growth and nutrient uptake by upland rice, wheat, common bean, and corn in an Oxisol. **Journal of Plant Nutrition**, v. 18, p. 2519–2532, 1995. doi:10.1080/01904169509365081
- GASKIN, J.W. et al. Effect of low temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. **American Society of Agricultural and Biological**, v. 51; p. 2061-2069, 2008.
- HANSEN, V. et al. The effect of straw and wood gasification biochar on carbon sequestration, selected soil fertility indicators and functional groups in soil: An incubation study. **Geoderma**, v. 269, p. 99–107, 2016. Doi:10.1016/j.geoderma.2016.01.033.

HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; CHAN, K. Y.; ZIOLKOWSKI, A.; NELSON, P. F. 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 223 – 228. Doi:10.1016/j.jenvman.2010.09.008

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA**. 2019. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/ipca15/brasil> . Acessado em 30/09/2019>

JEFFERY, S. et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture Ecosystems and Environment**. v. 1, n.144, p.175-187, 2011.

KAJITANI, S.; TAY, L. H. S.; ZHANG, Z. C. LI. Mechanisms and kinetic modelling of steam gasification of brown coal in the presence of volatile-char interactions. **Fuel**, v.103, p.7-13, 2013.

LEHMANN, J. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, Washington, v. 5, n. 7, p. 381-387, 2007.

LIANG, B. et al. Black Carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 17 – 19, 2006. Doi:10.2136/sssaj2005.0383

LIU, X. et al. Sustainable biochar effects for low carbon crop production: A 5-crop season field experiment on a low fertility soil from Central China. **Agricultural Systems**, v. 129, p. 22–29, 2014. Doi:10.1016/j.agsy.2014.05.008

MORAIS, E. G. et al. Uso de húmus sólido e diferentes concentrações de húmus líquido em características agronômicas da alface. **Cadernos de Agroecologia**, v.9, n. 4, p.1-5, 2014.

NOVAK, J. M. et al. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. **Annals Environ Sci**. v.3, p. 195–206, 2009.

OLIVEIRA, V. Z. et al. Efeito da matéria orgânica no crescimento de plantas de girassol (*Helianthus annuus* L.) cultivadas em Latossolo Amarelo. **Revista Biociências**, Taubaté, v. 22, n. 1, p. 1-9, 2016.

PANDEY, V.; PATEL, A.; PATRA, D.D. Biochar ameliorates crop productivity, soil fertility, essential oil yield and aroma profiling in basil (*Ocimum basilicum* L.). **Ecological Engineering**, v. 90, p. 361–366, 2016. Doi:10.1016/j.ecoleng.2016.01.020

REIS, J. R. et al. Total soil electrical conductivity and critical soil K⁺ to Ca²⁺ and Mg²⁺ ratio for potato crops. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 993 – 997, 1999. Doi:10.1590/S0103-90161999000400030.

RStudio Team. **RStudio**: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA. 2020. <<http://www.rstudio.com/>>

SONG, W.; GUO, M. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 94, n. 138–145, 2012. <doi:10.1016/j.jaap.2011.11.018>

VEIGA, T. R. A. L. **Síntese e caracterização de biochars de biomassa de casca de café e de madeira de eucalipto**. Lavras: Ed. UFLA, 2016. 115 p.

WAN, Q. et al Pyrolysis temperature influences ameliorating effects of biochars on acidic soil. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 21, p. 2486–95, 2014. Doi:10.1007/s11356-013-2183-y

WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A Review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1002-1022, 2019.

ZIMMERMAN, R. R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). **Environmental Science and Technology**, v. 44, p. 1295-1301, 2010.

ZHANG, D. et al. Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol. **Chemosphere**, v. 142, p. 106–113, 2016. Doi:10.1016/j.chemosphere.2015.04.088.