



THIAGO DE ASSIS PEREIRA

**ECONOMIA CIRCULAR NO MANEJO DE RESÍDUOS DA
CAFEICULTURA E EFEITOS SOBRE O SISTEMA SOLO-
PLANTA**

LAVRAS – MG

2023

THIAGO DE ASSIS PEREIRA

**ECONOMIA CIRCULAR NO MANEJO DE RESÍDUOS DA CAFEICULTURA
E EFEITOS SOBRE O SISTEMA SOLO-PLANTA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Leônidas Carrijo Azevedo Melo

Orientador

LAVRAS – MG

2023

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

Pereira, Thiago de Assis.

Economia circular no manejo de resíduos da cafeicultura e
efeitos sobre o sistema solo-planta/ Thiago de Assis Pereira. - 2023.
59 p.

Orientador: Leônidas Carrijo Azevedo Melo.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Biochar. 2. Indicadores biológicos. 3. Fertilidade do solo. I.
Melo, Leônidas Carrijo Azevedo. II. Título.

THIAGO DE ASSIS PEREIRA

**ECONOMIA CIRCULAR NO MANEJO DE RESÍDUOS DA CAFEICULTURA E
EFEITOS SOBRE O SISTEMA SOLO-PLANTA**

**CIRCULAR ECONOMY IN THE MANAGEMENT OF COFFEE GROWING WASTE
AND EFFECTS ON THE SOIL-PLANT SYSTEM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APPROVADA EM 14/07/2023.

Dr. Teontônio Soares de Carvalho

UFLA

Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho

EPAMIG

Dra. Joyce Dória

UFLA

Dr. Leônidas Carrijo Azevelo Melo

Orientador

LAVRAS – MG

2023

*A Deus e Maria Santíssima;
Aos meus pais Luciene C. Moreira e José L. Pereira e meu irmão Matheus A. Pereira,
pelo amor e suporte incondicional;
Aos meus avós Custódio J. Pereira (in memoriam) e Elza do L. Pereira, todos os tios do
campo e família.
DEDICO.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de pós graduação em ciência do solo (PPGCS).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

À empresa Melitta® e a Associação Hanns R. Neumann Stiftung (HRNS) do Brasil pelo financiamento, apoio pessoal, material e financeiro.

Ao Prof. Dr. Leônidas Carrijo Azevedo Melo, por toda orientação, paciência, correção e parceria. O senhor é um modelo de orientador.

Aos Profs. Dr.^a Fatima M. de S. Moreira, Dr. Carlos A. Silva e Dr.^a Dalysse T. Castanheira pelo suporte, atenção e disponibilidade de materiais e tempo.

À Fazenda da Lagoa, grupo NKG, em especial ao gerente Patrik Lage; e ao Sítio Santo Antônio e toda família Peixoto. Obrigado por possibilitarem a pesquisa.

A todo corpo técnico, em especial à Livia Botelho, Mariene Duarte, Aline Mesquita, Geila Carvalho, Cristina Ribeiro e José Roberto (Pézão) por todo suporte.

À Sílvia Torres, Dr.^a Sílvia Longatti e Julián Sandoval pelo apoio em tantos momentos.

Aos colegas Bruno Cocco, Aline Leite, Ana María Villareal, Andrés Olaya, Daniela Dourado, Isabela Resende e Thiago Viana. Vocês foram fundamentais.

Aos amigos e colegas de mestrado Kerully Ferreira, Karen Polanía, Ana Lucía Villalobos, Ana Paula, José Justo, Ane Melo pelos momentos e auxílio.

Gratidão!

*“De modo que nem o que planta, nem o que rega são,
propriamente, importantes.
Importante é aquele que faz crescer: Deus.”
1 Coríntios 3, 7.*

RESUMO GERAL

O Brasil é destaque na produção de café. Essa cadeia gera uma alta quantidade de resíduos que podem causar problemas ambientais. A economia circular é uma alternativa que possibilita o manejo adequado desses resíduos pela reutilização e reciclagem de subprodutos que seriam descartados. A utilização desses resíduos como condicionadores de solo na cafeicultura pode melhorar importantes componentes da fertilidade e favorecer a atividade biológica, que são fundamentais para alcançar uma produção sustentável. O objetivo do estudo foi comparar diversas formas de valorização de resíduos quanto ao efeito condicionador de solo na cultura do cafeeiro, em duas propriedades produtoras de café (NKG: agricultura empresarial de larga escala e PX: agricultura familiar) no município de Santo Antônio do Amparo-MG. Os tratamentos avaliados foram: 1) casca de café crua, 2) composto orgânico, 3) Bokashi, 4) biochar, 5) COMBI (composto + biochar), 6) organomineral comercial e 7) adubação convencional (controle). Todos os tratamentos receberam a mesma dose de fertilizante mineral, exceto o tratamento 6. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. Foram realizadas análises dos condicionadores, fertilidade do solo, bioindicadores do solo e produtividade. Em NKG, sob adubação convencional foi observado o menor valor de pH (4,8). COMBI aumentou significativamente ($p < 0,05$) os valores de SB, t, T e V em relação ao controle. Por outro lado, na propriedade PX, o composto orgânico e o tratamento controle apresentaram os menores valores de pH. Já o composto e o biochar foram os que mais incrementaram a CTC a pH 7,0 (T) com aumento de 17 e 12 % em relação ao controle. A maioria dos indicadores teve maior atividade na área PX devido ao maior teor de matéria orgânica do solo, que ocorreu mais em função do histórico de manejo do que do uso dos condicionadores de solo. Os tratamentos não influenciaram na produtividade em NKG e, em PX, o biochar teve a maior produtividade. Os condicionadores de solo composto, biochar e COMBI apresentaram o melhor efeito condicionador e a matéria orgânica é um forte componente para indicadores biológicos do solo e produtividade. O estudo deve ser avaliado por mais tempo para resultados mais consolidados.

Palavras chave: Manejo do solo. Cultivo orgânico. Saúde do solo.

ABSTRACT

Brazil stands out in the production of coffee. This chain generates a high amount of waste that can cause environmental problems. The circular economy is an alternative that allows for the appropriate management of this waste by reusing and recycling by-products that would otherwise be discarded. The use of these residues as soil conditioners in coffee farming can improve important fertility components and promote biological activity, which are fundamental to achieving sustainable production. The objective of the study was to compare different forms of waste valuation regarding the soil conditioning effect on coffee cultivation, on two coffee producing properties (NKG: large-scale corporate agriculture and PX: family agriculture) in the town of Santo Antônio do Amparo-MG. The treatments evaluated were: 1) coffee husk, 2) organic compost, 3) Bokashi, 4) biochar, 5) COMBI (compost + biochar), 6) commercial organomineral and 7) conventional fertilizer (control). All treatments received the same dose of mineral fertilizer, except treatment 6. The experiment was conducted in a randomized block design, with four replications. Analyzes of conditioners, soil fertility, soil bioindicators and productivity were carried out. In NKG, under conventional fertilization, the lowest pH value was observed (4.8). COMBI significantly increased ($p < 0.05$) the values of TB, t, T and V in relation to the control. On the other hand, on the PX property, the organic compound and the control treatment presented the lowest pH values. Organic compost and biochar were the ones that most increased the CTC at pH 7.0 (T) with an increase of 17 and 12% in relation to the control. Most indicators had greater activity in the PX area due to the higher organic matter content in the soil, which was more a function of the management history than the use of soil conditioners. The treatments did not influence productivity in NKG and, in PX, biochar had the highest productivity. Compost, biochar and COMBI soil conditioners showed the best conditioning effect and organic matter is a strong component for soil biological indicators and productivity. The study should be evaluated for a longer period of time for more consolidated results.

Keywords: Soil management. Organic cultivation. Soil health.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	10
REFERÊNCIAS	15
RESUMO.....	21
ABSTRACT	22
1. INTRODUÇÃO	23
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
2.1 Preparo dos condicionadores	24
2.1.1 Preparo do biochar.....	24
2.1.2 Preparo do composto	25
2.1.3 Preparo do bokashi	26
2.2 Caracterização e análise dos condicionadores	27
2.4 Caracterização química e granulométrica do solo.....	31
2.5 Indicadores biológicos do solo	31
2.5.1 Carbono da biomassa microbiana (CBM)	32
2.5.2 Respiração basal microbiana (RBM)	32
2.5.3 Quociente metabólico (qCO_2).....	32
2.5.4 Quantificação de β -glicosidase e fosfatase ácida	33
2.5.5 Quantificação da urease.....	33
2.6 Colheita e produtividade	33
2.7 Análise estatística	34
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.1. Atributos químicos das áreas antes da implantação do experimento	35
3.2 Indicadores biológicos do solo	35
3.3 Efeitos dos condicionadores sobre o solo	41
3.4 Efeito dos tratamentos sobre a produtividade do cafeeiro	46
3.5 Análise de componentes principais (PCA).....	48
4. CONCLUSÃO	51
5. AGRADECIMENTOS.....	52
6. REFERÊNCIAS	53
7. MATERIAL SUPLEMENTAR	59

INTRODUÇÃO GERAL

A cafeicultura é uma importante cadeia produtiva, sendo responsável pela produção de uma das bebidas mais consumidas no mundo: o café (PANCSIRA et al., 2022). Essa cadeia de produção gera uma quantidade significativa de resíduos, tais como casca, borras e água residuária, que podem causar impactos ambientais negativos se não forem gerenciados adequadamente (PADMAPRIYA et al., 2013). A produção de café no mundo gera cerca de 10 milhões de toneladas de resíduos por ano (MARTINEZ et al., 2019), podendo a casca de café representar até 70% desse volume, sendo o Brasil responsável por um terço da produção mundial. Uma alternativa para o melhor aproveitamento desses resíduos seria a adoção de uma economia circular na cadeia do café por meio da valorização dos resíduos para reuso no sistema produtivo.

A economia circular é uma abordagem promissora para o manejo de resíduos em diversos setores, incluindo a cadeia cafeeira. Esse conceito econômico tem como objetivo a redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia, visando a minimização do desperdício e a maximização do valor dos recursos (GÓMEZ-SALCEDO et al., 2016). Uma das possibilidades de aplicação desse desenvolvimento econômico sustentável é a valorização dos resíduos gerados na produção de café, transformando-os em produtos com valor agregado (SERNA-JIMÉNEZ et al., 2022).

Os subprodutos gerados pelo manejo da lavoura de café e o processamento do grão são muitas vezes tratados como resíduos. Como contribuição para o solo, os restos podem ser triturados e distribuídos na lavoura e a casca de café ser aplicada sem processamento; ambos podem ser direcionados para produção de biocarvão ou compostados. Todas essas abordagens visam tratar os resíduos para a melhoria da saúde do sistema solo-planta e da cadeia de produção, impactando diretamente e positivamente na qualidade do solo. A qualidade do solo é a capacidade de manter suas funções para a agricultura e dentro do contexto ambiental, incluindo seus efeitos no solo, na qualidade da água, na saúde das plantas e dos animais inseridos no ecossistema (LEHMANN, J. et al., 2020.)

A casca de café, principal resíduo gerado na cafeicultura, possui uma alta concentração de carbono e potássio (K), podendo ser utilizada na produção de composto orgânico ou como cobertura morta no solo (DZUNG et al., 2013). A compostagem é uma técnica utilizada para transformar resíduos orgânicos em adubo orgânico, que pode ser rico em nitrogênio, fósforo e potássio (NPK). Além de ser uma forma eficiente de reciclagem de resíduos orgânicos, apresenta diversos benefícios para o solo. Dentre eles, destaca-se o

aumento da matéria orgânica, melhoria da estruturação do solo, diminuição da compactação do solo, aumento da capacidade de retenção de água, a supressão de doenças e pragas e a redução da necessidade de agroquímicos. Amplamente estudada e revisada, a compostagem pode melhorar significativamente a qualidade do solo e aumentar a produtividade agrícola (COGGER, 2005; MARTÍNEZ-BLANCO et al., 2013; CHEN et al., 2020; HO et al., 2022).

A produção de bokashi também pode ser uma alternativa de reutilização de resíduos da produção de café. Para a sua produção, utiliza-se uma técnica de compostagem semianaeróbia, a partir de uma mistura de microrganismos, como bactérias e leveduras, para fermentar resíduos orgânicos e produzir um adubo orgânico rico em nutrientes (FAO, 2011; TANAN & ARRANG; 2022). O bokashi diferencia-se da compostagem pela inserção de microrganismos e cobertura do material durante o processo com uma lona plástica. Estudos sugerem que a aplicação de bokashi no solo pode potencializar a disponibilidade de nutrientes para as plantas, melhorar a qualidade do solo, teor de nutrientes nos alimentos e tornar a cultura mais produtiva (XU, 2001; MURILLO-AMADOR et al., 2015; ZAMAN et al., 2016). Além disso, a bokashi tem seu tempo de produção reduzido em comparação ao composto orgânico, sendo uma boa alternativa para gestão de resíduos orgânicos (QUIROZ et al., 2019).

Já os restos de podas ou lenha do arranquio para renovação da lavoura cafeeira, por apresentarem um elevado teor de lignina e celulose, podem ser utilizados na produção de biochar, um tipo de carvão vegetal que pode melhorar as propriedades físicas e químicas do solo (DOMINGUES et al., 2017). O biochar é um produto resultante da pirólise na ausência ou em baixa concentração de oxigênio de diversas biomassas (LEHMANN et al., 2015), que pode ser utilizado como um condicionador de solo. É caracterizado por tipicamente apresentar elevada porosidade, área de superfície e capacidade de retenção de água e nutrientes (RAZZAGHI et al., 2020; JINDO et al., 2020), o que o torna uma opção promissora para a melhoria da produtividade agrícola (MELO et al., 2022). Além disso, o biochar pode melhorar a qualidade do solo por meio da promoção do crescimento de microrganismos benéficos (microhabitats), correção do pH e aumento da capacidade de troca catiônica, sequestro de C e estruturação do solo (JOSEPH et al., 2010; LEHMANN et al., 2011; KAPOOR et al., 2020; BEUSCH, 2021). No manejo de resíduos orgânicos na propriedade rural, o biochar pode ser uma opção visando otimizar a destinação de resíduos (devido a redução do volume da matéria original), além de gerar uma agricultura de baixo impacto. Nesse contexto, a reutilização dos resíduos da cafeicultura no próprio sistema produtivo pode trazer diversos benefícios para o solo, como a melhoria da fertilidade, a redução da erosão, mitigação de gases de efeito estufa e o aumento da produtividade agrícola (SERNA-JIMÉNEZ et al., 2022).

Outra estratégia para melhorar a fertilidade do solo e a produtividade agrícola é o COMBI, que é a combinação de composto e biochar. O COMBI pode ser obtido a partir da mistura do composto pronto com o biochar em diversas proporções ou pela mistura de biochar antes do processo de compostagem (ROMBEL et al., 2022). O uso do COMBI pode promover a sinergia entre os benefícios do composto e do biochar, como a melhoria da estrutura do solo, a retenção de água e nutrientes, o aumento da atividade microbiana e a redução da compactação do solo. Estudos indicam que a aplicação de COMBI no solo pode aumentar a produtividade agrícola, a retenção de nutrientes e a estabilidade da matéria orgânica do solo (AGEGNEH et al., 2017; PALANSOORIYA et al., 2019; ANTONANGELO et al., 2021; QIAN et al., 2023). A combinação de composto e biochar pode ser uma alternativa interessante e sustentável para a gestão do solo.

Em relação ao uso de fertilizantes, os organominerais são uma alternativa aos convencionais, compostos por uma combinação de fertilizantes inorgânicos com alto teor de nutrientes e uma matriz orgânica compostada (ANTILLE et al., 2013; KOMINKO et al., 2019). Esses fertilizantes podem melhorar a qualidade do solo aumentando a matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Estudos indicam que o uso de fertilizantes organominerais melhora a saúde do solo, e aspectos como pH, carbono orgânico, N total e capacidade de troca catiônica (TIAN et al. 2018 ; SIA et al. 2019 ; SILVA et al. 2019). O uso de organominerais é altamente promissor, pois atua para melhorar a produção de alimentos e o gerenciamento de resíduos, alinhando-se com a “economia circular” (BOUHIA et al., 2022).

O solo é a base da produção de alimentos, fornecendo os nutrientes necessários para o crescimento das plantas. Dessa forma, é fundamental entender a importância desse componente para produção na cafeicultura e adotar práticas de manejo que promovam sua conservação. O aumento do teor de matéria orgânica, adição de nutrientes de forma equilibrada e o uso de técnicas que favoreçam a atividade biológica do solo podem ser estratégias eficientes para alcançar uma produção sustentável e de qualidade (LAL, 2015). A análise de indicadores biológicos do solo é uma ferramenta importante para avaliar a sua qualidade, pois permite a avaliação da atividade microbiana da área, dentre outras formas, da atividade enzimática, que é sensível às mudanças ambientais em curto prazo (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006). Esses indicadores são importantes porque estão diretamente relacionados à produtividade do cafeeiro (ARAGÃO et al., 2020).

O ciclo do carbono é uma das mais relevantes funções do solo na biosfera. Vários compostos no solo contêm carbono orgânico, que são agrupados na matéria orgânica do solo (MOS) (NIKITIN, et al., 2022). A transformação de resíduos vegetais em matéria orgânica e

os processos de mineralização, estabilização e desestabilização são determinantes na dinâmica do carbono do solo (SMITH et al., 2018). Os principais indicadores microbiológicos relacionados ao ciclo do carbono são o carbono da biomassa microbiana, a respiração do solo, as taxas de decomposição e mineralização da MOS e as atividades enzimáticas (NIKITIN et al., 2022). O carbono da biomassa microbiana compõe 3–5% da MOS e é a fração mais ativa e dinâmica desse reservatório (TATE, 2017). Esse indicador pode ser usado para avaliar a produtividade dos ecossistemas e alterações precoces na MOS (SILVA et al., 2010; ARAGÃO et al., 2020).

A respiração do solo é o parâmetro usado para medir a emissão de CO₂ do solo durante a mineralização da MOS e a respiração da biota (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006). Entre 10% a 90% da emissão de CO₂ do solo é proveniente de atividade microbiana (PELL et al., 2006). Assim, a intensidade do CO₂ emitido durante a decomposição da MOS nos locais livres de raízes e resíduos vegetais é chamada de respiração basal (SHU & SHANG, 2016). A diminuição da biomassa microbiana causa redução do estoque de carbono do solo e retarda o ciclo do carbono nos ecossistemas em geral. Acredita-se que as características da biomassa microbiana sejam as mais sensíveis para avaliar mudanças quantitativas e qualitativas na MOS (SIX et al., 2002).

O quociente metabólico é um dos indicadores da contribuição microbiana junto ao ciclo do carbono. Seu valor é obtido pela razão entre a atividade respiratória e o carbono da biomassa. Esse indicador mostra a eficiência da conversão de carbono orgânico em biomassa microbiana (NIKITIN et al., 2022). Quanto maior o seu valor, menos favoráveis são as condições no ecossistema. Um baixo quociente sugere uma diminuição na intensidade do ciclo biogeoquímico do carbono no solo (BABUR, 2019).

As enzimas do solo catalizam a decomposição e transformação da MOS, liberando nutrientes disponíveis (BURNS et al., 2016). Esse indicador muda consideravelmente mais rápido do que a maioria dos parâmetros físicos e químicos do solo, o que torna possível detectar a transformação da MOS em estágios iniciais (KOTROCZÓ et al., 2014). A atividade enzimática do solo pode ser um indicador valioso para o potencial de ciclagem de nutrientes, nitrificação, oxidação e outros processos que definem a qualidade do solo (ALMEIDA et al., 2015). As enzimas β -glicosidase, fosfatase e urease são conhecidas pelo importante papel na ciclagem de C, P e N, respectivamente, os quais são nutrientes fundamentais para as plantas e para o metabolismo microbiano (ADETUNJI et al., 2017).

A β -glicosidase está intimamente relacionada com a matéria orgânica do solo, atividade biológica, ciclagem de C e atua na última fase do processo de degradação da

celulose, hidrolisando o resíduo da celobiose (GIL-SOTRES et al., 2005; ADETUNJI et al., 2017). Essa enzima pode fornecer um sinal avançado de alterações no carbono orgânico muito antes que isso possa ser detectado por outras técnicas de rotina.

As fosfatases são um grupo de enzimas que catalisam a hidrólise das ligações éster-fosfato, causando a liberação de fosfato (P) (NANNIPIERI et al., 2011) e são produzidas pelas raízes das plantas, fungos ou bactérias. A maior parte do fósforo no solo se encontra imobilizado como formas insolúveis ou fortemente adsorvido aos argilominerais nos solos tropicais. Assim, a mineralização dessa porção influencia diretamente na nutrição das plantas. Na maioria das vezes, o aumento da atividade da fosfatase com a adição de matéria orgânica pode ser atribuído ao estímulo do crescimento microbiano e ao enriquecimento da MOS (ADETUNJI et al., 2017).

A urease atua na hidrólise da uréia, gerando CO_2 e NH_3 , o que eleva o pH do solo e gera a perda de nitrogênio para a atmosfera por meio da volatilização do NH_3 (DAS e VARMA, 2011). Essa enzima está presente no bioma solo e se origina de diversas fontes como bactérias, leveduras, fungos, algas, resíduos animais e vegetais (FOLLMER, 2008). A atividade da urease no solo tem sido objeto de estudo ao longo dos anos, gerando bons índices de qualidade do solo, devido ao papel da urease na regulação do fornecimento de N às plantas (PIOTROWSKA-DLUGOSZ & CHARZYNSKI, 2015). A atividade da urease pode ser usada como um indicador para avaliar as mudanças na qualidade do solo resultantes do manejo, pois é afetada por práticas como a adubação orgânica (aumento da atividade) e preparo do solo (redução da atividade) (NIKITIN, et al., 2022).

Apesar dos efeitos benéficos de melhoradores orgânicos de solo, ainda há poucos estudos em campo que avaliaram sistematicamente o efeito condicionador desses materiais na cultura do cafeeiro. Dessa forma, é de grande interesse para a produção cafeeira a análise comparativa entre processos de transformação dos resíduos na melhoria da saúde do solo e produtividade.

A hipótese desse trabalho é que a associação de biochar e composto orgânico (COMBI) promoverá um maior efeito condicionador ao sistema solo-planta na cultura do cafeeiro em comparação a outros melhoradores de solo usados isoladamente, tais como biochar e composto. Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi comparar diversas transformações de resíduos quanto ao efeito condicionador de solo na cultura do cafeeiro. Na segunda parte desse trabalho é apresentado com detalhes os resultados da aplicação em campo sobre a cultura do café de resíduos da cadeia cafeeira, quanto ao efeito condicionador e

fertilizante em propriedades produtoras do grão na região do campo das vertentes de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

- ADETUNJI, A. T. et al. The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 17, n. 3, p. 794-807, 2017.
- AGEGNEHU, G. et al. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. **Applied soil ecology**, v. 119, p. 156-170, 2017.
- ANTILLE, D. L. et al. Development of organomineral fertilisers derived from nutrient-enriched biosolids granules: product specification. In: 2013 Kansas City, Missouri, July 21-July 24, 2013. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2013. p. 1.
- ANTONANGELO, J. A. et al. The roles of co-composted biochar (COMBI) in improving soil quality, crop productivity, and toxic metal amelioration. **Journal of Environmental Management**, v. 277, p. 111443, 2021.
- ARAGÃO, O. O. S. et al. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, v. 113, p. 106205, 2020.
- BABUR, E. Effects of parent material on soil microbial biomass carbon and basal respiration within young afforested areas. **Scandinavian journal of forest research**, v. 34, n. 2, p. 94-101, 2019.
- BEUSCH, C. Biochar as a soil ameliorant: how biochar properties benefit soil fertility—a review. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 9, n. 10, p. 28-46, 2021.
- BOUHIA, Y. et al. Conversion of waste into organo-mineral fertilizers: current technological trends and prospects. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 21, n. 2, p. 425-446, 2022.
- BURNS, R. G. et al. Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 216-234, 2013.
- CHEN, T.; ZHANG, S.; YUAN, Z. Adoption of solid organic waste composting products: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, p. 122712, 2020.
- COGGER, C. G. Potential compost benefits for restoration of soils disturbed by urban development. **Compost science & utilization**, v. 13, n. 4, p. 243-251, 2005.
- Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). Acompanhamento da Safra Brasileira de Café - Terceira Safra 2021a. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 12 de março de 2023.
- CONDON, L. M.; et al. Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. **Phosphorus: agriculture and the environment**, v. 46, p. 87-121, 2005.

DAS, S. K.; VARMA, A. Role of enzymes in maintaining soil health. **Soil enzymology**, p. 25-42, 2011.

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**, v. 12, n. 5, p. e0176884, 2017.

DORAN, J. W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, Rio de Janeiro, 1997. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.

DOURADO, C. Estado de Minas, 2/9/2021. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2021/09/02/internas_economia,1301708/cafe-acompanha-alta-dos-insumos-para-salvar-proxima-safra.shtml

DZUNG, N. A.; DZUNG, T. T.; KHANH, V. T. P. Evaluation of coffee husk compost for improving soil fertility and sustainable coffee production in rural central highland of Vietnam. **Resources and Environment**, v. 3, n. 4, p. 77-82, 2013.

FAO, 2011. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Elaboración y uso del Bocashi, San Salvador, 16p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/at788s/at788s.pdf>.

FOLLMER, Cristian. Insights into the role and structure of plant ureases. **Phytochemistry**, v. 69, n. 1, p. 18-28, 2008.

GIL-SOTRES, F. et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. **Soil biology and biochemistry**, v. 37, n. 5, p. 877-887, 2005.

GÓMEZ-SALCEDO, Y. et al. Contribution of the Environmental Biotechnology to the Sustainability of the Coffee Processing Industry in Developing Countries. **Advances in the Domain of Environmental Biotechnology: Microbiological Developments in Industries, Wastewater Treatment and Agriculture**, p. 565-589, 2021.

HO, T. T. K. et al. Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 6, p. 100211, 2022.

JINDO, K. et al. Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 1: A review of the biochar roles in soil N, P and K cycles. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 7, p. 1-12, 2020.

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

KAPOOR, A. et al. Biochar as a means to improve soil fertility and crop productivity: A review. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 15, p. 2380-2388, 2022.

KIGGUNDU, N.; SITTAMUKYOTO, J. Pyrolysis of coffee husks for biochar production. 2019.

KOMINKO, H. et al. Potentiality of sewage sludge-based organo-mineral fertilizer production in Poland considering nutrient value, heavy metal content and phytotoxicity for rapeseed crops. **Journal of environmental management**, v. 248, p. 109283, 2019.

KOMINKO, H. et al. Potentiality of sewage sludge-based organo-mineral fertilizer production in Poland considering nutrient value, heavy metal content and phytotoxicity for rapeseed crops. **Journal of environmental management**, v. 248, p. 109283, 2019.

KOTROCZÓ, Z. et al. Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 70, p. 237-243, 2014.

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 5, P. 5875-5895, 2015.

LEHMANN, J. et al. Biochar effects on soil biota—a review. **Soil biology and biochemistry**, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011.

LEHMANN, J. et al. The concept and future prospects of soil health. **Nature Reviews Earth & Environment**, 1(10), pp.544-553, 2020.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: an introduction. In: **Biochar for environmental management**. Routledge, 2015. p. 1-13.

MARTINEZ, C. L. M. et al. Characterization of residual biomasses from the coffee production chain and assessment the potential for energy purposes. **Biomass Bioenergy** 2019, 120, 68–76.

MARTÍNEZ-BLANCO, J. et al. Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 33, p. 721-732, 2013.

MELO, L. C. A. et al. Biochar-based fertilizer effects on crop productivity: a meta-analysis. **Plant and Soil**, v. 472, n. 1-2, p. 45-58, 2022.

MOREIRA, F.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica**. Editora Ufla, 2006.

MURILLO-AMADOR, B. et al. Changing environmental conditions and applying organic fertilizers in *Origanum vulgare* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 549, 2015.

NANNIPIERI, P. et al. 2011. Role of phosphatase enzymes in soil. **Phosphorus in action: biological processes in soil phosphorus cycling**, pp.215-243, 2011.

NIKITIN, D. A. et al. Microbiological indicators of soil ecological functions: a review. **Eurasian Soil Science**, v. 55, n. 2, p. 221-234, 2022.

Organização Internacional do Café (ICO). Coffee Market Report - July 2021. Disponível em: <https://www.ico.org/documents/cy2020-21/cmr-0721-e.pdf>. Acesso em: 12 de março de 2023.

PADMAPRIYA, R. et al. Coffee waste management-An overview. **Int. J. Curr. Sci**, v. 9, p. 83-91, 2013.

PALANSOORIYA, K. N. et al. Impacts of biochar application on upland agriculture: A review. **Journal of environmental management**, v. 234, p. 52-64, 2019.

- PANCSIRA, J. International Coffee Trade: a literature review. **Journal of Agricultural Informatics**, v. 13, n. 1, 2022.
- PELL, M. et al. Microbiological methods for assessing soil quality. 2006.
- PIOTROWSKA-DŁUGOSZ, A.; CHARZYŃSKI, P. The impact of the soil sealing degree on microbial biomass, enzymatic activity, and physicochemical properties in the Ekranic Technosols of Toruń (Poland). **Journal of Soils and Sediments**, v. 15, p. 47-59, 2015.
- QIAN, S. et al. Biochar-compost as a new option for soil improvement: Application in various problem soils. **Science of The Total Environment**, v. 870, p. 162024, 2023.
- QUIROZ, M.; CÉSPEDES, C. Bokashi as an Amendment and Source of Nitrogen in Sustainable Agricultural Systems: a Review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 237-248, 2019.
- RAZZAGHI, F. et al.. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. **Geoderma**, v. 361, p. 114055, 2020.
- ROMBEL, A. et al. Sustainable biochar-based soil fertilizers and amendments as a new trend in biochar research. **Science of the total environment**, v. 816, p. 151588, 2022.
- SERNA-JIMÉNEZ, J. A. et al. A Review on the Applications of Coffee Waste Derived from Primary Processing: Strategies for Revalorization. **Processes**, v. 10, n. 11, p. 2436, 2022.
- SIA, Z. Y. et al. Amending inorganic fertilizers with rice straw compost to improve soil nutrients availability, nutrients uptake, and dry matter production of maize (*Zea mays* L.) cultivated on a tropical acid soil. **AIMS Agriculture and Food**, v. 4, n. 4, p. 1020-1033, 2019.
- SILVA, A. V. C. R. et al. Changes on microbial C and enzyme activities in soil with amendment of composted tannery sludge after 9 years. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 8, p. 501-505, 2019.
- SILVA, R. R. et al. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1584-1592, 2010.
- SIX, J. et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-Effects of no-tillage. **Agronomie**, v. 22, n. 7-8, p. 755-775, 2002.
- SMITH, P. et al. The changing faces of soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 23-30, 2018.
- TANAN, A.; ARRANG, A. T. The effect of coffee pulp bokashi and local microorganisms of stale rice on the growth of arabica coffee (*Coffea arabica* L.) seedlings. **AGROLAND The Agricultural Sciences Journal (e-Journal)**, v. 9, n. 1, p. 11-20, 2022.
- TATE, K. R. (Ed.). **Microbial Biomass: A Paradigm Shift in Terrestrial Biogeochemistry**. World Scientific, 2017.

TIAN, X et al. Biochar derived from corn straw affected availability and distribution of soil nutrients and cotton yield. **PloS one**, v. 13, n. 1, p. e0189924, 2018.

XU, H. L. Effects of a microbial inoculant and organic fertilizers on the growth, photosynthesis and yield of sweet corn. **Journal of crop production**, v. 3, n. 1, p. 183-214, 2001.

XU, M.; SHANG, H. Contribution of soil respiration to the global carbon equation. **Journal of plant physiology**, v. 203, p. 16-28, 2016.

ZAMAN, M.; AHMED, M.; GOGOI, P. Effect of bokashi on plant growth, yield and essential oil quantity and quality in patchouli (*Pogostemon Cablin Benth.*). **Biosciences Biotechnology Research Asia**, v. 7

SEGUNDA PARTE

ARTIGO

**Resíduos da cadeia cafeeira no sistema solo-planta:
Influência sobre indicadores biológicos e atributos químicos do solo**

RESUMO

A cadeia produtiva do café tem grande importância econômica mundial e gera resíduos que são subutilizados. A transformação dos resíduos orgânicos potencializa seu reuso na lavoura dentro do conceito de economia circular. A compostagem, a fermentação e a pirólise são técnicas que podem ser utilizadas no manejo dos resíduos da cafeicultura. O objetivo do estudo foi comparar diversas transformações de resíduos quanto ao efeito condicionador de solo na cultura do cafeeiro, em duas propriedades produtoras de café, (NKG: agricultura intensiva e PX: agricultura familiar) no município de Santo Antônio do Amparo, MG. O biochar foi produzido a partir de madeira de cafeeiro. Já o composto e o Bokashi tiveram a casca de café como material principal, além de outros resíduos. Os tratamentos avaliados foram: 1) casca de café crua; 2) composto orgânico; 3) Bokashi; 4) biochar; 5) COMBI (composto + biochar); 6) organomineral comercial e 7) adubação convencional (controle). Os tratamentos de 1 a 5 também receberam adubação convencional igual ao tratamento 7. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. Foram realizadas análises dos condicionadores, fertilidade do solo, bioindicadores do solo e produtividade. Em NKG, sob adubação convencional, foi observado o menor valor de pH (4,8). COMBI aumentou significativamente ($p < 0,05$) os valores de SB, t, T e V em relação à adubação convencional. Por outro lado, em PX, o composto orgânico e adubação convencional apresentaram os menores valores de pH. Já o composto e o biochar foram os que mais incrementaram a CTC a pH 7,0 (T) com aumento de 17 e 12 % em relação ao controle. A maioria dos indicadores teve maior atividade e foram fortemente associados à área de agricultura familiar devido ao maior teor de matéria orgânica do solo, que se deu mais em função do histórico de manejo do que do uso dos condicionadores de solo. Os tratamentos não influenciaram na produtividade em NKG e, em PX, biochar teve a maior produtividade. Os condicionadores de solo composto, biochar e COMBI apresentaram o melhor efeito condicionador e a matéria orgânica é um forte componente para indicadores biológicos do solo e produtividade. O estudo deve ser avaliado por mais tempo para resultados mais consolidados.

Palavras-chave: Sequestro de carbono. Efeito estufa. Qualidade do solo.

ABSTRACT

The coffee production chain has great global economic importance and generates waste that is underutilized. The transformation of organic waste enhances its reuse in farming within the concept of circular economy. Composting, fermentation and pyrolysis are techniques that can be used to manage coffee production waste. The objective of the study was to compare different transformations of residues in terms of their soil conditioning effect on coffee crops, on two coffee producing properties (NKG: intensive agriculture and PX: family agriculture) in the town of Santo Antônio do Amparo, MG. The biochar was produced from coffee tree wood. Organic compost and Bokashi, on the other hand, had coffee husks as the main material, in addition to other waste. The treatments evaluated were: 1) coffee husk; 2) organic compost; 3) Bokashi; 4) biochar; 5) COMBI (compost + biochar); 6) commercial organomineral and 7) conventional fertilizer (control). The experiment was conducted in a randomized block design, with four replications. Analyzes of conditioners, soil fertility, soil bioindicators and productivity were carried out. In NKG under conventional fertilization, the lowest pH value was observed (4.8). COMBI significantly increased ($p < 0.05$) the values of TB, t, T and V in relation to conventional fertilization. On the other hand, in PX the organic compost and conventional fertilizer presented the lowest pH values. Compost and biochar were those that most increased the CTC at pH 7.0 (T) with an increase of 17 and 12 % in relation to the control. Most indicators had greater activity and were strongly associated with the family farming area due to the higher organic matter content in the soil, which was more a function of the management history than the use of soil conditioners. The treatments did not influence productivity in NKG and, in PX, biochar had the highest productivity, due to the high level of fertility. The compost soil conditioners, biochar alone or combined with compost (COMBI) showed the best conditioning effect and organic matter is a strong component for soil biological indicators and productivity. The study should be evaluated for a longer period of time for more consolidated results.

Keywords: Carbon sequestration. Greenhouse effect. Soil quality.

1. INTRODUÇÃO

O café é a segunda bebida mais consumida e a segunda commodity mais comercializada no mundo, movimentando uma vasta cadeia produtiva (CAMPOS-VEGA et al., 2015). No Brasil, maior produtor desse grão, foram produzidas 50,1 milhões de sacas em 2022 (CONAB, 2022a). Contudo, essa produção gera, de forma direta e indireta, uma grande quantidade de resíduos. Mais de 10 milhões de toneladas de resíduos sólidos e líquidos são gerados mundialmente (ECHEVERRIA; NUTI, 2017). Uma das soluções é reinserir os resíduos gerados na cadeia de produção do café, buscando reaproveitamento de nutrientes e inserção de uma economia circular no sistema (VAN KEULEN; KIRCHHERR, 2021).

A economia circular tem como conceito o uso máximo dos recursos através da reciclagem, reutilização e recuperação (LUTTENBERG, 2020). A menor dependência de fatores externos para a produção da cadeia cafeeira trás vários benefícios de interesse ambiental e econômico, no entanto, a produção do café tem como característica uma cadeia linear (MAYSON; WILLIAMS, 2021). Na fazenda, por exemplo, são gerados resíduos vegetais de podas das plantas como galhos e folhas; águas residuais oriundas da lavagem de café e cascas da despulpagem ou beneficiamento do grão (MARTINEZ, 2019). Esses resíduos, se armazenados ou descartados de forma incorreta podem acarretar problemas ambientais, como poluição do solo e de corpos de água (IJANU et al., 2020). A economia circular possibilita a criação de um ciclo regenerativo, gerando produtos com valor agregado e responsabilidade ambiental. As cascas geradas podem retornar para as lavouras, as águas residuais são ricas em nutrientes, os quais podem ser recuperados, e os resíduos das podas, compostados (HOSEINI, et al., 2021). Todas essas alternativas levam ao fechamento do ciclo e atendem ao conceito de economia circular de que a matéria-prima deve ser acessível e abundante (VELASCO-MUÑOZ, et al., 2021).

Os resíduos sólidos gerados em uma fazenda cafeeira podem ser compostados, transformados em biochar ou retornar à lavoura sem nenhum tratamento. Na compostagem ocorre a biodegradação sob condições aeróbicas controladas, transformando fontes de carbono (C) e nitrogênio (N) em um composto rico em material mais estável, que pode ser usado como fertilizante (ZHANG et al., 2021). A adição de composto de casca de café em argisolo melhorou a resposta vegetativa e reprodutiva do milho (KOPEĆ et al., 2017). O uso do mesmo condicionador em substituição parcial à adubação química pode contribuir na melhora da fertilidade do solo, absorção de nutrientes e taxas de crescimento do cafeeiro; além de gerar maior rendimento produtivo em relação ao fertilizante químico isolado (DZUNG et al.,

2013). Um bom tratamento dado ao resíduo possibilita maior aproveitamento dos nutrientes pelas culturas.

O biocarvão ou biochar também pode ser uma alternativa para o tratamento e valorização dos resíduos do café. O biochar é obtido pela pirólise, reação que ocorre em altas temperaturas e em baixa concentração de oxigênio (LEHMANN, 2007ab). Com a produção do biochar, há uma redução do volume da biomassa e elevação da concentração de C mais persistente, que leva a uma melhora das condições físicas, químicas e biológicas do solo. O C passa a ser retido no biochar, e quando aplicado ao solo, fica sequestrado devido a sua elevada estabilidade (TAN et al., 2017). Biochar foi uma boa alternativa quando aplicado no cafeeiro para situações de estresse hídrico moderado (REYES-HERRERA et al., 2023). Além disso, o biochar possui efeito corretivo e também melhora as propriedades de retenção de nutrientes no solo (GAN et al., 2017). Entretanto, para aumentar produtividades em um curto prazo, altas quantidades desse insumo precisam ser aplicadas (LIMA et al. 2018).

Apesar dos potenciais efeitos benéficos de melhoradores orgânicos de solo, ainda há poucos estudos em campo que avaliaram sistematicamente o efeito condicionador desses materiais na cultura do cafeeiro. Dessa forma, é de grande interesse para a produção cafeeira a análise comparativa entre processos de transformação dos resíduos na melhoria da saúde e produtividade do solo. Assim, o objetivo desse trabalho é comparar composto orgânico, bokashi, biochar e COMBI (composto + biochar) derivados de resíduos da cadeia cafeeira quanto ao efeito condicionador e fertilizante sobre a cultura do café em propriedades produtoras do grão em Minas Gerais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparo dos condicionadores

2.1.1 Preparo do biochar

O biochar (FIGURA 1) foi produzido a partir de madeira de cafeeiro da propriedade PX (ramos ortotrópicos + raízes grossas) oriunda de renovação de lavoura ocorrida há cerca de três anos. A madeira foi carbonizada em uma trincheira escavada no chão do tipo “Earth pit kiln”, em metodologia adaptada de Cornelissen et al. (2016). Após seco, o biochar foi moído em um triturador de forragem adaptado, homogeneizado e passado em peneira de 4 mm antes da aplicação no campo.

Figura 1: Processo de produção do biochar



Fonte: Do autor (2023).

2.1.2 Preparo do composto

O composto (FIGURA 2) foi preparado na propriedade NKG em grande quantidade para uso na fazenda. A matéria-prima utilizada foi distribuída de forma uniforme em pilhas, que foram constituídas de casca seca de café (45% da pilha), polpa de café úmida (35% da pilha) e esterco bovino (20% da pilha). Após a distribuição dos materiais orgânicos, foram aplicados serpentinito (fonte de K) e fertilizante mineral simples (P_2O_5 : 10%, Ca: 25% e CaO: 35%), visando obter 4,7% e 7,3%, respectivamente, de volume final do pó de rocha e fertilizante na pilha de compostagem. Água residuária do processamento de café foi adicionada até atingir a umidade ideal e as pilhas de compostagem foram revolvidas mecanicamente, quando necessário ($T > 65\text{ }^\circ\text{C}$), por meio do monitoramento diário do processo de compostagem, de forma a manter a temperatura entre 55 e 65 $^\circ\text{C}$ durante a fase termofílica. Após cerca de 90 dias o composto ficou pronto para uso em campo.

Figura 2: Pilhas do composto orgânico no processo final de maturação.



Fonte: Do autor (2023).

2.1.3 Preparo do bokashi

O bokashi (FIGURA 3) foi preparado em uma pequena propriedade de produção de café com a adição de calda, cuja composição foi de 0,025% de fermento biológico (*Saccharomyces cerevisiae*) e 50% de açúcar (sacarose), em uma mistura de casca de café (50% da pilha), esterco bovino (45% da pilha), farelo de milho (4% da pilha) e cinzas de madeira (1% da pilha). As camadas da pilha foram sobrepostas de maneira alternada com aplicação da calda com regador e posterior adição de água até atingir a umidade ideal, com homogeneização manual do material. Em seguida, a pilha foi coberta com lona cuja face externa era branca e a interior preta, de forma que a pilha tivesse boa vedação ao ar. Quando necessário ($T > 45\text{ °C}$) a pilha foi revolvida, de forma a manter a temperatura abaixo de 45 °C durante a fase termofílica. Esse material levou cerca de 75 dias para ficar pronto.

Figura 3: Processo de produção do bokashi



a) Preparo do fermento

b) Maturação do bokashi

c) Bokashi maturo

Fonte: Do autor (2023).

2.2 Caracterização e análise dos condicionadores

Todos condicionadores tiveram amostras coletadas de forma representativa e passaram pelo seguinte preparo: Cerca de 200 g de amostra foram pré-secas em estufa a 60 °C por 8h, em seguida trituradas e passadas em peneira de 0,4 mm.

O pH e a condutividade elétrica (TABELA1) de todos os materiais foram determinados segundo Rajkovich et al. (2012). As amostras de cada material foram preparadas em triplicata, usando 1,0 g de cada condicionador em 20 mL de água deionizada. A mistura foi agitada por 1,5 h em um agitador orbital antes da medição do pH (S70 SevenMulti da Mettler Toledo, Columbus, OH) que foi previamente calibrado com solução padrão. A condutividade elétrica foi determinada em um condutímetro S70 SevenMulti previamente calibrado com soluções padrão igual a 1,4 dS m⁻¹.

O teor de C total dos condicionadores foi feita por combustão seca em analisador marca Elementar, modelo Vario TOC, sendo as pesagens das amostras (2 a 5 mg) de cada resíduo, seguindo metodologia de Carmo & Silva, 2012. A determinação da umidade e do teor de cinzas (TABELA 1) do biochar foram adaptadas a partir do procedimento padrão D-1762-84, estabelecido pela American Society for Testing and Materials (ASTM, 1990). Em cadinhos de porcelana pré-secos em mufla, foi pesado 1,0 g de amostra, que foram transferidos para estufa a 105 °C por 18 h, em seguida colocados em dessecador para resfriamento. A perda de massa nessa etapa foi considerada a umidade da amostra. As

amostras secas a 105 °C foram colocadas em mufla, aquecidas até 750 °C e mantidas por 6 h, que após resfriamento lento (até cerca de 105 °C), foram transferidas para dessecador e posteriormente pesadas para determinação do teor de cinzas.

Tabela1: Caracterização dos condicionadores usados no primeiro ano experimental.

Condicionador	pH H ₂ O	CE mS	C -----%-----	Cinzas
Biochar	9,8 ± 0,1	0,6 ± 0,0	68,1 ± 0,0	12,5 ± 0,0
Composto orgânico	7,9 ± 0,0	5,5 ± 0,0	40,6 ± 0,0	
Bokashi	7,7 ± 0,1	3,6 ± 0,0	20,7 ± 0,0	
Casca de café	5,2 ± 0,0	4,8 ± 0,1	11,4 ± 0,4	
Organomineral	6,6 ± 0,0	41,5 ± 0,3	66,9 ± 0,3	

*Valor médio ± erro padrão. C (Carbono Total) e Cinzas, n=2; pH e CE (Condutividade elétrica), n=3. Coeficiente de variação médio: 0,88%.

Fonte: Do autor (2023).

O teor de nitrogênio total (TABELA 2) de casca de café, composto orgânico, bokashi e organomineral foram submetidos à digestão de N por Kjeldahl, usando a modificação do ácido salicílico de Bremner e Mulvaney (1982). Um grama de cada amostra em triplicata foi transferida para tubo digestor com 1,1 g de mistura digestora (100 g de K₂SO₄ + 10 g de CuSO₄·5H₂O + 1 g de Se). Em seguida foi adicionado ácido sulfúrico e procedida a digestão. Após, foi adicionado 20 mL de água deionizada e realizada a destilação. Em 50 mL do destilado foi realizada a titulação com H₂SO₄ (0,05N) e determinado o teor de N.

Os teores totais dos demais macro e micronutrientes (TABELA 2) de todos condicionadores foram determinados de acordo com Enders e Lehmann (2012). Para isso, 0,20 g das amostras dos condicionadores foram transferidas para tubos; adicionou-se ácido nítrico e em seguida foram submetidas a digestão a 120 °C, com adição de H₂O₂ na etapa final. O material digerido foi dissolvido em 20 mL de solução de HCl a 5% (v/v). O conteúdo dos tubos foi filtrado em membranas (< 0,45 µm) e os elementos foram quantificados por ICP-OES (Spectro Analytical Instruments, Kleve, Germany).

Tabela 2: Teores totais de nutrientes dos condicionadores utilizados no primeiro ano experimental.

Elemento	Condicionador				
	Biochar	Composto Orgânico	Bokashi	Casca de café	Organomineral
	-----g kg ⁻¹ -----				
N	-	12,5 ± 0,3	18,1 ± 0,1	19,1 ± 0,4	139 ± 0,7
P	0,6 ± 0,0	4,5 ± 0,0	4,6 ± 0,0	1,2 ± 0,0	7,6 ± 0,0
K	6,5 ± 0,0	18,2 ± 0,1	20,7 ± 0,4	31,1 ± 0,3	67,5 ± 1,5
Ca	13,4 ± 0,1	39,6 ± 0,4	25,9 ± 0,3	5,0 ± 0,2	13,3 ± 0,1
Mg	3,1 ± 0,0	13,0 ± 0,0	9,9 ± 0,1	1,6 ± 0,0	4,4 ± 0,0
Al	12,4 ± 0,2	27,1 ± 0,0	26,7 ± 0,0	1,2 ± 0,3	12,6 ± 0,1
Fe	8,0 ± 0,1	46,3 ± 0,6	30,5 ± 0,4	1,7 ± 0,2	5,4 ± 0,1
Na	0,3 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,9 ± 0,1	0,3 ± 0,0	3,7 ± 0,0
S	0,1 ± 0,1	3,0 ± 0,3	2,0 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,2 ± 0,1
	-----mg kg ⁻¹ -----				
Zn	15,9 ± 1,6	60,0 ± 2,1	64,2 ± 3,7	17,8 ± 3,3	60,5 ± 1,8
B	4,4 ± 1,2	24,6 ± 2,4	15,4 ± 1,5	16,4 ± 1,7	12,6 ± 2,0
Cu	22,2 ± 0,2	49,6 ± 0,2	42,9 ± 1,0	30,0 ± 0,4	41,4 ± 0,4
Mn	86,1 ± 1,3	422 ± 6,8	372 ± 6,0	45,7 ± 4,7	187 ± 1,7

Valor médio ± erro padrão, n=3; coeficiente de variação médio: 7,67%.

Fonte: Do autor (2023).

2.3 Experimento de Campo

O experimento foi conduzido na safra 2021/22 em duas propriedades no município de Santo Antônio do Amparo-MG. Uma área experimental foi em uma pequena propriedade produtora de café de agricultura familiar (PX) (coordenadas: 20°52'31" S, 44°54'38" W; altitude 1.051 m) e a outra em uma grande fazenda de produção de café (NKG) (coordenadas: 20°52'19" S, 44°49'41" W; altitude: 1.002 m). Na propriedade PX, a variedade estudada foi Mundo Novo, com espaçamento de 3,70 m x 0,60 m (4.504 plantas ha⁻¹) e idade de 16 anos, manejo semimecanizado e como fonte principal de adubação o fertilizante organomineral há mais de 10 anos. Na fazenda NKG, a variedade estudada foi o Acaiá, com espaçamento de 3,50 m x 0,60 m (4.761 plantas ha⁻¹), idade de 6 anos, com manejo mecanizado e com fonte principal de adubação de fertilizantes químicos convencionais. Ambas as áreas estão em sistema de sequeiro, temperatura média anual de 19,8 °C e precipitação média de 1.670 mm. De acordo com Köppen-Geiger, o clima da região é classificado como Cwa (clima subtropical de altitude), com inverno seco e verão quente.

Os seguintes tratamentos (FIGURA 4) foram aplicados no dia 9 de dezembro de 2021:

1) casca de café crua, 2) composto orgânico, 3) bokashi, 4) biochar de madeira de cafeeiro, 5) COMBI (mistura de composto + biochar, 1:1 m:m), 6) organomineral comercial e 7) adubação convencional. No primeiro ano de condução, foi aplicada a dose fixa de 5 t ha^{-1} (com base na massa seca) dos tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5 em adição à adubação praticada pelas propriedades (PX: 1.000 kg ha^{-1} de calcário e 1.428 kg ha^{-1} de organomineral comercial, cuja composição é: 12% de N, 0,2% de P_2O_5 , 12% de K_2O e 9% de carbono orgânico; e NKG: 723 kg ha^{-1} de gesso agrícola: 197 kg ha^{-1} de MAP; 612 kg ha^{-1} de KCl parcelados em duas aplicações, 518 kg ha^{-1} de nitrato de amônio e 303 kg ha^{-1} de ureia). No tratamento 6, foram aplicados: 1.428 kg ha^{-1} em PX e 1.351 kg ha^{-1} em NKG de organomineral; e no tratamento 7: 2.162 kg ha^{-1} de KCl e 460 kg ha^{-1} de nitrato de amônio, visando a mesma dose de K_2O e N em ambos os tratamentos. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados (DBC), com 4 repetições e 8 plantas por parcela, considerando-se as 6 plantas centrais como área útil da parcela. A adubação, manejo fitotécnico e fitossanitário foram os utilizados rotineiramente em ambas as propriedades e seguiram critérios técnicos das mesmas.

Figura 4: Tratamentos aplicados utilizados nas áreas experimentais.



Fonte: Do autor (2023).

2.4 Caracterização química e granulométrica do solo

Uma amostra composta de solo foi coletada da camada de 0-20 cm em outubro de 2021, sob a projeção da saia do cafeeiro, para caracterização de ambas as áreas antes da implantação do experimento. O solo foi seco ao ar, peneirado (<2,0 mm), homogeneizado e caracterizado quimicamente (TABELAS 3, 4 e 5), de acordo com a rotina brasileira de análise de solo (TEIXERIA et al., 2017). De forma breve, P, Na, K e micronutrientes foram extraídos por Mehlich-1; pH foi medido em água (solo: solução, 1: 2,5); Ca, Mg e Al foram extraídos por KCl (1 mol L⁻¹) e o teor de matéria orgânica foi determinado por oxidação com Na₂Cr₂O₇ e H₂SO₄.

Tabela 3 – Análise química e física do solo (0-20 cm) na área NKG e PX antes da implantação do experimento.

Local	pH H ₂ O	P mg dm ⁻³	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m
				-----		cmol _c dm ⁻³ -----					-----%-----	
NKG	5,3	48,7	166	1,7	0,5	0,0	4,6	2,6	2,5	7,2	35,6	0,0
PX	5,3	13,7	142	2,2	0,7	0,2	4,0	3,3	3,5	7,3	45,3	5,7
Local	MO dag kg ⁻¹	P-rem mg L ⁻¹	B	Zn	Cu	Fe	Mn	S	Argila	Silte	Areia	Classificação
			-----			mg dm ⁻³ -----			-----	dag kg ⁻¹ -----		
NKG	1,4	11,6	2,9	5,4	3,1	30,2	6,0	59,0	48	8	44	Argiloso
PX	3,5	27,5	0,1	1,9	2,9	27,3	5,1	30,7	63	12	23	Argiloso

pH: acidez ativa; P (Mehlich-1); SB – Soma de bases; t – Capacidade efetiva de troca catiônica; T – Capacidade de troca catiônica à pH 7,0; V – Saturação de bases; m – Acidez trocável; MO – Matéria orgânica; P-rem – P remanescente.

Fonte: Do autor (2023).

2.5 Indicadores biológicos do solo

Para execução das análises de indicadores biológicos do solo, as metodologias e adaptações seguidas foram conforme por Aragão et al. (2020). As coletas de solo para indicadores microbiológicos ocorreram ainda durante o período chuvoso (março de 2022). A coleta consistiu na tradagem de quatro pontos da parcela experimental, amostradas aleatoriamente sob a projeção da copa da planta, em ambos os lados, na profundidade de 0-10 cm. As amostras compostas foram acondicionadas em sacos plásticos identificados e levadas para serem mantidas resfriadas a 4 °C, até que fossem feitas as análises posteriores no intervalo de 15 dias.

2.5.1 Carbono da biomassa microbiana (CBM)

O CBM foi determinado pelo método de fumigação e extração (BROOKES et al., 1985; VANCE et al., 1987). Foram pesados 20 gramas de cada amostra de solo, com seis repetições - três delas são fumigadas em dessecador contendo 30 mL de clorofórmio livre de etanol e três não são fumigadas. Após este procedimento, todas as amostras foram incubadas no escuro a 27 °C por 24 h. Para a extração, 50 mL de K_2SO_4 (0,5 M) foram adicionados às amostras, e a mistura foi agitada por 30 min. Em seguida, a suspensão foi filtrada em papel filtro número 42, obtendo-se um extrato como solução. O carbono microbiano foi determinado pela digestão de 8 mL desse extrato filtrado com 2 mL de $K_2Cr_2O_7$, 10 mL de H_2SO_4 (95%) e 5 mL de H_3PO_4 (85%). Essa mistura foi aquecida por 5 min. e, após o resfriamento, titulada com sulfato de amônio ferroso, utilizando difenilamina como indicador. Os mesmos procedimentos foram realizados nas amostras controle para averiguação de possíveis contaminações, exceto pela adição do extrato do solo.

2.5.2 Respiração basal microbiana (RBM)

A estimativa de CO_2 liberado pelo solo durante incubação foi feita pela captura deste por NaOH, seguido de titulação com HCl (ALEF, 1995). Foram pesados 20 g de cada amostra de solo, as quais foram umedecidas até aproximadamente 55% da capacidade de campo e colocadas em frascos hermeticamente fechados, juntamente com 20 ml de solução de NaOH (0,5 M). A mistura foi incubada por 72 h no escuro. O controle foi formado por três recipientes com 20 ml de NaOH incubados nas mesmas condições, sem o solo. Após o período de incubação, o CO_2 capturado pelo NaOH foi precipitado pela adição de 5 ml de $BaCl_2 \cdot 2 H_2O$ (0,5 M). O NaOH que não sofre reação foi titulado com HCl (0,5 M) e cinco gotas do indicador fenolftaleína (0,1%), até passar da cor vermelha para incolor.

2.5.3 Quociente metabólico (qCO_2)

O qCO_2 foi calculado pela razão entre RBM e CBM (ANDERSON & DOMSCH, 1993), cujo resultado obtido e expresso em $mg\ C-CO_2\ g\ de\ CBM\ dia^{-1}$.

2.5.4 Quantificação de β -glicosidase e fosfatase ácida

A análise da atividade de β -glicosidase foi quantificada por determinação colorimétrica de *p*-nitrofenol (PNF) usando 4-nitrofenil β -D-glucopiranosídeo (PNG) e a de fosfatase ácida por determinação colorimétrica de 4-nitrofenil dissódio ortofosfato (DICK et al., 1997).

Para β -glicosidase, de cada amostra foi pesado um grama de solo, no qual foram adicionados 0,25 ml de tolueno, 1,0 ml de tampão universal modificado (MUB) em pH 6,0 e 1,0 ml de solução de PNG. Frascos dessas misturas foram levemente agitados e incubados por 1 h a 37 °C. Após esse período, foram adicionados 1,0 ml de CaCl_2 e 4,0 ml de solução de tris hidroximetil aminometano com pH 12. A absorbância da cor amarela desenvolvida após o período de incubação foi lida em um espectrofotômetro a 410 nm usando uma curva de calibração padrão de PNG. O mesmo procedimento foi realizado para fosfatase ácida, usando o substrato PNF.

2.5.5 Quantificação da urease

A atividade da urease foi baseada na determinação da amônia liberada após a incubação do solo com solução de ureia (TABATABAI & BREMNER, 1972). Cinco gramas de solo foram pesados, aos quais foram adicionados 2,0 ml de tolueno, 9,0 ml de tampão MUB com pH 9,0 e 1,0 ml de solução com uréia (0,2 M). Essa mistura foi mantida por 2 h a 37 °C em uma câmara de incubação. Em seguida, foram adicionados 35 ml de uma solução aquosa de cloreto de potássio e sulfato de prata ($\text{KCl } 2\text{M}-\text{Ag}_2\text{SO}_4$ 100 ppm) para interromper a reação. Após agitação, a mistura foi deixada por cinco minutos em temperatura ambiente, e o volume foi completado para 50 ml com solução de $\text{KCl}-\text{Ag}_2\text{SO}_4$ e agitado por alguns minutos. Dessa suspensão, 20 ml de alíquota foi recolhido, aos quais 0,2 g de óxido de magnésio foram adicionados e levados para passar por um microdestilador. O destilado foi coletado em um Erlenmeyer contendo solução de ácido bórico e os indicadores vermelho de metila e verde de bromocresol, que foi titulado com solução padronizada de H_2SO_4 (0,005 M). O controle seguiu os mesmos procedimentos anteriores; no entanto, a uréia foi adicionada somente após a solução de $\text{KCl}-\text{Ag}_2\text{SO}_4$.

2.6 Colheita e produtividade

A colheita ocorreu no ano agrícola 2021/22 e foi efetuada em cada parcela útil, após ter ao menos 80% dos frutos em estágio de cereja. Depois de colhido, o volume de grãos de cada parcela foi medido e uma subamostra de cada parcela (3L) foi coletada para mensuração da produtividade média de cada tratamento, após secagem dos grãos ao tempo em terreiro até obtenção de umidade de 12%. Também foram estimados o rendimento e a renda. O rendimento foi obtido por meio da determinação do volume necessário de frutos frescos para obtenção de uma saca de café beneficiado (L saca⁻¹). A renda foi obtida da relação entre o peso do café beneficiado e o de café seco em coco, em porcentagem.

2.7 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância e validados à significância do modelo estatístico. Os valores médios foram agrupados pelo algoritmo Scott-Knott a 5% de significância no programa R, com a interface RSTUDIO versão 4.1.3. De posse dos valores obtidos para atributos químicos e microbiológicos, foi realizada uma análise de componentes principais (PCA). Para a PCA foi realizada uma análise para estabelecer a contribuição na explicação da variância das variáveis avaliadas em cada um dos tratamentos realizados e sua relação com as áreas avaliadas, PX e NKG. Foram utilizados os pacotes: devtools, ggplot2, rlang, FactoMineR, ade4, tidyverse, xts, zoo e Performance Analytics.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Atributos químicos das áreas antes da implantação do experimento

As referências utilizadas como ideais do solo para a cultura do cafeeiro nesse estudo levam em consideração a 5ª Aproximação - Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (RIBEIRO et al., 1999). Para acidez ativa (TABELA 3), ambas as áreas tiveram classificação agrônômica baixa (pH 5,3). O ideal para a cultura do cafeeiro é o pH do solo entre 5,5 e 6,5 (MALAVOLTA, 1993). A saturação por bases (V) se encontrava como inadequado a cultura, que deve ser de 60%. Ambas as áreas receberam condicionador e corretivo, gesso agrícola na área NKG e calcário agrícola na área PX antes da aplicação dos tratamentos.

Os teores de Ca e Mg estavam médios, enquanto que os teores de Al^{3+} não eram prejudiciais, estando baixos em ambas as áreas. Os atributos químicos SB, t e T estavam classificados como medianos. A MOS da área NKG foi classificada como baixa e da área PX como média. Esses teores podem influir em muitos aspectos do sistema solo-planta, afetando propriedades físicas, químicas e biológicas (LAL, 2004). O teor de MOS da área NKG reflete o histórico de uso intenso de fertilização química e mecanização intensiva, além de ser uma lavoura com implantação relativamente recente (6 anos), sendo que esses fatores podem reduzir o estoque de MOS do solo. PX é uma propriedade familiar, com histórico de cerca de 10 anos de uso de organomineral, uma lavoura com mais tempo de cultivo contínuo (16 anos), mecanização pouco intensa e recente renovação (no ano 2020). Todos esses fatores em PX podem ter ajudado na construção e manutenção dos estoques de MOS do solo. Os micronutrientes e S apresentaram teores adequados em ambos locais, exceto por B na área PX, que estava baixo. Quanto à textura, ambas as áreas são argilosas.

3.2 Indicadores biológicos do solo

Em PX, os tratamentos composto orgânico e organomineral foram superiores aos demais quanto à respiração basal microbiana (RBM) (FIGURA 5). Esse indicador pode ser afetado tanto por mudanças na comunidade microbiana em resposta à adição de fontes de C quanto por condições de estresse impostas ao meio (HUESO & HERNÁNDEZ, 2012). A produção de CO_2 é afetada de forma direta pela MOS devido sua qualidade e quantidade no

solo (PEÑA et al., 2005). A área PX possui maior teor de MOS em comparação a área NKG (TABELAS 4 e 5) e um histórico de adubação com organomineral, que podem ter refletido nesse indicador biológico, que é maior em PX em todos tratamentos em comparação à NKG.

Em NKG, o tratamento com maior RBM foi biochar (FIGURA 6). Biochar, por sua área superficial e maior porosidade, tende a favorecer a biomassa microbiana (MANYÀ, 2012). A superfície e os poros do biochar fornecem habitat para microrganismos e seu envelhecimento tende a melhorar o pH, aeração, retenção de água e nutrientes no solo (GUL et al., 2015). Essa influência benéfica direta do biochar na qualidade do solo resulta em mais habitats e nichos para os microrganismos. Além disso, manejo do solo pode selecionar uma população microbiana mais eficiente, que perde menos C via respiração (BALOTA et al., 1998; WU et al., 2020).

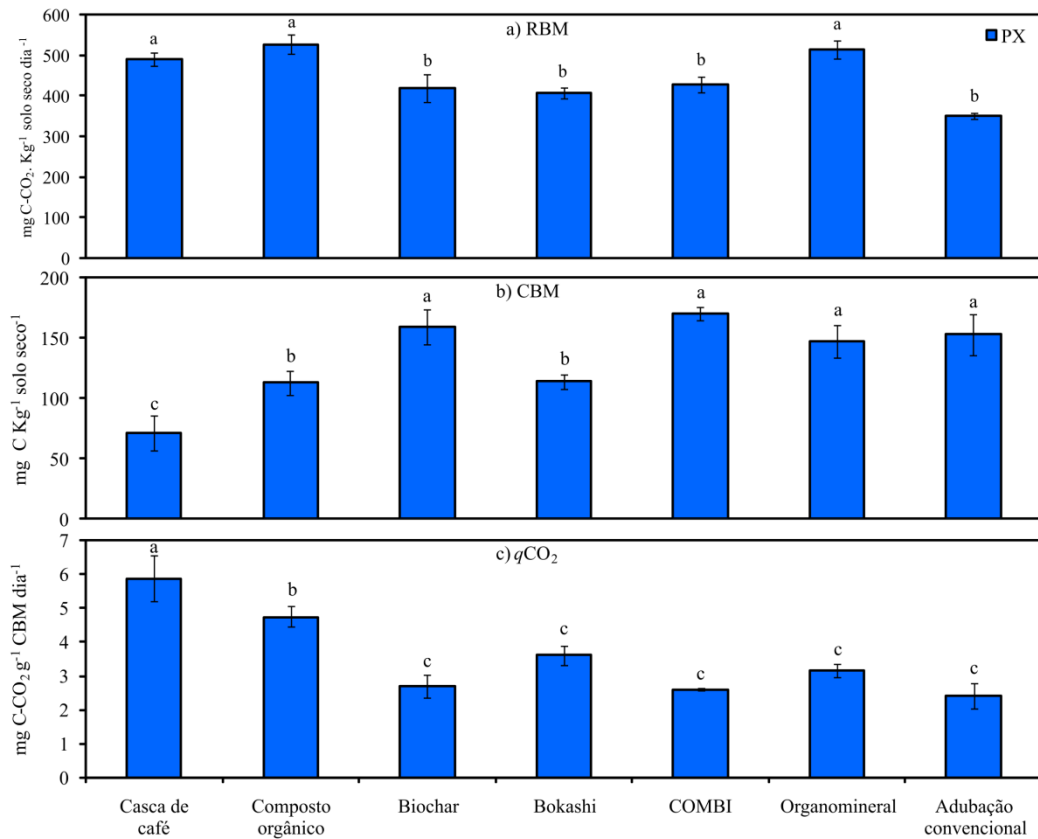
Em PX, os tratamentos biochar, COMBI, organomineral, adubação convencional e controle foram superiores em relação aos demais quanto ao teor de C da biomassa microbiana (CBM), enquanto que em NKG houve diferença para composto orgânico, COMBI e controle (FIGURA 5 e 6). Em NKG, onde CBM foi superior, houve menor qCO_2 , o que indica que os tratamentos utilizados contribuíram para aumento da comunidade microbiana sem um estresse, podendo haver maior fixação de C nesses tratamentos e menor mineralização. Em PX, os maiores teores de CBM geraram níveis intermediários de qCO_2 dentro desse estudo. Valores elevados de qCO_2 indicam que está ocorrendo maior respiração e provável desequilíbrio (CLAYTON et al., 2021).

Devido ao teor de MOS e histórico de manejo de PX, pode haver ali uma comunidade microbiana já eficiente e bem estabilizada, demonstrada pelo menor CBM da área em comparação à área NKG. A aplicação dos condicionadores em NKG pode ter favorecido a comunidade local, gerando maiores teores de CBM. Isso, em longo prazo, pode auxiliar no incremento de C da área.

O quociente metabólico microbiano indica a eficiência do uso do C microbiano, sendo um parâmetro que controla diretamente a atividade microbiana na ciclagem do C (KAISER et al., 2014; XU et al., 2017). Para essa variável (qCO_2) em PX, os tratamentos que tiveram diferença significativa e foram superiores em relação aos demais (com menor eficiência em fixar C), foram casca de café e composto orgânico (FIGURA 5 e 6). Na área NKG, o tratamento que levou a um maior qCO_2 foi o organomineral. O maior qCO_2 pode indicar maior perda de C para a atmosfera, evidenciando um desequilíbrio. Essa alteração pode ocorrer devido a acessibilidade do substrato de C aos microrganismos, mudanças nos padrões metabólicos ou alterações na composição da microbiota (ALVAREZ et al., 1995). Em PX, os

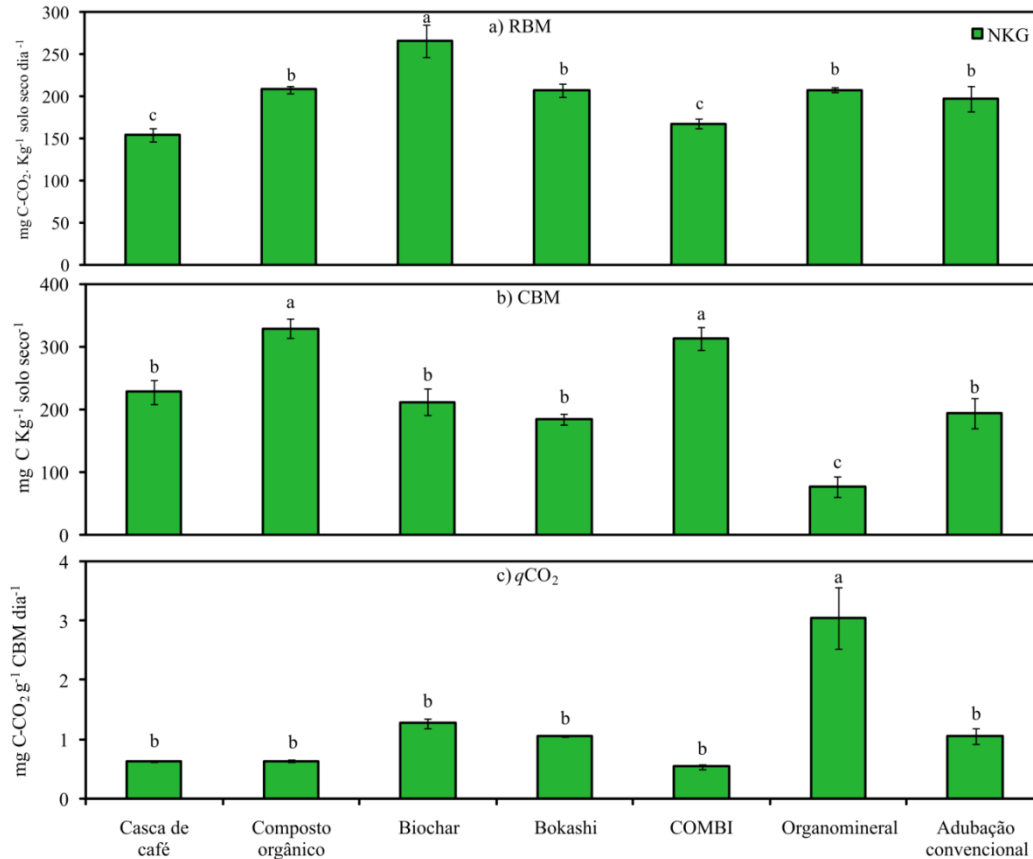
tratamentos casca de café e composto orgânico podem ter selecionado uma comunidade nova, cujas células são metabolicamente mais ativas e geram maior $q\text{CO}_2$ (BALOTA et al., 1998). O tratamento organomineral em NKG foi o menos eficiente em promover crescimento da comunidade microbiana, por ter gerado um maior quociente metabólico e o menor CBM. Há maior perda de C nessa área para esse tratamento e provavelmente ele promoveu um crescimento de uma comunidade microbiana não tão eficiente na manutenção dos teores de C.

Figura 5 - a) CBM: carbono da biomassa microbiana, b) MBR: respiração microbiana basal e c) $q\text{CO}_2$: quociente metabólico da área de campo PX. Letras comparam os tratamentos dentro da área PX. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott–Knott ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão médio do tratamento ($n=4$).



Fonte: Do Autor (2023).

Figura 6 - a) RBM: respiração microbiana basal, b) CBM: carbono da biomassa microbiana e c) qCO_2 : quociente metabólico da área de campo NKG. Letras comparam os tratamentos dentro da área NKG. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott–Knott ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão médio do tratamento ($n=4$).



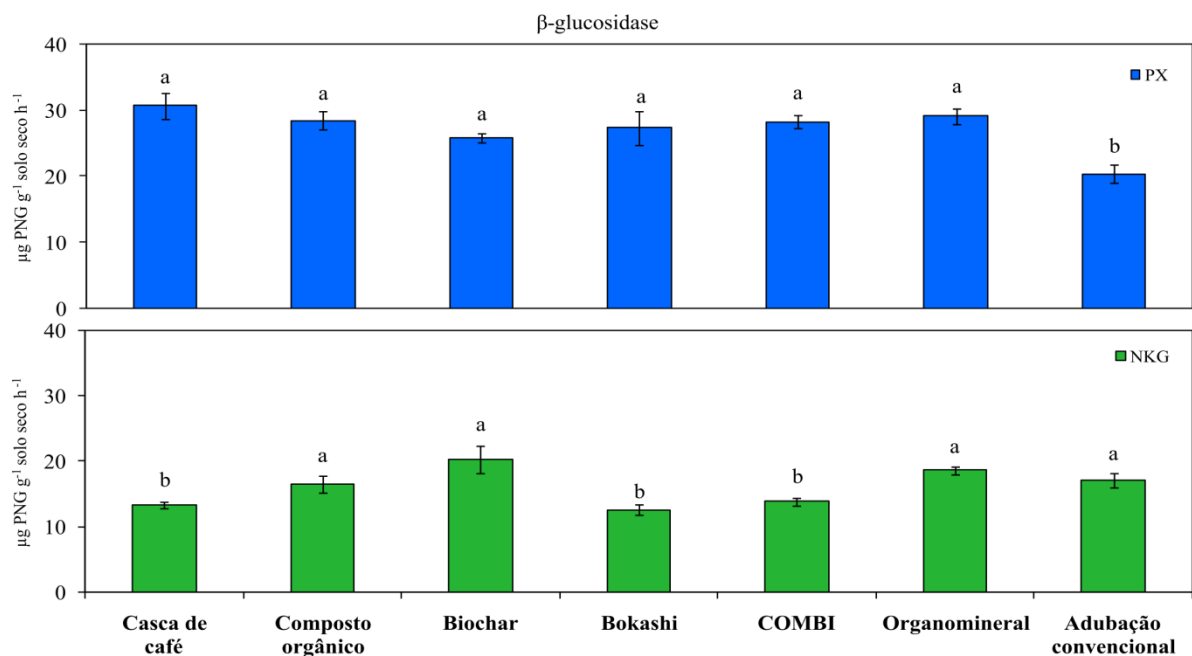
Fonte: Do Autor (2023).

A enzima β -glucosidase teve maior atividade em PX em relação à área NKG (FIGURA 7), sendo superior cerca de 1,7 vez. A atividade da β -glucosidase está intimamente relacionada com a MOS, atividade biológica e ciclagem de C (ALMEIDA et al., 2015). Como o local PX possui teores médios de MOS superiores aos de NKG, isso pode explicar a atividade mais elevada da enzima. Sendo assim, a enzima teve maior atividade porque solos com correção e menor relação C:N a favorecem, levando à rápida decomposição da MOS e liberação de nutrientes (ADETUNJI et al., 2017). Como pode ser observado (FIGURA 7 e TABELA S1), a adubação convencional foi o tratamento que menos contribuiu para a atividade dessa enzima. Isso ocorre porque a enzima atua na decomposição da celulose pela hidrólise da celobiose (SHERENE, 2017), e esse tratamento não oferta esse tipo de substrato à

comunidade microbiana. Entretanto, o mesmo não foi observado em NKG para o mesmo tratamento.

Na área NKG, composto orgânico, biochar, organomineral e adubação convencional foram superiores na atividade de β -glucosidase e diferiram dos demais tratamentos. Apesar da diferença, de forma geral, essa área possui menor teor de MOS (TABELA 5) em relação à área PX, o que explica a baixa atividade da β -glucosidase. Ambientes com menor quantidade e qualidade de MOS tendem a apresentar menor atividade da β -glucosidase (ALMEIDA et al., 2015). Composto orgânico e organomineral, por suas características de substratos com fácil disponibilidade de nutrientes para a posterior mineralização, levaram a uma maior atividade da enzima. Biochar pode favorecer a maior atividade da microbiota, devido sua alta porosidade que serve de abrigo, aumentando o número de bactérias e micorrizas da área (AGEGNEHU et al., 2017). Isso pode ter aumentado a atividade da enzima (FIGURA 7).

Figura 7 - Atividade da enzima β -glucosidase. Letras comparam os tratamentos dentro das áreas PX e NKG separadamente. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão médio dos tratamentos ($n=4$).

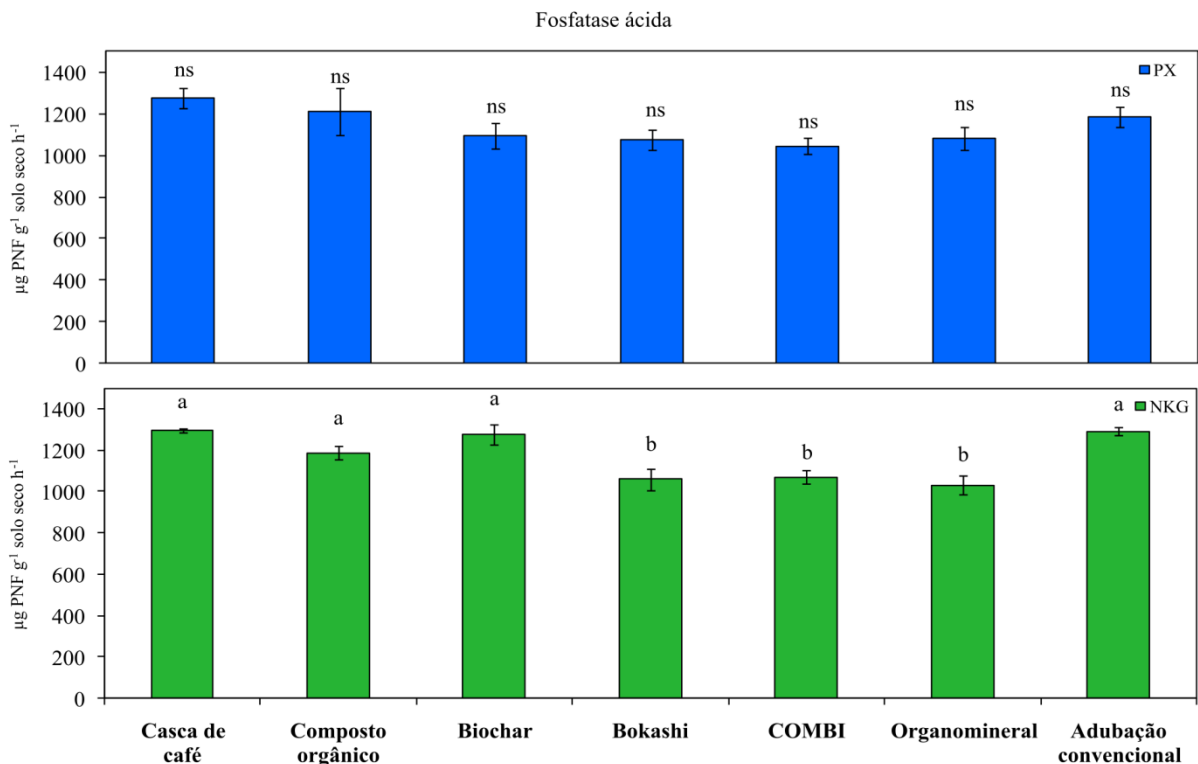


Fonte: Do Autor (2023).

Na área PX não houve diferença significativa entre os tratamentos para a atividade da fosfatase (FIGURA 8). Alguns fatores influenciam a enzima fosfatase como pH, temperatura, fonte de C e nitrogênio (BEHERA et al., 2017). A área PX teve pH e MOS médios de 5,7 e

4,1 % respectivamente, enquanto que NKG teve valores médios de pH e MO de 5,2 e 2,3 %. Apesar da baixa atividade em NKG, houve diferença significativa entre os tratamentos, sendo que bokashi, COMBI e organomineral foram inferiores aos demais.

Figura 8 - Atividade da fosfatase ácida. ns = diferença não significativa e letras minúsculas comparam os tratamentos dentro da área NKG. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott–Knott ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão médio dos tratamentos ($n=4$).



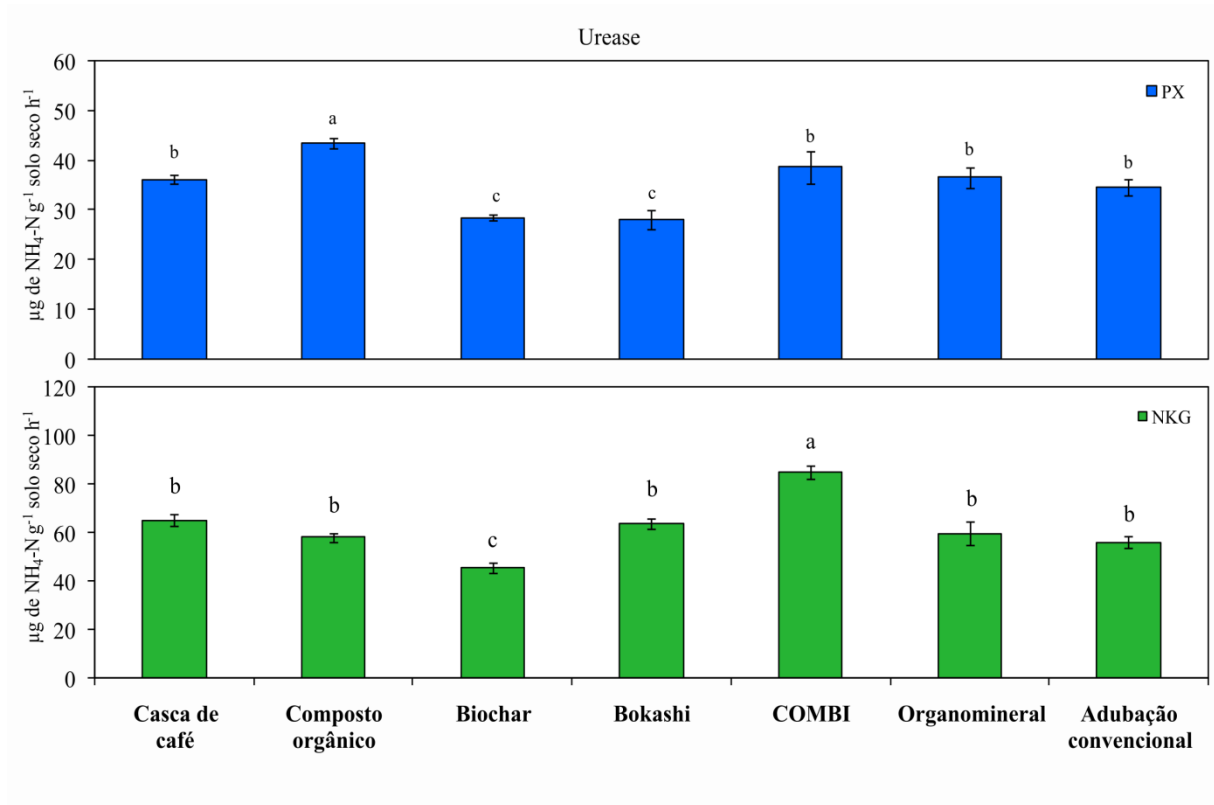
Fonte: Do autor (2023).

Na área PX o tratamento com maior valor de atividade da urease (FIGURA 8) foi composto orgânico e os menores valores de urease foram observados com biochar e bokashi. Locais que recebem adubação orgânica tem a atividade da enzima aumentada (CRECCHIO et al., 2004; CHANG et al., 2007; MEYER et al., 2015), como ocorreu com composto orgânico nesse estudo.

Na área NKG, o tratamento que se diferenciou dos demais foi o COMBI. Devido ao COMBI possuir em sua composição composto orgânico, que aumenta a atividade da urease e biochar, que por apresentar alta porosidade (abrigo para microbiota) e fornecer certa quantidade de C lábil (DAI et al., 2021), pode ter levado a uma atividade superior. Além disso, o biochar atua como um depósito de carbono e nutrientes, o que favorece o crescimento microbiano do

solo (LEHMANN et al. 2011) e possui de compostos de nitrogênio que atuam como substrato para a urease (HUANG et al. 2017).

Figura 9 - Atividade de urease. Letras comparam os tratamentos dentro das áreas PX e NKG separadamente. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott–Knott ($p < 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão médio dos tratamentos ($n=4$).



Fonte: Do autor (2023).

3.3 Efeitos dos condicionadores sobre o solo

Após a implantação do experimento e colheita (TABELA 4), no local PX, o tratamento bokashi, biochar e COMBI diferiram dos demais quanto ao pH, sendo classificados como pH bom e alto. Os tratamentos controle e composto orgânico foram inferiores aos demais e ficaram com pH baixo. No local NKG (TABELA 5), apenas o tratamento adubação convencional foi inferior aos demais tratamentos, ficando com acidez elevada. Com excessão de COMBI que ficou com acidez agrônômica com classificação boa, os demais tratamentos tiveram acidez baixa. A aplicação excessiva de fertilizantes inorgânicos aumenta a degradação da MOS e leva a acidificação do solo, reduzindo a eficiência do fertilizante (ROBA et al., 2018).

Para K na área PX, os tratamentos composto orgânico, organomineral e adubação convencional foram inferiores e diferiram dos demais, ficando com teores muito bons ($> 200 \text{ mg dm}^{-3}$). Os demais tratamentos ficaram cerca de 2,1 vezes superiores ao teor muito bom para a cultura ($>200 \text{ mg dm}^{-3}$) e diferiram dos demais. Para K na área NKG, os tratamentos casca de café, biochar e organomineral foram superiores e diferiram dos demais, com classificação boa. O K está ligado ao enchimento e formação dos grãos de café, com influência no tamanho dos mesmos (MALAVOLTA et al., 1997; MATIELLO et al., 2010). Em PX, com produtividade média superior, o tratamento adubação convencional gerou menor renda (TABELA 4), provavelmente devido ao menor teor de K no solo.

Para PX não houve diferença quanto ao Ca (teores bom e muito bom) e Mg (teores médio e bom). Já em NKG, os teores de Ca e Mg diferiram dos demais para o tratamento COMBI (que elevou o teor de ambos nutrientes para muito bom). Isso pode ser explicado pelo sinergismo entre composto orgânico (que possui o maior teor do nutriente, Tabela 3) e biochar, já que o condicionador COMBI é resultante da mistura de ambos. Biochar pode ter incrementado a disponibilidade de Mg e Ca.

Na área PX não houve diferença entre tratamentos para SB. Na área NKG houve diferença entre tratamentos sendo que COMBI foi superior aos demais tratamentos, enquadrando-o como teor muito bom. Como ocorreu para Ca e Mg, COMBI pode ter afetado positivamente a SB.

Os mecanismos envolvendo biochar e nutrientes no solo relatados são absorção de nutrientes pela matriz porosa de biochar, maior colonização microbiana, degradação de substâncias nocivas, melhoria da reatividade da superfície pelo envelhecimento oxidativo acelerado e sorção de carbono orgânico dissolvido (PIETIKÄINEN et al., 2000; TUOMELA et al., 2000; STEINER et al., 2010; CHENG & LEHMANN, 2009; ZIMMERMAN, 2010; PROST et al., 2013). Além disso, a combinação de biochar com composto é uma solução para melhorar o desempenho vegetal, tendo efeitos sinérgicos positivos nas propriedades do solo e nas respostas de crescimento das plantas (STEINER et al., 2010; FISCHER & GLASER, 2012; LIU et al., 2012). Um dos efeitos da mistura composto-biochar é o sinergismo promovido pelo fornecimento direto de nutrientes (AGEGNEHU et al., 2017).

O biochar pode ter atuado no aumento significativo nos atributos químicos (K, Ca e Mg) e no pH do solo pelas suas características de grande quantidade de íons existentes na superfície do biocarvão ou pela interação entre o condicionador e o solo, que pode mobilizar a atividade microbiana degradando os componentes do solo, o que leva à disponibilidade de nutrientes para a planta (LIU et al. 2017). Os resultados desse estudo vão de encontro aos que

foram encontrados por Martis Filho et al. (2021), em que o biocarvão afetou significativamente os teores de K, Ca e pH. A pirólise leva ao acúmulo de substâncias alcalinas na superfície do biochar, o que aumenta o pH do solo e está ligado à disponibilidade de nutrientes (YUO et al., 2017).

Na área PX não houve diferença para capacidade de troca catiônica efetiva (t) e nesse atributo todos os tratamentos estão dentro da faixa “bom”. Em NKG, a CTC efetiva teve diferença, sendo o tratamento COMBI superior aos demais, classificado como teor muito bom. Os demais tratamentos de NKG estão dentro da faixa “bom”.

Para CTC potencial (T) em PX, houve diferença superior para composto orgânico e biochar, ficando com T classificada como boa. Em NKG, a diferença superior foi para COMBI, casca de café e composto orgânico. Tanto em experimentos de incubação, quanto em campo, o biochar tem efeito positivo sobre T (VAN ZWIETEN et al., 2010; MAJOR et al., 2010). Com o envelhecimento do material ocorre a oxidação da superfície, elevando T ao longo do tempo (CHENG et al., 2006 e 2008). O biochar tem potencial para melhorar o armazenamento e o fornecimento de nutrientes.

Saturação por bases (V) teve diferença significativa em ambas as áreas. Em PX, os tratamentos superiores aos demais foram bokashi, COMBI e organomineral, todos na faixa bom enquanto que os demais não ficaram dentro de uma faixa ideal para a cultura, com destaque para adubação convencional, que foi inferior a todos os tratamentos. Em NKG, apenas COMBI foi superior aos demais. Na mesma área, adubação convencional levou a um V não ideal para a cultura, o que não ocorreu com os demais tratamentos.

Quando se observa a MOS dos sistemas, PX possui teor médio bom e 1,8 vez superior à área NKG, que tem teor de MOS tido como mediano. Isso ocorreu devido o manejo adotado pela propriedade, que é menos intervencionista. Além disso, o tempo de cultivo dessa área é superior (NKG, 6 anos e PX, 16 anos). Composto, biochar ou COMBI precisam de taxas maiores ($>9 \text{ T ha}^{-1}$) e frequência (>6 anos) para afetar a MOS (COOPER et al., 2020).

Tabela 4–Análise química do solo (0-20 cm) na área PX após a implantação do experimento.

Tratamentos	Atributos químicos do solo na área PX										
	pH	K	P	Ca	Mg	H+Al	SB	t	T	V	MO
	H ₂ O	----mg dm ⁻³ ----		-----cmol _c dm ⁻³ -----				-----%-----			dag kg ⁻¹
Casca de café	5,6 ± 0,1b	376 ± 50,5a	22,2 ± 7,8	3,5 ± 0,5	0,8 ± 0,1	4,2 ± 0,2c	5,2 ± 0,5	5,3 ± 0,5	9,5 ± 0,4b	54,7 ± 3,3b	4,2 ± 0,3
Composto orgânico	5,3 ± 0,0c	315 ± 30,1b	30,5 ± 7,7	3,9 ± 0,5	1,0 ± 0,1	5,5 ± 0,2a	5,8 ± 0,6	5,9 ± 0,6	11,1 ± 0,5a	50,9 ± 1,7b	4,2 ± 0,1
Biochar	6,1 ± 0,0a	498 ± 67,9a	39,8 ± 10,4	3,2 ± 0,4	1,3 ± 0,2	4,9 ± 0,4b	5,8 ± 0,2	5,9 ± 0,2	10,6 ± 0,1a	54,5 ± 3,0b	3,9 ± 0,2
Bokashi	6,3 ± 0,1a	387 ± 66,3a	27,0 ± 5,4	4,1 ± 0,5	1,0 ± 0,1	3,0 ± 0,4c	6,1 ± 0,7	6,2 ± 0,7	9,1 ± 0,4b	66,2 ± 5,4a	4,1 ± 0,3
COMBI	5,9 ± 0,0a	425 ± 67,3a	35,5 ± 3,7	3,7 ± 0,3	1,0 ± 0,1	3,6 ± 0,4c	5,8 ± 0,3	5,9 ± 0,3	9,4 ± 0,3b	61,5 ± 2,1a	4,1 ± 0,1
Organomineral	5,5 ± 0,1b	227 ± 16,4b	31,0 ± 4,5	3,7 ± 0,1	1,0 ± 0,1	3,6 ± 0,1c	5,4 ± 0,2	5,4 ± 0,2	8,9 ± 0,2b	59,2 ± 2,7a	3,9 ± 0,2
Adubação convencional	5,2 ± 0,2c	206,6 ± 29,7b	22,4 ± 7,3	3,5 ± 0,6	0,8 ± 0,1	4,6 ± 0,3b	4,8 ± 0,7	4,9 ± 0,7	9,5 ± 0,4b	50,3 ± 5,2b	4,3 ± 0,1
CV %	3,0	26,1	44,6	22,6	20,9	13,3	17,0	16,7	6,6	11,7	8,8

*Média ± erro padrão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott–Knott ($p < 0,05$). $n = 4$. Valores sem letras indicam ausência de diferença estatística. pH: acidez ativa; P (Mehlich-1); SB – Soma de bases; t – Capacidade efetiva de troca catiônica; T – Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – Índice de saturação por bases; MO – Matéria orgânica. CV: coeficiente de variação.

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 5–Análise química do solo (0-20 cm) na área NKG após a implantação do experimento.

Atributos químicos do solo na área NKG											
Tratamentos	pH	K	P	Ca	Mg	H+Al	SB	t	T	V	MO
	H ₂ O	---mg dm ⁻³ ---		-----cmol _c dm ⁻³ -----				-----%-----			dag kg ⁻¹
Casca de café	5,1 ± 0,0a	138 ± 14a	82,6 ± 21,5	3,0 ± 0,1c	1,5 ± 0,1b	2,9 ± 0,1c	4,9 ± 0,2b	5,0 ± 0,2b	7,8 ± 0,1a	64,5 ± 0,5b	2,6 ± 0,0
Composto orgânico	5,3 ± 0,1a	98,6 ± 13b	72,3 ± 18,4	3,5 ± 0,1b	1,6 ± 0,2b	2,6 ± 0,3c	5,3 ± 0,3b	5,4 ± 0,3b	7,9 ± 0,1a	66,8 ± 3,8b	2,5 ± 0,3
Biochar	5,2 ± 0,1a	138 ± 12a	31,7 ± 10,0	2,4 ± 0,2c	1,3 ± 0,2b	2,7 ± 0,2c	4,1 ± 0,3b	4,2 ± 0,3b	6,8 ± 0,3b	62,9 ± 1,7b	2,1 ± 0,1
Bokashi	5,2 ± 0,1a	78,3 ± 13,4b	76,0 ± 19,0	2,7 ± 0,2c	1,4 ± 0,1b	2,8 ± 0,1c	4,3 ± 0,3b	4,4 ± 0,3b	7,0 ± 0,3b	60,7 ± 2,4b	2,3 ± 0,1
COMBI	5,5 ± 0,1a	103 ± 9b	93,6 ± 38,5	4,1 ± 0,3a	2,3 ± 0,2a	1,8 ± 0, c	6,8 ± 0,5a	6,9 ± 0,5a	8,6 ± 0,6a	77,5 ± 1,1a	2,6 ± 0,4
Organomineral	5,2 ± 0,1a	138 ± 7a	99,1 ± 22,0	2,4 ± 0,3c	1,6 ± 0,1b	2,8 ± 0,2b	4,4 ± 0,2b	4,5 ± 0,2b	7,2 ± 0,4b	61,1 ± 1,0b	2,3 ± 0,1
Adubação convencional	4,8 ± 0,1b	99,1 ± 13,9b	69,5 ± 13,5	2,6 ± 0,2c	1,4 ± 0,1b	3,6 ± 0,2a	4,3 ± 0,3b	4,4 ± 0,3b	7,5 ± 0,3b	52,6 ± 3,3c	2,0 ± 0,0
CV %	3,6	22,1	54,6	14,7	18,9	12,8	13,5	13,3	7,6	6,0	13,0

*Média ± erro padrão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott–Knott ($p < 0,05$). $n = 4$. Valores sem letras indicam ausência de diferença estatística. pH: acidez ativa; P (Mehlich-1); SB – Soma de bases; t – Capacidade efetiva de troca catiônica; T – Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – Índice de saturação por bases; MO – Matéria orgânica; CV: coeficiente de variação.

Fonte: Do autor (2023).

3.4 Efeito dos tratamentos sobre a produtividade do cafeeiro

Devido o tempo exigido para reação dos condicionadores na área, é esperado um efeito entre médio a longo prazo dos tratamentos. Isso ocorre porque condicionadores como o composto orgânico, biochar e COMBI exigem altas taxas de aplicação (10-100 ton ha⁻¹) para resposta no primeiro ano sobre diversas culturas (ANTONANGELO et al., 2021). Assim, é esperado um efeito cumulativo para obtenção de respostas. Parâmetros do solo como MOS e T são severamente afetados pela não adoção de práticas de manejo na fertilidade do solo em longos prazos (SCHJØNNING et al., 1994).

Na área PX houve diferença significativa entre os tratamentos em relação à produtividade, o que não ocorreu para NKG (TABELAS 6 e 7). O tratamento mais produtivo foi biochar e os demais tratamentos não tiveram diferença entre si. Vale ressaltar que a área PX havia sofrido uma poda de renovação no ano 2020, ficando sem produzir no ano 2021 (TABELA 8), sendo assim, o ano agrícola 2021/22 foi o primeiro produtivo após a poda. A cultura do cafeeiro possui tendência de bienalidade de produção, que consiste em um ano com maior e outro com menor produção (RENA & MESTRI, 1985). Ainda que habitual a bienalidade na cultura, a área NKG repetiu um ano de baixa produção (TABELAS 7 e 8). Isso ocorreu porque as lavouras da região tiveram seu potencial produtivo prejudicado no ano anterior, devido problemas enfrentados com escassez hídrica, temperaturas médias elevadas e incidência de geadas (CONAB, 2022b).

O tratamento biochar pode ter apresentado maior produtividade em PX porque proporcionou um pH equilibrado, o maior teor de K, relação Ca:Mg mais próxima de 3:1, T superior e o maior teor médio de P dos tratamentos. Além do efeito condicionador do tratamento biochar, o alto nível de fertilidade e o histórico de manejo também contribuíram para a maior produtividade. É imprescindível se considerar mais de uma safra para avaliação dos condicionadores, além de se levar em consideração o comportamento altamente produtivo do café após sua renovação por poda (THOMAZIELLO, 2013).

Tabela 6: Dados produtivos da área PX.

Tratamentos	PX		
	Produtividade Sacac ha ⁻¹	Renda %	Rendimento L saca ⁻¹
Casca de café	51 ± 2 b	44 ± 1	551 ± 7
Composto orgânico	46 ± 4 b	45 ± 1	565 ± 23
Biochar	62 ± 3 a	45 ± 1	534 ± 14
Bokashi	43 ± 3 b	44 ± 1	559 ± 17
COMBI	36 ± 5 b	45 ± 0	528 ± 25
Organomineral	47 ± 4 b	44 ± 1	550 ± 19
Adubação convencional	37 ± 3 b	43 ± 1	561 ± 19
CV %	14	3	6

*Valor médio ± erro padrão, n=4; médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott–Knott ($p < 0,05$). Valores sem letras indicam ausência de diferença estatística.

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 7: Dados produtivos da área NKG.

Tratamentos	NKG		
	Produtividade Sacac ha ⁻¹	Renda %	Rendimento L saca ⁻¹
Casca de café	4 ± 1	41 ± 1	747 ± 98
Composto orgânico	5 ± 1	42 ± 0	655 ± 135
Biochar	4 ± 0	41 ± 1	639 ± 133
Bokashi	4 ± 0	35 ± 7	879 ± 198
COMBI	5 ± 1	35 ± 7	817 ± 197
Organomineral	5 ± 1	41 ± 2	588 ± 66
Adubação convencional	3 ± 1	41 ± 0	740 ± 166
CV %	35	14	36

*Valor médio ± erro padrão, n=4. Valores sem letras indicam ausência de diferença estatística.

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 8: Histórico de produtividade das áreas experimentais

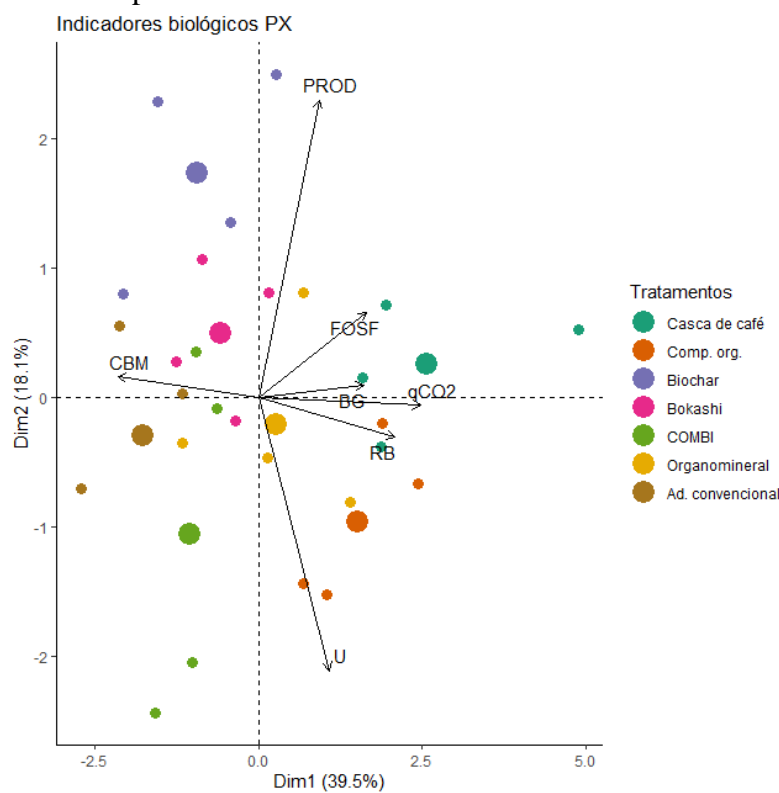
Local	Produtividade por safra (sacas ha ⁻¹)		
	2018/19	2019/20	2020/21
PX	31	8	-
NKG	18	56	10

Fonte: Administração das fazendas.

3.5 Análise de componentes principais (PCA)

A análise de componentes principais realizada para os indicadores biológicos na área PX explicou 57,6 % da variação dos dados; sendo as variáveis PROD e U as que possuíram maior contribuição na explicação da variação dos dados. Também pode ser observado que as variáveis qCO_2 , RB, BG e FOSF foram as que tiveram uma menor explicação da variação dos dados.

Figura 9: Análise de componentes principais (PCA) para indicadores biológicos do solo e produtividade da área PX.



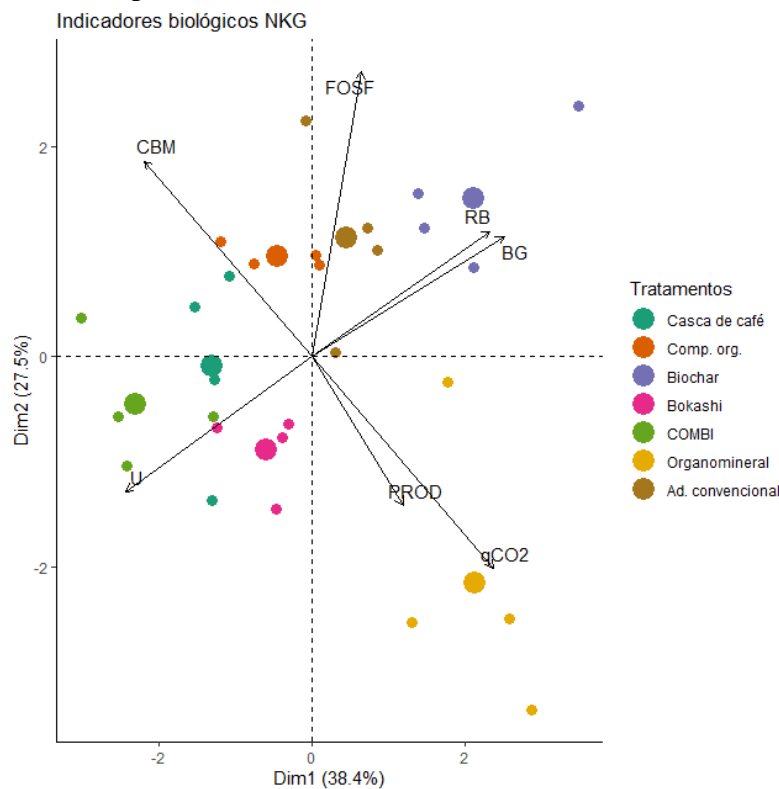
Análise de componentes principais (PCA) da área PX. CBM: Carbono da biomassa microbiana; RB: respiração basal microbiana; qCO_2 : quociente metabólico; BG: β -glucosidase; FOSF: Fosfatase ácida; PROD: Produtividade e U: Urease.

Fonte: Do autor (2023).

As variáveis FOSF, BG, qCO_2 e RB se associaram ao tratamento casca de café. A variável U se associou mais aos tratamentos composto orgânico e organomineral, que tem composição a origem orgânica. Já a variável PROD se associou mais aos tratamentos biochar, bokashi e organomiral. A variável CBM se associou de forma positiva ao tratamento bokashi e de forma negativa ao tratamento adubação convencional, que é o tratamento que menos contribui com a matriz orgânica.

A análise de componentes principais realizada para os indicadores biológicos e produtividade na área NKG explicou 65,9 % da variação dos dados. A maioria das variáveis contribuiu de forma bastante similar na explicação da variação dos dados, exceto por PROD que foi a variável com menor contribuição na explicação.

Figura 10: Análise de componentes principais (PCA) para indicadores biológicos do solo e produtividade da área NKG.



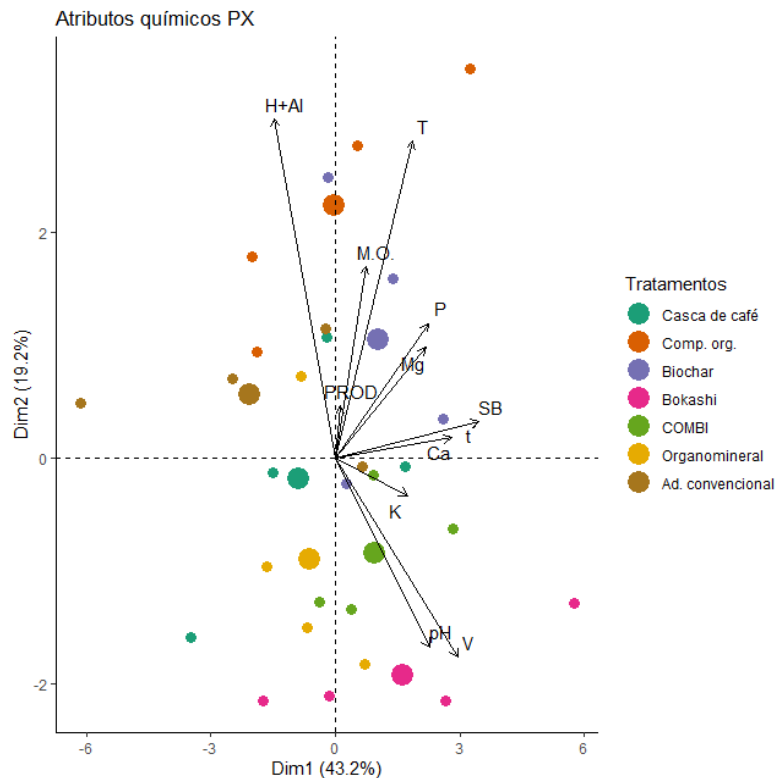
Análise de componentes principais (PCA) da área NKG. CBM: Carbono da biomassa microbiana; RB: respiração basal microbiana; qCO_2 : quociente metabólico; BG: β -glucosidase; FOSF: Fosfatase ácida; PROD: Produtividade e U: Urease.

Fonte: Do autor (2023).

As variáveis qCO_2 e PROD tiveram comportamento similar e se associaram ao tratamento organomineral e ambas tiveram relação inversa com a variável CBM, que se associou aos tratamentos casca de café e composto orgânico. As variáveis RB e BG tiveram comportamento similar e se associaram ao tratamento biochar; ambas tiveram comportamento inverso com a variável U, que se associou mais aos tratamentos COMBI, bokashi e casca de café. Por último, a variável FOSF se associou ao tratamento adubação convencional.

A análise de componentes principais realizada para os atributos químicos do solo e produtividade da área PX explicou 62,4 % da variação dos dados. As variáveis que mais contribuíram foram H+Al, V, pH e T.

Figura 10: Análise de componentes principais (PCA) para atributos químicos do solo e produtividade da área PX

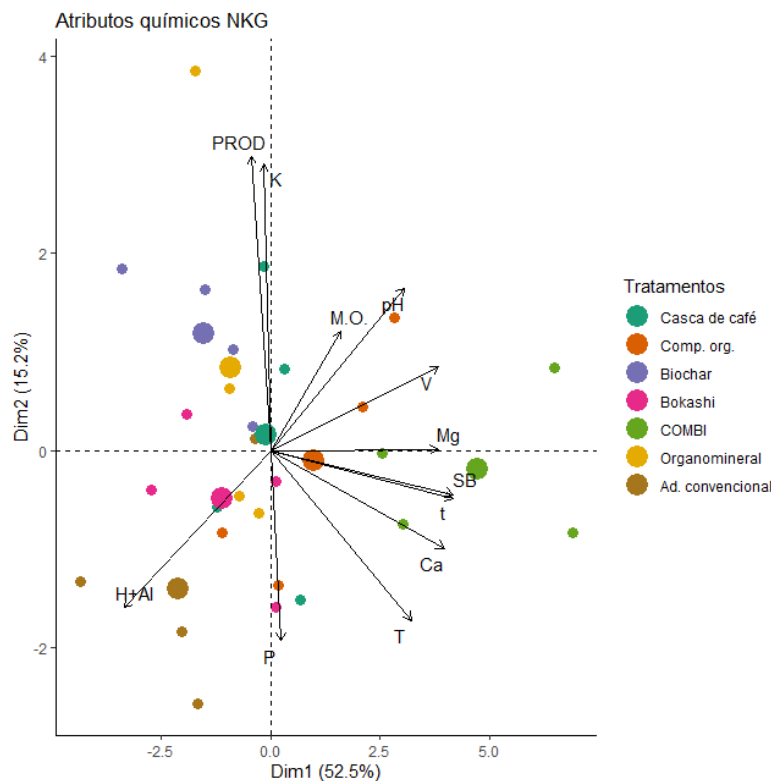


Análise de componentes principais (PCA) da área PX. pH: acidez ativa; SB: Soma de Bases; t: Capacidade de troca catiônica efetiva; T: Capacidade de troca catiônica à pH 7,0; V: Índice de saturação de bases; M.O.: matéria orgânica e PROD: produtividade.
Fonte: Do autor (2023).

As variáveis pH e V possuem comportamento similar e se associaram aos tratamentos bokashi e COMBI; ambas apresentaram comportamento inverso à variável H+Al. Onde a acidez potencial foi mais elevada, houve comportamento inverso com saturação por bases e pH. Já as variáveis T, M.O. e SB se associaram ao tratamento biochar.

A análise de componentes principais realizada para os atributos químicos do solo e produtividade da área NKG explicou 67,7 % da variação dos dados. As variáveis que mais contribuíram foram H+Al, PROD e K. As demais variáveis contribuíram de forma similar na explicação da variação.

Figura 11: Análise de componentes principais (PCA) para atributos químicos do solo e produtividade da área NKG.



Análise de componentes principais (PCA) da área NKG. pH: acidez ativa; SB: Soma de Bases; t: Capacidade de troca catiônica efetiva; T: Capacidade de troca catiônica à pH 7,0; V: Índice de saturação de bases; M.O.: matéria orgânica e PROD: produtividade.

Fonte: Do autor (2023).

A variável H+Al se associou ao tratamento adubação convencional e teve relação inversa com as variáveis M.O. e pH. As variáveis SB, t, Ca e Mg se associaram ao tratamento COMBI. PROD e K tiveram relação inversa com a variável P.

4. CONCLUSÃO

Os condicionadores de solo composto, biochar ou COMBI possuem potencial dentro de diferentes sistemas produtivos e apresentaram o melhor efeito condicionador sobre a cultura do cafeeiro nos dois locais avaliados. Houve efeitos evidentes de atuação nos nutrientes K, Ca e Mg, além de importantes componentes da fertilidade do solo para a produtividade como pH, SB, T, t e V.

A matéria orgânica é um forte componente na área PX. O melhor teor de MOS da área fez com que haja maior associação à produtividade e atividade dos indicadores biológicos, que foi evidenciada pela PCA.

O tratamento biochar foi o que propiciou maior produtividade na área PX. Isso demonstrou a alta fertilidade local devido o manejo já adotado. O estudo deve ser avaliado por mais tempo para resultados mais consolidados e pode servir futuramente de base para elaboração de tabelas de recomendação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida ao autor, pelo financiamento e suporte dado pela empresa Melitta® e pela Associação Hanns R. Stiftung do Brasil. Agradecemos também a todo corpo técnico do Departamento de Ciência do Solo da UFLA, Dr.^a Silvia Maria de Oliveira Longatti e à Prof.^a Dr.^a Fatima Maria de Souza Moreira.

6. REFERÊNCIAS

- ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. Academic Press, 1995.
- ALMEIDA, R. F. et al.. Soil quality: Enzymatic activity of soil β -glucosidase. **Global Journal of Agricultural Research and Reviews**, v. 3, n. 2, p. 146-150, 2015.
- ALVAREZ, R. et al. Soil organic carbon, microbial biomass and CO₂-C production from three tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 33, n. 1, p. 17-28, 1995.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, and KH. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil biology and biochemistry**, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.
- ANTONANGELO, J. A.; SUN, X.; ZHANG, H. The roles of co-composted biochar (COMBI) in improving soil quality, crop productivity, and toxic metal amelioration. **Journal of Environmental Management**, v. 277, p. 111443, 2021.
- ARAGÃO, O. O. S. et al. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, v. 113, p. 106205, 2020.
- BALOTA, E. L. et al. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 641-649, 1998.
- BREMNER, J. M.; MULVANEY, C. S. Nitrogen—Total. p. 595–624. AL Page et al.(ed.) **Methods of soil analysis. Part 2. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. Nitrogen—Total. p. 595–624. In AL Page et al.(ed.) Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI., p. -, 1982.**
- BROOKES, P. C. et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil biology and biochemistry**, v. 17, n. 6, p. 837-842, 1985.
- CAMPOS-VEGA, R. et al. Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. **Trends in Food Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 24-36, 2015.
- CARMO, D. L.; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1211-1220, 2012.
- CARNEIRO, J. S. S. et al. Long-term effect of biochar-based fertilizers application in tropical soil: agronomic efficiency and phosphorus availability. **Science of the Total Environment**, v. 760, p. 143955, 2021.
- CHEN, T. et al. Adoption of solid organic waste composting products: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, p. 122712, 2020.
- CHENG, C. H. et al. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. **Organic geochemistry**, v. 37, n. 11, p. 1477-1488, 2006.

CHENG, C. H. et al. Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 113, n. G2, 2008.

CHENG, C. H.; LEHMANN, J. Ageing of black carbon along a temperature gradient. **Chemosphere**, v. 75, n. 8, p. 1021-1027, 2009.

CLAYTON, J., LEMANSKI, K. and BONKOWSKI, M.. Shifts in soil microbial stoichiometry and metabolic quotient provide evidence for a critical tipping point at 1% soil organic carbon in an agricultural post-mining chronosequence. **Biology and Fertility of Soils**, 57, pp.435-446, 2021.

Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). Acompanhamento da Safra Brasileira de Café –Safra 2022, 1º Levantamento, 2022b. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe?limitstart=0>. Acesso em: 20 de março de 2023.

COOPER, J. et al. Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under field conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 295, p. 106882, 2020.

CORNELISSEN, G. et al. Emissions and char quality of flame-curtain" Kon Tiki" Kilns for Farmer-Scale charcoal/biochar production. **PloS one**, v. 11, n. 5, p. e0154617, 2016.

CRECCHIO, C. et al. Effects of municipal solid waste compost amendments on soil enzyme activities and bacterial genetic diversity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 10, p. 1595-1605, 2004.

DAI, Z. et al. Association of biochar properties with changes in soil bacterial, fungal and fauna communities and nutrient cycling processes. **Biochar**, v. 3, p. 239-254, 2021.

DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. **Methods for assessing soil quality**, v. 49, p. 247-271, 1997.

DZUNG, Nguyen Anh; DZUNG, Tran Trung; KHANH, Vo Thi Phuong. Evaluation of coffee husk compost for improving soil fertility and sustainable coffee production in rural central highland of Vietnam. **Resources and Environment**, v. 3, n. 4, p. 77-82, 2013.

ECHEVERRIA, M. C.; NUTI, M. Valorisation of the residues of coffee agro-industry: perspectives and limitations. **The Open Waste Management Journal**, v. 10, n. 1, 2017.

ENDERS, A.; LEHMANN, J. Comparison of Wet-Digestion and Dry-Ashing Methods for Total Elemental Analysis of Biochar. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 43, n. 7, p. 1042–1052, 2012.

FAN, L. et al. Cultivation of Pleurotus mushrooms on Brazilian coffee husk and effects of caffeine and tannic acid. **Micologia Aplicada International**, v. 15, n. 1, p. 15-21, 2003.

FISCHER, D.; GLASER, B. Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. **Management of organic waste**, v. 1, p. 167-198, 2012.

GAN, W. J. et al. Effects and mechanisms of straw biochar on remediation contaminated soil in electroplating factory. **Journal of Ecology and Rural Environment**, v. 28, n. 3, p. 305-309, 2012.

GUL, S., Whalen, J.K., Thomas, B.W., Sachdeva, V. and Deng, H. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 206, pp.46-59, 2015.

HANG, E. H. et al. Effect of different application rates of organic fertilizer on soil enzyme activity and microbial population. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 53, n. 2, p. 132-140, 2007.

HOSEINI, M. et al. Coffee by-products derived resources. A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 148, p. 106009, 2021.

HUANG D. et al. The effects of rice straw biochar on indigenous microbial community and enzymes activity in heavy metal-contaminated sediment. **Chemosphere**, 174: 545-553, 2017.

HUESO, S., GARCÍA, C. and HERNÁNDEZ, T., Severe drought conditions modify the microbial community structure, size and activity in amended and unamended soils. **Soil Biology and Biochemistry**, 50, pp.167-173, 2012.

IJANU, E. M.; KAMARUDDIN, M. A.; NORASHIDDIN, F. A. Coffee processing wastewater treatment: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. **Applied Water Science**, v. 10, p. 1-11, 2020.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of soils**, v. 27, p. 408-416, 1998.

KAISER, C. et al. Microbial community dynamics alleviate stoichiometric constraints during litter decay. **Ecology letters**, 17(6), pp.680-690, 2014.

KOPEĆ, M. et al. FERTILIZER VALUE OF COMPOSTS OBTAINED WITH ADDITION OF COFFEE GROUNDS AND CORN. **TOXIC SUBSTANCES IN THE ENVIRONMENT TOXSE 2017**, p. 71, 2017.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.

LEHMANN, J. A handful of carbon. **Nature**, v. 447, n. 7141, p. 143-144, 2007.

LEHMANN, J. et al. Biochar effects on soil biota—a review. **Soil biology and biochemistry**, v. 43, n. 9, p. 1812-1836, 2011.

LIMA, J. R. S. et al. Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment. **Geoderma**, v. 319, p. 14-23, 2018.

LIU, J. et al. Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, n. 5, p. 698-707, 2012.

LIU, S. et al. Rice husk biochar impacts soil phosphorous availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types. **Applied Soil Ecology**, v. 116, p. 12-22, 2017.

LUTTENBERGER, L. R. Waste management challenges in transition to circular economy—case of Croatia. **Journal of Cleaner production**, v. 256, p. 120495, 2020.

- MAJOR, J. et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. **Plant and soil**, v. 333, p. 117-128, 2010.
- MALAVOLTA, E. 1993. Nutrição mineral e adubação do cafeeiro: colheitas econômicas máximas. São Paulo: **Editora Agronômica Ceres**, 210p.
- MALAVOLTA, E. et al. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. rev. e atual. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MANYÀ, J. J. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. **Environmental science & technology**, v. 46, n. 15, p. 7939-7954, 2012.
- MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. (2020). Sumário Executivo do Café. Disponível em: http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/informe_estatistico/Sumario_Cafe_Dezembro_2020.pdf. Acesso em: 6 de jun. de 2021.
- MARTINEZ, C. L. M. et al. Characterization of residual biomasses from the coffee production chain and assessment the potential for energy purposes. **Biomass and Bioenergy**, v. 120, p. 68-76, 2019.
- MARTINS FILHO, A. P. et al. Impact of coffee biochar on carbon, microbial biomass and enzyme activities of a sandy soil cultivated with bean. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, 2021.
- MATIELLO, J. B. et al. Cultura de café no Brasil: manual de recomendações. **Varginha: Fundação Procafé**, 2010.
- MAYSON, S.; WILLIAMS, I. D. Applying a circular economy approach to valorize spent coffee grounds. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 172, p. 105659, 2021.
- MEYER, A. H. et al. F. Variation in urease and β -glucosidase activities with soil depth and root density in a 'Cripp's Pink'/M7 apple orchard under conventional and organic management. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 32, n. 4, p. 227-234, 2015.
- NDIAYE, E. L. et al. Integrative biological indicators for detecting change in soil quality. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 15, n. 1, p. 26-36, 2000.
- PEÑA, M. L. P. et al. Respiração microbiana como indicador da qualidade do solo em ecossistema florestal. **Floresta**, v. 35, n. 1, 2005.
- PIETIKÄINEN, J.; KIIKKILÄ, O.; FRITZE, H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. **Oikos**, v. 89, n. 2, p. 231-242, 2000.
- PROST, K. et al. Biochar affected by composting with farmyard manure. **Journal of environmental quality**, v. 42, n. 1, p. 164-172, 2013.
- 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**, v. 48, p. 271-284, 2012.
- RENA, A. B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**, p. 1-87, 1986.

- REYES-HERRERA, Daniel F. et al. Physiological responses of coffee (*Coffea arabica* L.) plants to biochar application under water deficit conditions. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 51, n. 3, p. 12873-12873, 2023.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª Aproximação. Viçosa: UFV, 1999. p. 289-302.
- ROBA, T. B. et al. Review on: The effect of mixing organic and inorganic fertilizer on productivity and soil fertility. **Open Access Library Journal**, v. 5, n. 06, p. 1, 2018.
- ROSCOE, R. et al. Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares. 2006.
- SCHJØNNING, P.; CHRISTENSEN, B. T.; CARSTENSEN, B. Physical and chemical properties of a sandy loam receiving animal manure, mineral fertilizer or no fertilizer for 90 years. **European Journal of Soil Science**, v. 45, n. 3, p. 257-268, 1994.
- SHERENE, T. Role of soil enzymes in nutrient transformation: A review. **Bio Bull**, v. 3, n. 1, p. 109-131, 2017.
- STEINER, C. et al. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. **Journal of environmental quality**, v. 39, n. 4, p. 1236-1242, 2010.
- TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Assay of urease activity in soils. **Soil biology and Biochemistry**, v. 4, n. 4, p. 479-487, 1972.
- TAN, Z. et al. Returning biochar to fields: A review. **Applied Soil Ecology**, v. 116, p. 1-11, 2017.
- TEIXEIRA, P. C. et al. Manual de métodos de análise de solo. EMBRAPA, 2017.
- THOMAZIELLO, R. A. Uso da poda no cafeeiro: por que, quando e tipos utilizados. **Visão agrícola**, v. 1, p. 1-4, 2013.
- TUOMELA, M. et al. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. **Bioresource technology**, v. 72, n. 2, p. 169-183, 2000.
- VAN KEULEN, M.; KIRCHHERR, J. The implementation of the Circular Economy: Barriers and enablers in the coffee value chain. **Journal of cleaner production**, v. 281, p. 125033, 2021.
- VAN ZWIETEN, L. et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and soil**, v. 327, p. 235-246, 2010.
- VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703-707, 1987.
- VELASCO-MUÑOZ, J. F. et al. Circular economy implementation in the agricultural sector: Definition, strategies and indicators. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 170, p. 105618, 2021.

WU, X. et al. Land use change and stand age regulate soil respiration by influencing soil substrate supply and microbial community. **Geoderma**, 359, p.113991, 2020.

XU, X., et al. Global pattern and controls of soil microbial metabolic quotient. **Ecological Monographs**, 87(3), pp.429-441, 2017.

YOU, S. et al. A critical review on sustainable biochar system through gasification: Energy and environmental applications. **Bioresource technology**, v. 246, p. 242-253, 2017.

ZHANG, S. et al. Industrial-scale food waste composting: Effects of aeration frequencies on oxygen consumption, enzymatic activities and bacterial community succession. **Bioresource Technology**, v. 320, p. 124357, 2021.

ZIMMERMAN, A. R. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). **Environmental science & technology**, v. 44, n. 4, p. 1295-1301, 2010.

7. MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela S1: Indicadores biológicos da área PX

Tratamentos	PX					
	RBM	CBM	qCO_2	β -glucosidase	Fosfatase	Urease
Casca de café	490 ± 17a	71,2 ± 14,5b	5,9 ± 0,7a	30,7 ± 2,0a	1274 ± 48,6	36,2 ± 0,9b
Composto orgânico	527 ± 22,6a	113 ± 10,1b	4,7 ± 0,3b	28,4 ± 1,4a	1213 ± 115,1	43,6 ± 3,1a
Biochar	419 ± 33,9b	159 ± 14,5a	2,7 ± 0,3c	25,8 ± 0,7a	1094 ± 61,4	28,6 ± 0,5c
Bokashi	407 ± 14,5b	114 ± 6,0b	3,6 ± 0,3c	27,3 ± 2,5a	1077 ± 50,4	28,2 ± 1,9c
COMBI	428 ± 18,8b	170 ± 5,5a	2,6 ± 0,0c	28,3 ± 1,0a	1046 ± 40,3	38,7 ± 3,2b
Organomineral	513 ± 22,6a	147 ± 13,9a	3,1 ± 0,2c	29,1 ± 1,2a	1082 ± 54,5	36,6 ± 2,1b
Adubação convencional	350 ± 7,7b	152 ± 17,1a	2,4 ± 0,4c	20,3 ± 1,4b	1186 ± 47,2	34,6 ± 1,6b
CV %	8,7	19,3	16,5	10,7	10,4	9,2

Valor médio ± desvio padrão; médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott–Knott ($p < 0,05$). Valores sem letras indicam ausência de diferença estatística. n = 4. RBM: respiração basal microbiana; CBM: carbono da biomassa microbiana; qCO_2 : quociente metabólico. CV: coeficiente de variação médio.
Fonte: Do autor (2023).

Tabela S2: Indicadores biológicos da área NKG

Tratamentos	NKG					
	RBM	CBM	qCO_2	β -glucosidase	Fosfatase	Urease
Casca de café	154 ± 7,6c	228 ± 19,4b	0,6 ± 0,0b	13,2 ± 0,5b	1296 ± 11,9a	65,3 ± 2,5b
Composto orgânico	208 ± 4,3b	329 ± 15,8a	0,6 ± 0,0b	16,4 ± 1,3a	1188 ± 32,3a	58,3 ± 1,8b
Biochar	266 ± 19,1a	212 ± 20,5b	1,3 ± 0,1b	20,3 ± 2,1a	1274 ± 48,8a	45,7 ± 2,2c
Bokashi	207 ± 8,0b	184 ± 8,5b	1,1 ± 0,0b	12,6 ± 0,7b	1061 ± 52,7b	64,1 ± 2,1b
COMBI	167 ± 6,0c	313 ± 18,6a	0,5 ± 0,0b	13,8 ± 0,7b	1071 ± 34,2b	85,2 ± 2,5a
Organomineral	207 ± 3,0b	76 ± 16,3c	3,0 ± 0,5a	18,6 ± 0,6a	1032 ± 45,5b	59,8 ± 4,9b
Adubação convencional	197 ± 15,3b	194 ± 24,3b	1,1 ± 0,1b	17,1 ± 1,1a	1292 ± 21,3a	56,1 ± 2,5b
CV %	8,8	19,3	14,3	12,2	6,3	8,7

Valor médio ± desvio padrão; médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott–Knott ($p < 0,05$). Valores sem letras indicam ausência de diferença estatística. n = 4. RBM: respiração basal microbiana; CBM: carbono da biomassa microbiana; qCO_2 : quociente metabólico. CV: coeficiente de variação médio.
Fonte: Do autor (2023).