

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CARBONO E NITROGÊNIO PARTICULADOS EM SOLO
CULTIVADO COM CAFEEIRO CONSORCIADO COM PLANTAS
DE COBERTURA**

Laura Oliveira Aguiar

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Mara Cristina Pessôa da Cruz

Coorientador: Vinícius Augusto Filla

**Jaboticabal
2º Semestre/2022**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CARBONO E NITROGÊNIO PARTICULADOS EM SOLO
CULTIVADO COM CAFEEIRO CONSORCIADO COM PLANTAS
DE COBERTURA**

Laura Oliveira Aguiar

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Mara Cristina Pessôa da Cruz

Coorientador: Vinícius Augusto Filla

Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP,
Campus de Jaboticabal, para graduação
em ENGENHARIA AGRÔNOMICA.

**Jaboticabal
2º Semestre/2022**

A282c

Aguiar, Laura Oliveira

Carbono e nitrogênio particulados em solo cultivado com cafeeiro consorciado com plantas de cobertura / Laura Oliveira Aguiar. -- Jaboticabal, 2022

57 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientadora: Mara Cristina Pessôa da Cruz

Coorientador: Vinícius Augusto Filla

1. Coffea arabica L.. 2. Fertilidade do solo. 3. Carbono orgânico. 4. Nitrogênio orgânico. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL

DEPARTAMENTO: Ciências da Produção Agrícola

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO
TRABALHO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

TÍTULO: Carbono e nitrogênio particulados em solo cultivado com cafeeiro consorciado com plantas de cobertura

ACADÊMICO: Laura Oliveira Aguiar

CURSO: Engenharia Agrônômica

ORIENTADOR (ES): Profa. Dra. Mara Cristina Pessoa da Cruz

COORIENTADOR (ES): Me. Vinícius Augusto Filla

Aprovado e corrigido de acordo com as sugestões da Banca Examinadora

BANCA EXAMINADORA:

	(Nomes)	(Assinaturas)
Presidente	Profa. Dra. Mara Cristina Pessoa da Cruz	
Membro	Dra. Gelza Carliane Marques Teixeira	
Membro	Dra. Cássia Rita Adame	

Jaboticabal 28 / 11 / 2022

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 16 / 12 / 2022 "ad referendum"

Chefe do Departamento

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me apoiaram e se fizeram presentes, e a todos os professores, pelos conhecimentos passados ao longo dos anos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me conceder a vida, pelos caminhos guiados e por permitir viver essa experiência.

Aos meus pais, Ercio Aparecido de Aguiar e Maria das Graças de Oliveira Aguiar, por sempre me apoiarem e proporcionarem boa educação e discernimento; sem vocês eu não estaria onde estou hoje. Obrigada por tanto amor.

À minha irmã, Anna Barbara Aguiar, por sempre se fazer presente e disponível em ajudar e ser minha eterna companheira de vida. Obrigada por ser minha estrela guia.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Mara Cristina Pessôa da Cruz, por tanta paciência, paixão pela fertilidade do solo, carinho, comprometimento e por sempre estar disponível para ajudar. Professora, você me ensinou muito além da sala de aula e laboratório, e contribuiu fortemente para a minha formação pessoal e profissional, obrigada por tanta dedicação.

Ao meu coorientador, Vinícius Augusto Filla, pela paciência e comprometimento, sempre me ajudando a cumprir os prazos e a executar corretamente o projeto. A você, o meu muito obrigada.

Ao Luiz Gustavo Rosa Campos, meu companheiro em todos os momentos, sempre disponível em ajudar e que teve participação efetiva em todas as etapas do projeto; seu apoio e amor sempre foram essenciais, obrigada por tanto.

À Amanda Manduca Rosa da Silva, por toda amizade, paciência e conhecimentos passados, pela ajuda na elaboração dos melhores métodos de análises e execução. Levarei eternamente comigo a sua bondade.

Aos meus amigos Fabrícia, Wagner, Carla, Luan e Ana, por todo o companheirismo em todos esses anos de graduação; nossa amizade foi além das salas de aula, nos tornamos uma família forte e unida. Não tenho palavras para agradecer o

apoio de vocês em todos os anos de graduação, além da ajuda na execução do presente trabalho.

À todas as moradoras e ex-moradoras da República ÉssaKana, minha família em Jaboticabal. Obrigada por estarem comigo desde o primeiro dia em Jaboticabal e por todo o apoio prestado, além dos ensinamentos de vida e companheirismo.

À Mêrces Borges Sousa, por ser uma grande mãe, por proporcionar carinho e afeto, sempre ajudando e sendo presente em minha vida.

Aos meus companheiros de laboratório, agradeço a grande amizade, ajuda e companhia durante todos os dias.

A todos os professores que já passaram pela minha vida acadêmica, em especial ao corpo docente da FCAV, que contribuíram fortemente para a minha formação na profissão que escolhi.

A todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação e execução deste trabalho, deixo aqui o meu muito obrigada.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de iniciação científica (processo de número 2021/10781-6) durante a execução do projeto.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vi
SUMMARY.....	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Cultura do café e o uso de plantas de cobertura para o manejo sustentável	4
2.2 Carbono particulado	8
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1 Caracterização da área experimental	12
3.2 Delineamento experimental	13
3.3 Preparo da área e implantação do experimento	14
3.4 Avaliação dos atributos químicos do solo	15
3.5 Avaliação dos atributos agrônômicos.....	19
3.6 Forma de análise dos resultados	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 Acidez do solo, nutrientes disponíveis, CTC e V%	25
4.2 Carbono e nitrogênio.....	31
4.2.1 Carbono e nitrogênio total.....	31
4.2.2 Carbono e nitrogênio orgânico particulados.....	33
4.2.3 Carbono e nitrogênio associados aos minerais	37
4.2.4 Índice de manejo do carbono	38
4.3 Teores dos macronutrientes nas folhas do cafeeiro.....	40
5. CONCLUSÕES	42
6. LITERATURA CITADA.....	43

RESUMO

CARBONO E NITROGÊNIO PARTICULADOS EM SOLO CULTIVADO COM CAFEIEIRO CONSORCIADO COM PLANTAS DE COBERTURA

O consórcio de culturas comerciais com plantas de cobertura é uma das alternativas para aumentar a sustentabilidade dos sistemas de produção, o que está diretamente vinculado à melhoria dos atributos químicos do solo. O objetivo com este trabalho foi avaliar o efeito do consórcio do café arábica com plantas de cobertura nas formas particuladas de C e N do solo e estabelecer relações com o estado nutricional das plantas de café. O experimento foi instalado em Monte Santo de Minas – MG, na safra de 2021/2022. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições. As parcelas foram compostas por seis sistemas de cultivo: Café solteiro, sem consórcio; café consorciado com vegetação espontânea; café consorciado com braquiária (*Urochloa ruziziensis*); café consorciado com milheto (*Pennisetum americanum*); café consorciado com crotalaria-espectábilis (*Crotalaria spectabilis*); e café consorciado com feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*). A semeadura das plantas de cobertura foi realizada em novembro de 2021 e a dessecação em janeiro de 2022. Antes da dessecação, foi feita coleta de amostras de plantas para avaliação da massa de parte aérea e para determinação da composição químico-bromatológica. As amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m, antes da semeadura das plantas de cobertura e 60 dias após a dessecação, e nelas foram avaliados os atributos pH e acidez total, macronutrientes disponíveis (exceto N) e carbono e nitrogênio particulados (grosso, fino e associado aos minerais). A segunda coleta de solo foi coincidente com a coleta de amostras de folhas do cafeeiro para determinação dos teores de macronutrientes. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). O cultivo das plantas de cobertura em consórcio com o cafeeiro não resultou em aumento nos teores de C e N totais do solo e suas frações particuladas. Apesar disso, com base no cálculo do índice de manejo do carbono (IMC), foi possível identificar maior ganho de qualidade do solo, em curto prazo, com cultivo de feijão-de-porco e milheto. Mesmo com o ganho de qualidade do solo, os efeitos das plantas de cobertura nos teores de macronutrientes nas folhas do cafeeiro foram pequenos, provavelmente devido ao curto período de tempo transcorrido entre o cultivo das plantas e a amostragem das folhas, além de ter sido avaliado o efeito de apenas um ciclo de cultivo das plantas de cobertura, demonstrando a necessidade de estudos de longa duração para indicar as espécies que, além de beneficiar o solo, favoreçam a nutrição da cultura do cafeeiro.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L., fertilidade do solo, carbono orgânico, nitrogênio orgânico.

SUMMARY

PARTICULATE CARBON AND NITROGEN IN SOIL CULTIVATED WITH COFFEE CONSORTIUM WITH COVER CROPS

The consortium of commercial crops with cover crops is an alternative to increase the sustainability of production systems, which is directly linked with the gain quality of soil chemical attributes. The objective with this work was to evaluate the effect of intercropping arabica coffee with cover crops on the particulate forms of C and N in the soil and to establish relationships with the nutritional status of coffee plants. The experiment was installed in Monte Santo de Minas - MG, in the 2021/2022 harvest. The experimental design was in randomized blocks, with four replications. The treatments were composed of six cultivation systems: Fallow land – single coffee not intercropped; coffee intercropped with spontaneous vegetation; coffee intercropped with brachiaria (*Urochloa ruziziensis*); coffee intercropped with millet (*Pennisetum americanum*); coffee intercropped with sunn hemp (*Crotalaria spectabilis*); and coffee intercropped with jack bean (*Canavalia ensiformis*). Sowing of cover crops was carried out in November 2021 and desiccation in January 2022. Before desiccation, plant samples were collected to evaluate shoot mass and to determine the chemical-bromatological composition. Soil samples were collected at depths of 0.00-0.05 m and 0.05-0.10 m, before seeding and 60 days after desiccation, and the attributes pH and total acidity, available macronutrients (except N) and particulate carbon and nitrogen (coarse, fine and associate to minerals) were evaluated. The second soil collection coincided with the collection of coffee tree leaf samples to determine macronutrient levels. The data were submitted to analysis of variance using the F test and, when significant, the means were compared using the Tukey test ($p < 0.05$). The cultivation of cover crops in intercropping with coffee did not result in an increase in the total C and N contents of the soil and its particulate fractions. Nevertheless, based on the calculation of the carbon management index (CMI), it was possible to identify greater gain in soil quality, in the short term, with the cultivation of jack bean and millet. Even with the gain in soil quality, the effects of cover crops on macronutrient levels in coffee leaves were small, probably due to the short period of time that elapsed between plant cultivation and leaf sampling, in addition to having been evaluated the effect of only one cultivation cycle of cover crops, demonstrating the need for long-term studies to indicate the species that, in addition to benefiting the soil, favor the nutrition of the coffee crop.

Keywords: *Coffea arabica* L., soil fertility, organic carbon, organic nitrogen.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o principal produtor de café arábica (*Coffea arabica* L.) do mundo, abrangendo cerca de 1,8 milhões de hectares. O estado brasileiro que concentra a maior produção da cultura é Minas Gerais, com área de produção de 1,3 milhões de hectares (CONAB, 2021). A cafeicultura tem grande importância social, uma vez que emprega muita mão de obra, especialmente durante a colheita (BLISKA et al., 2009).

Na instalação da lavoura de café há um intenso preparo do solo, que favorece a degradação, especialmente dos arenosos. Por se tratar de uma cultura perene, ao longo dos anos de cultivo não são feitos novos revolvimentos no solo para incorporação de nutrientes e melhora do ambiente radicular. Em lavouras de cultivo convencional, em que não é feita a utilização de plantas de cobertura para proteger o solo contra erosão, a degradação se intensifica

rapidamente, associada a perda de nutrientes e matéria orgânica (THOMAZINI et al., 2013). Dessa forma, é importante que no decorrer dos anos de cultivo sejam tomadas medidas que visem a melhoria do ambiente do solo, com o fornecimento de substratos para formação de matéria orgânica e aumento dos estoques de carbono orgânico, e que contribuam com a reposição de nutrientes.

As plantas de cobertura influenciam diretamente os teores de carbono orgânico total (COT) do solo, devido ao aumento da produção de biomassa da parte aérea e raízes, e as taxas de acúmulo podem mudar de acordo com a qualidade do material depositado e com o tipo de solo. O benefício para a cultura principal em resposta ao cultivo das plantas de cobertura é observado em curto prazo, porque a atividade microbiana e a reciclagem dos nutrientes se alteram muito mais rapidamente do que os estoques de carbono do solo. Por isso, embora a medida dos estoques de carbono seja muito consistente para indicar o acerto na estratégia de manejo adotada, nas últimas décadas foram propostas medidas associadas com alterações de curto prazo, que permitem recomendar a prática de manejo mais vantajosa em menor tempo. Entre as medidas de efeitos em curto prazo, o carbono particulado é uma das mais usadas porque apresenta variabilidade baixa e sensibilidade muito boa.

O carbono particulado é uma fração microbiologicamente ativa da matéria orgânica do solo, em grande parte constituída por pequenas partículas de tecidos vegetais parcialmente decompostos (BRADY; WEIL, 2013).

No Brasil, não há estudos que associem cultivo de plantas de cobertura, carbono particulado do solo e sustentabilidade dos sistemas de produção de café. Deste modo, parte-se da hipótese que o cultivo de plantas de cobertura nas

entrelinhas do cafeeiro confere maior sustentabilidade ao sistema de produção, devido ao ganho de qualidade química do solo, e que este ganho é representado eficientemente pela variação do carbono orgânico particulado.

Diante do exposto, o objetivo com este trabalho foi avaliar o efeito do consórcio do café arábica com plantas de cobertura nas formas particuladas de C e N do solo e estabelecer relações com o estado nutricional das plantas de café.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do café e o uso de plantas de cobertura para o manejo sustentável

A cafeicultura é um setor de grande importância na economia do Brasil. Durante o ano de 2021, em decorrência da bienalidade da cultura e das condições climáticas, a cultura sofreu grande diminuição na produção, o que gerou, aliado ao aumento do dólar, aumento expressivo no valor do produto. A exportação de café pelo Brasil, no período de janeiro a agosto de 2022, foi de cerca de 25,7 milhões de sacas, 9,7% a menos em relação ao mesmo período do ano de 2021 (CONAB, 2022).

A perspectiva da produção no ano de 2022 é de 55,7 milhões de sacas de 60 kg, demonstrando alta em relação ao ano anterior. Essa tendência de aumento na produção estimula a venda para o mercado externo, mantendo os preços ainda assim um pouco mais elevados, mesmo que com tendência de baixa (CONAB, 2022).

Para que a produção brasileira atenda a alta demanda dos mercados interno e externo é necessário que a cultura do cafeeiro atinja seu máximo potencial produtivo, o que está diretamente relacionado à fertilidade do solo e à nutrição das plantas. O cultivo de plantas de cobertura nas entrelinhas do cafeeiro, particularmente gramíneas e leguminosas, está entre as estratégias de manejo mais indicadas para aumentar, de forma sustentável, a fertilidade do solo e, assim, melhorar a nutrição das plantas.

As plantas de cobertura atuam na cobertura e proteção do solo contra processos erosivos e de lixiviação de nutrientes, além de serem muito eficazes no controle de plantas daninhas. A utilização dessas plantas contribui na melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, proporcionando ganho na matéria orgânica do solo (LAMAS, 2017). As leguminosas têm como principal vantagem a realização da fixação biológica de nitrogênio (FBN), tornando-o assim disponível para as plantas. As gramíneas, por outro lado, têm como principal característica a melhor proteção do solo (PERIN et al., 2004).

O nitrogênio é o nutriente mais exigido pelo cafeeiro (GONÇALVES et al., 2019), tanto para o crescimento vegetativo, quanto para o enchimento dos grãos. O fornecimento de N deve suprir a demanda da planta e pode ser feito por meio de adubos químicos, mas as leguminosas de cobertura podem fixar N_2 em quantidades que atendem parte da demanda das plantas. Vale lembrar que além do N, a utilização de plantas de cobertura também auxilia na reposição de outros nutrientes na superfície do solo como P, Ca, K e Mg (TORRES et al., 2005), além de favorecer o aumento do teor de matéria orgânica.

Chaves et al. (2013) verificaram que a entrada de carbono proporcionada pelo cultivo de mucuna-anã favoreceu o incremento de matéria orgânica no solo. Dentre os macronutrientes, a ordem dos que estão em maior abundância na biomassa dessa leguminosa foram nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo e magnésio, apresentando 29,6 – 25,6 – 11,7 – 4,3 – 2,2 g kg⁻¹, respectivamente.

Torres et al. (2005), em experimento com plantas de cobertura, utilizaram milheto-pérola (*Pennisetum americanum* sin. *tiphoides*), braquiária (*Urochloa brizantha*), sorgo-forrageiro (*Sorghum bicolor* L. Moench), guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), crotalária-juncea (*Crotalaria juncea*) e aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb), e verificaram que as gramíneas produziram mais matéria seca, enquanto o guandu foi o que menos produziu. Para o N acumulado, dentre as gramíneas, o milheto e a braquiária apresentaram melhores resultados, e as leguminosas foram as que apresentaram menores valores para a relação C/N, devido à FBN.

Alves (2022), em seu estudo utilizando amendoim forrageiro (*Arachis pintoii*), braquiária (*Urochloa ruziziensis*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e mucuna-anã (*Mucuna deeringiana*), afirmou que nos dois anos de cultivo (2018 e 2019) as plantas apresentaram diferenças nos teores de N, Ca, K, Mg e P, sendo que o K foi o nutriente de liberação mais rápida a partir da decomposição das plantas. Ele afirmou que a braquiária apresentou rápida decomposição, porém baixos teores de N e K quando comparada aos outros adubos verdes, mas é uma alternativa eficaz de manter o solo coberto e favorecer a ciclagem de nutrientes, enquanto o feijão-de-porco apresentou os maiores teores de N, Ca, P e K, reforçando seu potencial em reciclar nutrientes.

Coelho (2022), em seu experimento com braquiária ruzizienses (*Urochloa ruziziensis*), capim-mombaça (*Panicum Maximum* cv. *Mombaça*), capim-marandu (*Urochloa brizantha* cv. *Marandu*) e plantas espontâneas observou que as gramíneas são muito vantajosas em relação a vegetação espontânea, uma vez que mantêm a temperatura do solo menor, em torno de 33°C em dias quentes, e auxiliam no controle de plantas daninhas. Afirmou ainda que não houve diferenças nas produções de matéria seca, proteína bruta, relação C/N e cinzas entre as espécies estudadas.

Freitas (2017), em experimento com feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) solteiro, crotalária-juncea (*Crotalaria juncea*) solteira, crotalária-juncea consorciada com feijão-de-porco e uma parcela testemunha, constatou que quando as duas leguminosas estão em consórcio a produção de biomassa e o N acumulado chegaram a 6,06 Mg ha⁻¹ e 145,82 kg ha⁻¹, respectivamente. Ao analisar os tratamentos solteiros, a crotalária apresentou maior quantidade de massa seca, 3,96 Mg ha⁻¹, com N acumulado de 59,00 kg ha⁻¹. O feijão-de-porco apresentou N acumulado semelhante, 61,47 kg ha⁻¹, com produção de matéria seca bem menor, 1,90 Mg ha⁻¹. Deste modo, as plantas foram igualmente eficientes na fixação de nitrogênio, mas a crotalária propiciou maior proteção ao solo e, com maior produção de matéria seca, pode resultar em melhores resultados na geração de matéria orgânica do solo.

Além da disponibilidade de nitrogênio, as plantas de cobertura podem influenciar de forma muito decisiva a disponibilidade de potássio no solo. Dentro dos sistemas de produção de café, esse efeito é muito importante porque o potássio é o segundo nutriente mais absorvido e exportado, ficando atrás apenas

do nitrogênio. Ele é especialmente requerido na fase reprodutiva da lavoura, no momento do enchimento dos grãos (BRANDÃO; RODRIGUES, 2016). Torres e Pereira (2008) avaliaram a dinâmica da liberação de K por algumas plantas de cobertura e verificaram que o maior acúmulo do nutriente ocorreu nas plantas que produziram mais matéria seca, no caso, milheto, sorgo e braquiária, correspondendo a 218,90, 104,50 e 214,70 kg ha⁻¹ de K acumulado, associados a produções de 10,3, 7,1 e 6,0 t ha⁻¹ de matéria seca, respectivamente, no primeiro ano. A liberação do K contido nos restos culturais foi maior no milheto (49%), na aveia (54%) e na braquiária (55%). A crotalária liberou menos, ou seja, 43% do K absorvido, no intervalo de um ano.

Portanto, com os dados apresentados, é possível perceber como as plantas de cobertura podem favorecer a nutrição da lavoura de café e tornar o sistema de cultivo cada vez mais sustentável e rentável ao produtor.

2.2 Carbono particulado

A matéria orgânica do solo (MOS) é formada por todos os tipos de resíduos orgânicos presentes no meio, podendo ser de origem animal ou vegetal. Na composição da MOS o carbono é o elemento principal, responsável por 58% da massa (NANZER et al., 2019).

Uma das formas de aumentar a matéria orgânica nos solos é por meio do consórcio da cultura principal, inclusive culturas perenes, com espécies de plantas de cobertura. Estas têm características importantes de ciclagem de nutrientes, fixação de nitrogênio no solo (quando leguminosas) e aumento do

carbono orgânico total (COT) que se concentra nas camadas mais superficiais (SANTOS, 2018). De modo geral, há necessidade de cinco a dez anos para constatação de aumento nos estoques de carbono do solo.

O carbono pode estar de diversas formas na composição da MOS e, de modo geral, pode ser dividido em uma fração lábil, que se transforma em curtos intervalos de tempo, e uma fração estabilizada, chamada de não lábil.

O carbono lábil do solo é definido como o conjunto de compostos orgânicos que apresenta maior facilidade de mineralização pelos microrganismos do solo (RANGEL et al., 2008). Ele compreende resíduos de plantas, de microrganismos e da fauna do solo em diferentes graus de degradação e seus produtos de decomposição, ou seja, substâncias facilmente decomponíveis como carboidratos, incluindo polissacarídeos, proteínas, ácidos orgânicos, aminoácidos, ceras, ácidos graxos e outros compostos não específicos (POIRIER et al., 2005).

A decomposição do C lábil é dependente de umidade, temperatura, porosidade, pH do solo e também da estrutura química e composição das substâncias orgânicas presentes, que determinam a sua disponibilidade para os microrganismos (CAPRIEL, 1997).

Entre as várias medidas de carbono lábil, têm-se o carbono solúvel em água (COS), que é uma fração pequena, mas relevante, porque contém uma reserva de nutrientes de liberação rápida, com maior sensibilidade às mudanças provocadas pelo manejo do que o COT (SILVEIRA, 2005); o carbono da biomassa microbiana (TATE et al., 1988); o carbono oxidável por permanganato de potássio (WEIL et al., 2003); e o carbono particulado. O carbono particulado

é fração que está associada às partículas maiores do solo, sendo muito usada para saber qual a qualidade e a quantidade de carbono disponível na fração areia do solo (LAURITO, 2021). Esta fração contém material com densidade $\leq 1,85 \text{ g cm}^{-3}$ e relação C/N próxima de 20 (CAMBARDELLA; ELLIOT, 1992).

Ao determinar o carbono orgânico particulado (COp) utilizando métodos de separação física e/ou química dos agregados, obtém-se duas ou três frações granulométricas. No fracionamento mais detalhado, em três frações, obtém-se, por separação em peneiras: a fração grossa, que está associada às partículas grossa e fina da fração areia (105-2.000 μm), e a fração média, que está associada às partículas muito finas da areia (53-105 μm). A terceira fração é obtida por meio da subtração entre os valores de COT e COp. Ela é chamada de carbono orgânico associado aos minerais (COam), e é constituída pela fração fina do C, associado ao silte e à argila ($< 53 \mu\text{m}$) (DUVAL et al., 2013).

Conhecer as frações da matéria orgânica ajuda na compreensão do funcionamento e da dinâmica do C e do N no solo, uma vez que o carbono particulado é a fração mais ativa e susceptível às alterações de manejo do solo (DIEKOW et al., 2005). Dessa forma, ao se cultivar plantas de cobertura e deixar sobre a área os restos vegetais, espera-se que haja aumento da matéria orgânica do solo, total e frações, além de aumentar o N disponível para as plantas (JILLING et al., 2020).

Seben Junior et al. (2016), em experimento de nove anos em monocultivo de soja, monocultivo de milho e rotação soja/milho, com plantas de cobertura em segunda safra, sendo elas, milho (*Zea mays* L.), girassol (*Helianthus annuus* L.), nabo (*Raphanus sativus* L.), milheto (*Pennisetum americanum* (L.) K.Schum) e

feijão-guandu (*Cajanus cajan*), constataram que houve aumento de carbono e nitrogênio total do solo, um estando correlacionado ao outro, uma vez que a adição de N ao solo favorece o aumento de C por meio do aumento da atividade microbiana e a produção de biomassa das culturas que vieram em seguida. Além disso, o aumento de carbono total favoreceu o aumento de carbono particulado, sendo explicado pela deposição dos resíduos no solo provenientes da colheita.

Em área de cultivo de café Havaí, em sistema agroflorestal, foi observado que o carbono particulado fino, o carbono particulado protegido nos agregados e o carbono associado às frações silte e argila aumentaram em dois a três anos, indicando a rapidez da resposta da variável ao sistema de manejo (YOUKHANA; IDOL, 2011).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi instalado no ano agrícola de 2021/2022, no município de Monte Santo de Minas – MG, na latitude de 21°05'28,05" S, longitude de 46°49'15,53" W e altitude média de 1.065 m (Figura 1). O clima é classificado como Cwa, segundo classificação de Köppen (tropical úmido com estação chuvosa no verão e inverno seco). O solo é classificado como LVAd (Latosolo Vermelho Amarelo distrófico) (SANTOS et al., 2018), de textura arenosa, e o relevo é suave ondulado, com declividade de 7%.



Figura 1. Imagem da área experimental.

A granulometria do solo na camada de 0-20 cm é: 830 g kg⁻¹ de areia, 40 g kg⁻¹ de silte e 130 g kg⁻¹ de argila. Na determinação das frações foi usado o método descrito em Camargo et al. (2009).

O histórico recente da área é de cultivo de eucalipto, de maneira convencional, e há quatro anos foi implantada a cultura do cafeeiro, cultivar Catuaí Vermelho IAC 99, resultante da recombinação a partir de um cruzamento artificial das cultivares Caturra Amarelo (IAC 476-11) e Mundo Novo (IAC 374-19) (BOTELHO et al., 2008; MAPA, 2021). Essa cultivar apresenta frutos vermelhos, alta produtividade, rusticidade e porte baixo, e foi instalada no espaçamento de 3 m entrelinhas e 0,70 m entre plantas.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições. As parcelas foram compostas por seis sistemas de cultivo: C_S - café solteiro; C_{VE} - café consorciado com vegetação espontânea; C_B - café consorciado com braquiária (*Urochloa ruziziensis*); C_M - café consorciado com milheto (*Pennisetum americanum*); C_{CS} - café consorciado com crotalária-

espectabilis (*Crotalaria spectabilis*); e C_{FP} – café consorciado com feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*). Cada parcela foi composta por oito plantas de café. Uma planta em cada extremo foi considerada bordadura (0,70m) e as seis plantas centrais foram definidas como a área útil, totalizando 16,8 m² de área total e 12,6 m² de área útil.

3.3 Preparo da área e implantação do experimento

O preparo do solo foi realizado de maneira convencional, com grade leve. A abertura dos sulcos foi realizada mecanicamente, e a semeadura das plantas de cobertura foi feita manualmente (Figura 2), no dia 23 de outubro de 2021.



Figura 2. Implantação do experimento, abertura mecânica dos sulcos e semeadura manual.

As plantas de cobertura foram semeadas de forma linear em três sulcos abertos em cada entrelinha, no espaçamento de 35 cm, utilizando-se para a braquiária, o milheto, a crotalaria-espectabilis e o feijão-de-porco as densidades de semeadura recomendadas para cada espécie, sendo de 10 kg ha⁻¹, 15 kg ha⁻¹, 12 kg ha⁻¹ e 100 kg ha⁻¹, respectivamente.

O controle das plantas invasoras foi realizado em todos os tratamentos (exceto no C_{VE}), por meio de capina manual.

3.4 Avaliação dos atributos químicos do solo

A fim de avaliar os efeitos das plantas de cobertura nos atributos químicos do solo, foram realizadas amostragens de solo antes da semeadura e após a dessecação das plantas de cobertura (Figuras 3a e 3b, respectivamente). A coleta de amostras de solo foi feita nas parcelas de todos os tratamentos, nas profundidades de 0,00 - 0,05 m e 0,05 - 0,10 m utilizando trado holandês. A amostra composta de cada parcela foi obtida de 10 subamostras coletadas na entrelinha da cultura. A primeira coleta de solo foi feita no dia 23 de outubro de 2021, e a segunda coleta foi realizada no dia 26 de março de 2022, 63 dias após a dessecação das plantas de cobertura. Por ocasião da primeira coleta na área experimental foi feita coleta de solo em área de mata adjacente, nas mesmas profundidades, para cálculo do índice de manejo co carbono (IMC).



Figura 3. Primeira (a) e segunda (b) coletas de solo nas entrelinhas do cafeeiro.

As amostras foram secas ao ar, passadas em peneira com 2 mm de abertura de malha, homogeneizadas e submetidas às seguintes avaliações:

a) Valor de pH e acidez total – Foram determinadas em solução de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} e em solução tampão SMP, respectivamente, segundo métodos descritos em Raij et al. (2001).

b) Matéria orgânica – foi determinada usando oxidação por via úmida com mistura de dicromato de sódio e ácido sulfúrico concentrado e medida colorimétrica (Raij et al., 2001)

c) Teores de P disponível, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis - Foram extraídos com resina trocadora de íons, segundo Raij et al. (2001).

Na Tabela 1 são apresentados os atributos químicos da área experimental antes da semeadura das plantas de cobertura (médias de todas as parcelas), e também da mata, nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 cm.

Tabela 1. Análise química do solo da área experimental (Área exp.) e da mata.

Local/camada	pH	MO	P	Ca	Mg	K	H+Al	SB	CTC	V
cm	CaCl_2	g dm^{-3}	mg dm^{-3}	-----mmol c dm^{-3} -----						%
Área exp. (0 – 5 cm)	6,1	26	20	52	14	2,1	16	68	85	80
Área exp. (5 – 10 cm)	6,3	23	10	54	13	1,8	15	69	84	82
Mata (0 – 5 cm)	4,3	37	13	16	7	3,0	62	26	88	30
Mata (5 -10 cm)	4,1	29	11	10	4	2,9	64	16	80	20

d) Carbono e nitrogênio particulados – Foram determinados por fracionamento físico, conforme descrito a seguir. Uma subamostra de 10 g de solo (seco e peneirado) foi pesada e transferida para um frasco com tampa, ao qual foram adicionados 30 mL de solução de hexametáfosfato de sódio 50 g L^{-1} e 3 pérolas de vidro (5 mm) para promover a desagregação. Em seguida, as

amostras foram colocadas em agitador a 240 rpm por 15 horas para desintegração mecânica dos agregados.

O peneiramento foi feito com peneiras de malhas de 53 μm e 105 μm (Figura 4). A amostra foi lavada até que a água lixiviada estivesse visualmente límpida. Foram obtidas três frações:

I) Fração grossa (COpg) (105-2.000 μm): representada pelo carbono orgânico particulado grosso, associado às areias fina e grossa.

II) Fração média (COpf) (53-105 μm): na qual está incluído o carbono orgânico fino, associado à areia muito fina.

III) Fração fina (COam) (< 53 μm): representada por C orgânico associado aos minerais presentes nas frações silte e argila.

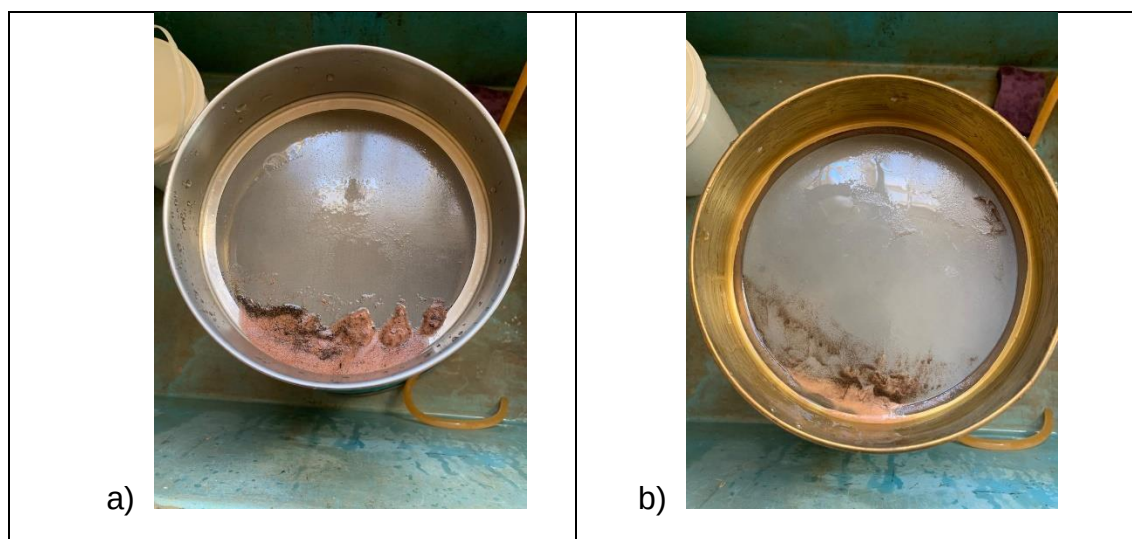


Figura 4. Peneiras de malha correspondentes a 105 μm (a) e 53 μm (b) com o solo correspondente às frações grossa e média, respectivamente.

O material retido em cada peneira foi transferido para recipientes de plástico (Figura 5) com auxílio de jatos de água, seco a 50 °C até atingir massa constante e, em seguida, pesado. O C das frações COpg e COpf foi determinado

por oxidação via úmida com mistura de dicromato de potássio e ácido sulfúrico (CANTARELLA et al., 2001a). O C da fração associado ao silte e à argila foi obtido pela diferença do C orgânico total (COT) e o (COPg + COPf). O COT também foi determinado por oxidação via úmida com mistura de dicromato de potássio e ácido sulfúrico (CANTARELLA et al., 2001a) (Figura 6).



Figura 5. Amostras de carbono orgânico particulado prontas para serem secas na estufa.



Figura 6. Determinação de carbono orgânico total pelo método da via úmida.

A partir dos dados de COP e COT da área alvo de estudo e da área de referência (mata), foi feito o cálculo do índice de manejo do carbono (IMC), que relaciona o teor de carbono com a sua labilidade. Quanto mais o IMC se distancia de 100, maior é o impacto negativo das práticas de manejo nos teores de matéria

orgânica e na qualidade do solo. O cálculo do IMC foi feito conforme proposto por Blair et al. (1995):

$$\text{IMC} = \text{IEC} \times \text{ILC} \times 100$$

Em que:

IEC é o índice de estoque de carbono

ILC é o índice de labilidade do carbono

O IEC é calculado a partir do carbono orgânico total presente na área alvo de estudo em relação à referência (mata), da seguinte forma:

$$\text{IEC} = \text{COT}_{\text{ae}}/\text{COT}_{\text{ref}}$$

Em que:

COT_{ae} = carbono orgânico do solo da área em estudo,

COT_{ref} = carbono orgânico do solo da área referência (mata).

O ILC é calculado pela razão da labilidade na área em estudo em relação à referência, do seguinte modo:

$$\text{ILC} = \text{L}_{\text{ae}}/\text{L}_{\text{ref}}$$

Em que:

L = concentração de C lábil/concentração de C não lábil

O carbono lábil é representado, no caso, pelo COP e o carbono não lábil é obtido pela diferença entre o COT e o COP.

O nitrogênio associado às frações grossa (N-COPg) e média (N-COPf) foi determinado por digestão sulfúrica seguida de destilação-titulação (CANTARELLA; TRIVELIN, 2001b) (Figura 7). O nitrogênio associado à fração fina (N-COam) foi obtido pela diferença do N orgânico total (NOT) e o (N-COPg + N-COPf). O NOT também foi determinado por digestão sulfúrica (CANTARELLA; TRIVELIN, 2001b).



Figura 7. Destilação das amostras para determinação de nitrogênio.

A partir dos teores de C e N de cada fração foi calculada a relação C/N.

3.5 Avaliação dos atributos agronômicos

a) Matéria seca dos adubos verdes (g) - Após o florescimento, foram coletadas três subamostras de 0,50 m de linha das plantas de cobertura. A coleta ocorreu no dia 22 de janeiro, aos 91 dias após a semeadura. Em todos os casos, as plantas foram cortadas rente ao solo (Figura 8), lavadas, acondicionadas em sacos de papel perfurados e levadas à secagem.



Figura 8. Amostragem das plantas de crotalária (a), vegetação espontânea (b) e feijão-de-porco (c).

A lavagem do material foi realizada com água corrente, solução de detergente neutro a 1 mL L^{-1} e água deionizada, em três enxágues. Em seguida, as amostras foram submetidas à secagem, até atingirem massa constante, em estufa com circulação forçada de ar ($65\text{-}70 \text{ }^{\circ}\text{C}$), como sugerido por Carmo et al. (2000), de modo a obter a produção de matéria seca. Para o cálculo da estimativa de matéria seca por ha, foram consideradas apenas as linhas intercalares ao café, e não a produção estimada como cultura exclusiva. As plantas foram moídas em moinho tipo Willey e na amostra seca foram determinadas as concentrações de C e N por combustão em analisador LECO® CN 628 (Tabela 2). Os teores dos macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S) foram determinados seguindo a método descrito em Carmo et al. (2000). Foram também determinadas as concentrações de celulose, hemicelulose e lignina (VAN SOEST, 1994).

Tabela 2. Produção de matéria seca, concentrações de C e N totais, relação C/N, teores de macronutrientes e de celulose (Cel), hemicelulose (Hem) e lignina (Lig) das plantas de cobertura.

Planta de Cobertura	MS	C total	N total	C/N	P	K	Ca	Mg	S	Cel	Hem	Lig
	kg ha ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹									
Braquiária	1175	456	19	24	2	27	4	3	1,3	35	27	10
Milheto	2032	466	18	26	1	20	3	2	0,8	35	26	7
Crotalária	729	447	30	15	2	23	12	2	1,5	28	15	9
Feijão de Porco	694	453	37	12	3	19	17	2	1,4	27	14	8
Vegetação Espontânea	550	445	18	25	2	25	6	3	1,3	33	26	7

b) Teores de macronutrientes foliares do cafeeiro – Em 26 de março de 2022 foi realizada a amostragem foliar, coletando-se o terceiro ou quarto par de folhas no terço médio do cafeeiro, em cinco plantas por parcela, em ambas as faces (Figura 9). As amostras foram lavadas com água corrente e solução de detergente neutro a 1 mL L⁻¹ e lavadas por três vezes em água deionizada (Figura 10). Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em sacos de papel perfurados, os quais foram colocados em estufa com circulação de ar forçada (60-65 °C), até atingirem massa constante. Após a secagem, foram processadas em moinho do tipo Wiley. Os teores dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) foram determinados seguindo a método descrito em Carmo et al. (2000).



Figura 9. Coleta das amostras de folhas do café para diagnose foliar.



Figura 10. Lavagem das folhas de café para diagnose foliar.

3.6 Forma de análise dos resultados

Os dados foram submetidos à análise de *outliers* pelo teste generalizado ESD (ROSNER, 1983) e, também, à verificação do atendimento aos pressupostos da análise de variância (ANOVA) (normalidade dos resíduos, pelo teste de Levene e homogeneidade das variâncias, pelo teste de Jarque-Bera). Quando um dos pressupostos foi violado, realizou-se a transformação dos dados, para atender os requisitos da ANOVA. Os dados foram analisados por meio de ANOVA de medidas repetidas, utilizando a correção de Greenhouse-Geisser (GREENHOUSE; GEISSER, 1958), e cada camada de solo foi avaliada

isoladamente. O fator principal foi as plantas de cobertura (PC), e o secundário, as épocas de coleta do solo (E). Quando o teste F foi significativo ($p < 5\%$), foi realizado teste de Tukey para comparação de médias. Quando a interação foi significativa, realizou-se o desdobramento. As análises foram feitas utilizando-se o software SpeedStat (SPEED Stat, UFV, Viçosa, Brasil).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Acidez do solo, nutrientes disponíveis, CTC e V%

Não houve efeito significativo do cultivo das plantas de cobertura nos atributos químicos P, pH, Ca, Mg, H + Al, SB, CTC e V% nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade (Tabela 3). Os teores de P da camada de 0-5 cm estão na classe de teores médios, enquanto que na camada de 5-10 cm eles são considerados teores baixos, segundo Raij et al. (1997). De acordo com os mesmos autores, os valores de pH nas camadas de 0-5 e 5-10 cm indicam acidez baixa e muito baixa, respectivamente, e os teores de Ca e Mg são altos nas duas camadas. Os valores de V% são classificados como altos.

Tabela 3. Atributos químicos em amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, em função do cultivo de plantas de cobertura e as respectivas coletas.

PC	P	pH CaCl ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	H + Al	SB	CTC	V
	mg dm ⁻³								%
----- 0-5 cm -----									
Cs	19	6,0	56	18	1,7 b	16	76	92	81
C _{VE}	14	5,9	44	12	1,9 ab	18	58	76	75
C _B	16	5,6	41	12	2,3 a	23	66	84	78
C _M	17	6,1	61	21	2,1 ab	16	74	94	76
C _{CS}	24	5,9	55	17	2,0 b	17	75	92	79
C _{FP}	19	6,1	73	20	1,7 b	17	94	111	83
C									
Coleta 1	20	6,1 a	52	14 b	2,1 a	16 b	65 b	83 b	77
Coleta 2	17	5,8 b	58	19 a	1,8 b	19 a	82 a	100 a	80
Teste F									
PC	0,71 ^{Ns}	1,55 ^{Ns}	2,33 ^{Ns}	1,47 ^{Ns}	4,16*	1,88 ^{Ns}	1,65 ^{Ns}	1,73 ^{Ns}	1,53 ^{Ns}
C	0,24 ^{Ns}	13,24**	1,39 ^{Ns}	5,49*	10,82**	30,63**	5,73*	6,26*	2,30 ^{Ns}
PC x C	1,42 ^{Ns}	0,51 ^{Ns}	0,84 ^{Ns}	1,62 ^{Ns}	4,03*	1,42 ^{Ns}	1,18 ^{Ns}	1,02 ^{Ns}	3,83*
----- 5-10 cm -----									
Cs	8	6,3	51	12	1,8 ab	15	92	107	84
C _{VE}	9	6,2	54	13	1,8 ab	16	76	92	80
C _B	12	6,4	58	14	1,8 ab	14	69	84	81
C _M	10	6,1	78	23	1,2 c	16	85	103	82
C _{CS}	9	6,0	64	19	2,2 a	17	68	84	81
C _{FP}	17	6,1	73	15	1,5 bc	16	95	110	85
C									
Coleta 1	11	6,1	58	16	1,7	16	68 b	85 b	80 b
Coleta 2	10	6,3	68	16	1,7	15	93 a	109 a	84 a
Teste F									
PC	0,63 ^{Ns}	2,37 ^{Ns}	1,41 ^{Ns}	1,42 ^{Ns}	9,24**	1,58 ^{Ns}	0,74 ^{Ns}	0,82 ^{Ns}	0,53 ^{Ns}
C	0,61 ^{Ns}	1,87 ^{Ns}	1,70 ^{Ns}	0,00 ^{Ns}	0,83 ^{Ns}	1,65 ^{Ns}	9,21**	9,28**	5,41*
PC x C	1,18 ^{Ns}	1,07 ^{Ns}	1,23 ^{Ns}	37,96**	2,19 ^{Ns}	1,30 ^{Ns}	0,81 ^{Ns}	0,84 ^{Ns}	2,02 ^{Ns}

PC: planta de cobertura; C: época de coleta do solo; PC x C: interação planta de cobertura x época de coleta; Cs: parcelas com controle da vegetação espontânea; C_{VE}: consórcio de plantas de café com vegetação espontânea; C_B: consórcio com braquiária; C_M: consórcio com milheto; C_{CS}: consórcio com crotalária; C_{FP}: consórcio com feijão-de-porco; coleta 1: antes das plantas de cobertura; coleta 2: 63 dias após a roçada das plantas de cobertura.

Ns: não significativo; *, **: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Letras seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Dentre os nutrientes, o K foi o único para o qual houve efeito das plantas de cobertura em ambas as camadas, com interação entre espécies de cobertura

e datas de coleta na camada de 0-5 cm (Tabela 3). Na camada de 5-10 cm, a crotalária se destacou em relação ao cultivo de milho e feijão-de-porco, com $2,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Os outros tratamentos não apresentaram diferenças, ficando apenas o milho com o menor teor de K^+ no sistema, equivalente a $1,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Pereira et al. (2016) também identificaram em seu estudo que a *Crotalaria spectabilis* foi a planta de cobertura que resultou no maior incremento de K no sistema, como ocorreu no presente experimento, considerando a camada de 5-10 cm.

O desdobramento da interação para teores de K na camada de 0-5 cm em função das plantas de cobertura e épocas de coleta está na Tabela 4. Observa-se que houve diminuição do teor de K no solo nos tratamentos café solteiro e crotalária em relação ao teor inicial. Comparando os efeitos do cultivo das plantas de cobertura, aos 63 dias após a dessecação, nos tratamentos com cultivo de braquiária e milho (Tabela 4). Esses maiores teores são típicos das áreas cultivadas com gramíneas de cobertura, mas eles não aumentaram de forma significativa em relação à primeira coleta. No experimento de Torres e Pereira (2008) também foi observada maior liberação de K no sistema com o cultivo de gramíneas de cobertura, que foram as espécies que apresentaram maior produção de matéria seca. Os autores também destacaram a vegetação espontânea, que mesmo com baixa produção de matéria seca, apresentou acúmulo de 75 kg ha^{-1} de K, fato que pode ser explicado por serem espécies mais adaptadas às condições climáticas da região.

Tabela 4. Desdobramento da interação entre plantas de cobertura e época de coleta de solo para os teores de K na camada de 0-5 cm.

	Cs	C _{VE}	C _B	C _M	C _{CS}	C _{FP}
	K ⁺ (mmol _c dm ⁻³), 0-5 cm					
Coleta 1	2,10 Aa ¹	2,08 Aa	2,20 Aa	1,98 Aa	2,38 Aa	1,93 Aa
Coleta 2	1,30 Cb	1,63 BCa	2,45 Aa	2,28 ABa	1,58 BCb	1,45 Ca

Cs: parcelas com controle da vegetação espontânea; C_{VE}: consórcio de plantas de café com vegetação espontânea; C_B: consórcio com braquiária; C_M: consórcio com milho; C_{CS}: consórcio com crotalaria; C_{FP}: consórcio com feijão-de-porco; coleta 1: antes das plantas de cobertura; coleta 2: 63 dias após a roçada das plantas de cobertura.

¹ Letras maiúsculas comparam médias nas linhas (efeito de plantas de cobertura) e letras minúsculas comparam médias nas colunas (efeito do intervalo de coleta), pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Os adubos verdes possuem sistema radicular profundo e ramificado, capaz de realizar a reciclagem de nutrientes por meio da absorção em camadas mais profundas e translocação para a parte aérea que, ao ser cortada ou dessecada, deixa os nutrientes em superfície. Nessa condição, compondo a matéria seca das plantas, os nutrientes serão disponibilizados gradualmente no solo durante o processo de decomposição microbiana, principalmente nas camadas mais superficiais (COSTA, 1993). De modo geral, o efeito do cultivo das plantas de cobertura nos teores de K do solo é o mais facilmente detectável porque as plantas absorvem grandes quantidades do nutriente e, ainda, como o K não é constituinte estrutural de moléculas, a liberação dos tecidos vegetais independe da ação decompositora dos microrganismos, e se dá em curto prazo. No presente caso o efeito observado foi pequeno e pode estar associado à ocorrência do pico de liberação em momento anterior à amostragem de solo, seguida de rápida absorção pelo cafeeiro e lixiviação para camadas abaixo dos 10 cm avaliados.

Em relação aos tempos de coleta, houve diminuição nos valores de pH e nos teores de K, e aumento nos valores de Mg, H+Al, SB e CTC, na camada de 0-5 cm. Na camada de 5-10 cm, os valores de SB, CTC e V% aumentaram

(Tabela 3). As diferenças são, em geral, pequenas, como a diminuição no valor de pH, de 0,3 unidade, acompanhada de aumento no $H+Al$ de $3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, mas ao contrário do esperado, o valor de $V\%$ aumentou. Quando se faz cultivo continuado de plantas de cobertura em áreas de produção, de modo geral, a acidez diminui à medida que ocorre a decomposição dos resíduos vegetais, uma vez que durante esse processo são produzidos ácidos orgânicos capazes de complexar o alumínio tóxico do solo (LIU; HUE, 1996). No presente caso, como o solo tem valores de pH altos, incompatíveis com a presença de Al^{3+} , a diminuição no valor de pH entre as coletas pode estar associada à adubação nitrogenada que foi feita na fase inicial do experimento.

É possível observar ainda, que ocorreram maiores diferenças entre os tempos de coleta na camada de 0-5 cm, demonstrando que o material depositado agiu mais rapidamente nesta camada (Tabela 3), mas não apenas isso, uma vez que todas as adubações foram feitas superficialmente, e o calcário e os adubos são os principais agentes de mudança nos atributos do solo. A aplicação superficial do calcário e dos adubos causa, inclusive, muita desuniformidade na área. Os coeficientes de variação para os teores de Ca, por exemplo, nas camadas de 0-5 cm e 5-10 cm, foram de 38,9% e 38,4%, indicando distribuição irregular do corretivo. Ainda, os teores de Ca e Mg podem estar superestimados, devido à aplicação de calcário e às adubações frequentes na área. Exatamente por isso, os valores de CTC também devem estar superestimados, uma vez que ela ultrapassa, em alguns casos, $100 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e se trata de um solo arenoso. O próprio aumento da CTC entre as coletas (Tabela 3), que em parte pode ser explicado pelo aumento no COT, que será

tratado posteriormente, também pode estar acima do aumento real, uma vez que na mata, com teor de carbono orgânico maior do que a média dos valores na área do experimento, a CTC determinada foi de $87 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0-5 cm e de $80 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 5-10 cm.

Houve interação entre os tempos de coleta e as plantas de cobertura na camada de 0-5 cm também para os valores de V%, e na camada de 5-10 cm de profundidade, para Mg (Tabela 5).

Para o V% na camada de 0-5 cm, observa-se que havia desuniformidade na área, com valores de V% menores nas parcelas cultivadas com milho em relação ao feijão-de-porco. Esse efeito desapareceu na segunda coleta e a diferença entre as espécies deixou de ocorrer (Tabela 5).

Tabela 5. Desdobramento da interação entre plantas de cobertura e época de coleta de solo para os valores de V% (0-5 cm) e teores de Mg^{2+} (5-10 cm).

	Cs	C _{VE}	C _B	C _M	C _{CS}	C _{FP}
V%, 0-5 cm						
Coleta 1	81,60 ABa	79,13 ABa	74,67 ABa	66,21 Bb	80,07 ABa	82,61 Aa
Coleta 2	80,22 Aa	71,69 Aa	81,88 Aa	85,01 Aa	78,85 Aa	83,95 Aa
Mg^{2+} ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), 5-10 cm						
Coleta 1	14,15 Aa	12,83 Aa	14,80 Aa	26,40 Aa	13,95 Ab	13,60 Aa
Coleta 2	10,83 Ba	13,28 ABa	13,15 ABa	19,90 ABa	24,28 Aa	17,23 ABa

Cs: parcelas com controle da vegetação espontânea; C_{VE}: consórcio de plantas de café com vegetação espontânea; C_B: consórcio com braquiária; C_M: consórcio com milho; C_{CS}: consórcio com crotalária; C_{FP}: consórcio com feijão-de-porco; coleta 1: antes das plantas de cobertura; coleta 2: 63 dias após a roçada das plantas de cobertura.

¹ Letras maiúsculas comparam médias nas linhas (efeito de plantas de cobertura) e letras minúsculas comparam médias nas colunas (efeito do intervalo de coleta), pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Para o Mg^{2+} , na camada de 5-10 cm, houve aumento entre as coletas 1 e 2 nas parcelas cultivadas com crotalária-espectabilis, e na coleta 2 as parcelas

cultivadas com crotalária apresentaram teores maiores comparadas com o café solteiro. Os demais tratamentos não diferiram entre si (Tabela 5).

4.2 Carbono e nitrogênio

4.2.1 Carbono e nitrogênio total

Não houve efeito significativo para as plantas de cobertura nos teores de carbono total, nitrogênio total e relação C/N total, tanto na camada de 0-5 cm quanto na camada de 5-10 cm de profundidade (Tabela 6).

Tabela 6. Carbono total (CT), nitrogênio total (NT) e relação C/N total em amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, em função do cultivo de plantas de cobertura e épocas de coleta.

PC	CT		NT		C/N total	
	g kg ⁻¹					
	0-5 cm	5-10 cm	0-5 cm	5-10 cm	0-5 cm	5-10 cm
C _S	10,20	10,03	0,89	0,92	13,15	11,08
C _{VE}	10,43	9,50	0,90	0,83	12,48	11,91
C _B	12,89	11,72	1,13	0,98	11,62	12,38
C _M	13,61	11,87	1,06	0,97	13,12	11,22
C _{CS}	12,85	11,02	0,95	0,92	14,64	12,15
C _{FP}	12,97	11,53	1,14	0,93	11,50	12,64
C						
Coleta 1	11,55 b	10,41 b	0,93 b	0,83 b	13,35	12,24
Coleta 2	12,77 a	11,48 a	1,10 a	1,01 a	12,16	11,55
Teste F						
PC	1,35 ^{Ns}	1,02 ^{Ns}	1,01 ^{Ns}	0,56 ^{Ns}	0,47 ^{Ns}	0,82 ^{Ns}
C	37,65 ^{**}	9,07 ^{**}	10,02 ^{**}	16,46 ^{**}	0,97 ^{Ns}	1,01 ^{Ns}
PC x C	4,74 ^{**}	0,21 ^{Ns}	0,75 ^{Ns}	0,84 ^{Ns}	0,49 ^{Ns}	0,52 ^{Ns}

Cs: parcelas com controle da vegetação espontânea; C_{VE}: consórcio de plantas de café com vegetação espontânea; C_B: consórcio com braquiária; C_M: consórcio com milho; C_{CS}: consórcio com crotalária; C_{FP}: consórcio com feijão-de-porco; coleta 1: antes das plantas de cobertura; coleta 2: 63 dias após a roçada das plantas de cobertura.

Ns: não significativo; *, **: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Letras seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

De acordo com a Tabela 6, as plantas de cobertura usadas no experimento não foram capazes de causar aumento nos teores de carbono e nitrogênio total no solo em relação ao café solteiro, o que se deve à adoção desse manejo em um único ciclo de cultivo. Para que esse incremento fosse significativo, seriam necessários vários anos de cultivo e, a depender do manejo, esse tempo poderia ser de 10 a 35 anos (PEREZ et al., 2004; IMBANA et al., 2021).

A relação C/N variou entre 12 e 11 e, segundo Imbana et al. (2021), quando os valores da relação C/N estão abaixo de 20, significa que o processo de mineralização está predominando sobre a imobilização, e a característica das plantas de cobertura, com maior relação C/N nas gramíneas, não influenciou a relação C/N da matéria orgânica estável do solo.

Entre as coletas houve resultados positivos, com ganhos pequenos nos teores de CT e NT nas duas profundidades (Tabela 6). Existe interdependência entre C e N, de modo que se o N for limitante, não é possível aumentar o C (URQUIAGA et al., 2005). O aumento no CT também explica, em parte, o aumento na CTC do solo apresentada na Tabela 3. Na fração estável da matéria orgânica do solo estão os grupos funcionais que resultam na geração das cargas negativas (STROSSER, 2010).

Na Tabela 7 é apresentado o desdobramento da interação que ocorreu entre as plantas de cobertura e as épocas de coleta de solo para a camada de 0-5 cm de profundidade na análise de carbono orgânico total.

Tabela 7. Desdobramento da interação entre plantas de cobertura e época de coleta de solo para carbono orgânico total (CT) na camada de 0-5 cm de profundidade.

	Cs	C _{VE}	C _B	C _M	C _{CS}	C _{FP}
CT (g kg ⁻¹), 0-5 cm						
Coleta 1	8,93 Ab	9,61 Ab	12,38 Aa	13,36 Aa	13,06 Aa	11,92 Ab
Coleta 2	11,47 Aa	11,24 Aa	13,40 Aa	13,86 Aa	12,64 Aa	14,01 Aa

Cs: parcelas com controle da vegetação espontânea; C_{VE}: consórcio de plantas de café com vegetação espontânea; C_B: consórcio com braquiária; C_M: consórcio com milho; C_{CS}: consórcio com crotalaria; C_{FP}: consórcio com feijão-de-porco; coleta 1: antes das plantas de cobertura; coleta 2: 63 dias após a roçada das plantas de cobertura.

¹ Letras maiúsculas comparam médias nas linhas (efeito de plantas de cobertura) e letras minúsculas comparam médias nas colunas (efeito do intervalo de coleta), pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Dentro de cada época de coleta, respectivamente antes e após o cultivo das plantas de cobertura, não houve diferenças entre tratamentos, incluindo café solteiro e vegetação espontânea. Entre as coletas, observa-se aumento nos teores de carbono nos tratamentos café solteiro, vegetação espontânea e cultivo de feijão-de-porco, indicando que o efeito é mais de variabilidade espacial alta dentro da área, e menos do manejo adotado, uma vez que no café solteiro as parcelas foram mantidas sem vegetação e não havia possibilidade de acúmulo de MO da ordem de 2,5 g kg⁻¹ no intervalo das avaliações.

4.2.2 Carbono e nitrogênio orgânico particulados

Não houve efeito das plantas de cobertura no carbono orgânico particulado grosso, no nitrogênio e na relação C/N da fração, para as camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade. Houve apenas efeito da época de coleta para esses atributos (Tabela 8).

Tabela 8. Carbono orgânico particulado grosso (COPg), nitrogênio orgânico particulado grosso (N-COpG) e relação C/N da fração grossa (C/N fg) em amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, em função do cultivo de plantas de cobertura e épocas de coleta.

Tratamento	COPg		N-COpG		C/N fg	
	----- mg kg ⁻¹ -----					
	0-5 cm	5-10 cm	0-5 cm	5-10 cm	0-5 cm	5-10 cm
Cs	1669,01	1028,40	105,12	76,12	18,27	14,06
C _{VE}	1362,18	834,37	121,35	70,83	15,01	12,68
C _B	1781,46	1125,49	132,15	66,18	15,81	19,75
C _M	2124,38	1343,73	145,23	77,37	15,72	18,53
C _{CS}	2002,06	1253,66	155,12	90,36	14,32	17,14
C _{FP}	1885,26	1497,38	165,88	101,82	14,20	16,57
C						
Coleta 1	2003,66 a	1297,33 a	179,51 a	104,39 a	12,91 b	12,92 b
Coleta 2	1604,46 b	1063,68 b	95,44 b	56,50 b	18,20 a	19,98 a
Teste F						
PC	1,50 ^{Ns}	1,43 ^{Ns}	1,32 ^{Ns}	1,38 ^{Ns}	0,66 ^{Ns}	0,93 ^{Ns}
C	19,08 ^{**}	28,53 ^{**}	31,10 ^{**}	59,60 ^{**}	12,32 ^{**}	30,64 ^{**}
PC x C	0,62 ^{Ns}	22,74 ^{**}	1,11 ^{Ns}	0,82 ^{Ns}	1,59 ^{Ns}	1,57 ^{Ns}

Cs: parcelas com controle da vegetação espontânea; C_{VE}: consórcio de plantas de café com vegetação espontânea; C_B: consórcio com braquiária; C_M: consórcio com milho; C_{CS}: consórcio com crotalaria; C_{FP}: consórcio com feijão-de-porco; coleta 1: antes das plantas de cobertura; coleta 2: 63 dias após a roçada das plantas de cobertura.

Ns: não significativo; *, **: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Letras seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em todas as situações, o COpg e o Npg diminuíram da primeira para a segunda coleta, apesar do cultivo das plantas de cobertura. Esse efeito pode estar associado ao fato de a primeira coleta ter sido feita no início da estação das chuvas. Durante os meses mais secos, a vegetação espontânea, que foi roçada na área, permaneceu sobre o solo sendo apenas parcial e lentamente decomposta pelos microrganismos, resultando em maior concentração de partículas na dimensão de areias. Durante o período das chuvas, esse material e também aquele que foi depositado a partir das espécies cultivadas, foi mais rapidamente decomposto, passando a integrar outros reservatórios, inclusive a

biomassa microbiana e as formas mais estáveis, associadas aos minerais. Segundo Rossi et al. (2012), os resíduos que entram no sistema são os que têm maior ação no incremento do carbono, e essa afirmação é ainda mais aplicável à matéria orgânica particulada, pois esta está diretamente relacionada ao material que foi depositado no solo recentemente.

Na camada de 5-10 cm, a diminuição no COPg foi dependente da espécie cultivada e foi maior, e significativa, apenas no café solteiro, uma vez que nessa condição não houve entrada de material vegetal, exceto o que foi derivado das plantas de café (Tabela 9).

Tabela 9. Desdobramento da interação entre plantas de cobertura e época de coleta de solo para relação de COPg na camada 5-10 cm de profundidade.

	CS	C _{VE}	C _B	C _M	C _{CS}	C _{FP}
	COPg (mg kg ⁻¹), 5-10 cm					
Coleta 1	1246,37 Aa	933,55 Aa	1186,89 Aa	1491,19 Aa	1396,50 Aa	1529,50 Aa
Coleta 2	810,43 Ab	735,18 Aa	1064,10 Aa	1196,27 Aa	1110,83 Aa	1465,26 Aa

CS: parcelas com controle da vegetação espontânea; C_{VE}: consórcio de plantas de café com vegetação espontânea; C_B: consórcio com braquiária; C_M: consórcio com milho; C_{CS}: consórcio com crotalária; C_{FP}: consórcio com feijão-de-porco; coleta 1: antes das plantas de cobertura; coleta 2: 63 dias após a roçada das plantas de cobertura.

Letras maiúsculas comparam médias nas linhas (efeito de plantas de cobertura) e letras minúsculas comparam médias nas colunas (efeito do intervalo de coleta), pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Houve aumento da relação C/N nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade, indicando a entrada recente de grande quantidade de material orgânico ao solo, que ainda está em transformação (Tabela 8).

O resultado dos efeitos do cultivo das plantas de cobertura e época de coleta de solo para as variáveis de carbono orgânico particulado fino, nitrogênio orgânico particulado fino e relação C/N da fração fina são apresentados na

Tabela 10. Para as análises de carbono orgânico particulado fino, nitrogênio orgânico particulado fino e relação C/N particulada da fração fina não houve efeitos significativos das plantas de cobertura. Para os tempos de coleta houve efeitos para o COPf a 0-5 cm, N-COPf a 0-5 e 5-10 cm e relação C/Nff a 0-5 e 5-10 cm de profundidade (Tabela 10).

Tabela 10. Carbono orgânico particulado fino (COPf), nitrogênio orgânico particulado fino (N-COPf) e relação C/N da fração fina (C/Nff) em amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, em função do cultivo de plantas de cobertura e épocas de coleta.

Tratamento	COPf		N-COPf		C/N ff	
	----- mg kg ⁻¹ -----					
	0-5 cm	5-10 cm	0-5 cm	5-10 cm	0-5 cm	5-10 cm
Cs	470,46	348,87	42,92	27,04	12,52	15,44
C _{VE}	432,20	310,60	39,44	23,21	12,70	14,59
C _B	613,30	434,30	43,46	36,16	25,70	16,40
C _M	640,35	440,54	53,47	40,01	13,26	12,77
C _{CS}	582,99	409,66	50,87	33,95	12,62	13,03
C _{FP}	648,27	514,74	52,57	41,16	13,11	12,81
C						
Coleta 1	546,08 b	401,07	62,38 a	43,10 a	9,02 b	10,15 b
Coleta 2	583,11 a	418,49	31,86 b	24,08 b	20,94 a	18,20 a
Teste F						
PC	1,81 ^{Ns}	1,77 ^{Ns}	0,59 ^{Ns}	1,56 ^{Ns}	2,38 ^{Ns}	0,76 ^{Ns}
C	5 ^{**}	0,60 ^{Ns}	42,20 ^{**}	21,14 ^{**}	64,65 ^{**}	40,08 ^{**}
PC x C	2,41 ^{Ns}	1,88 ^{Ns}	0,68 ^{Ns}	0,98 ^{Ns}	0,54 ^{Ns}	0,87 ^{Ns}

Cs: parcelas com controle da vegetação espontânea; C_{VE}: consórcio de plantas de café com vegetação espontânea; C_B: consórcio com braquiária; C_M: consórcio com milho; C_{CS}: consórcio com crotalaria; C_{FP}: consórcio com feijão-de-porco; coleta 1: antes das plantas de cobertura; coleta 2: 63 dias após a roçada das plantas de cobertura.

Ns: não significativo; *, **: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Letras seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O COPf aumentou entre as coletas, na camada de 0-5 cm, indicando que o tempo transcorrido entre a roçada das plantas de cobertura e a coleta de solo foi suficiente para que, no processo de decomposição microbiana, os resíduos adicionados atingissem essa dimensão. O N-COPf diminuiu entre as coletas nas

duas camadas, indicando que parte do N dos resíduos foi imobilizada na biomassa microbiana ou armazenada em formas de carbono mais estáveis, e parte pode ter sido mineralizada e perdida para camadas mais profundas ou absorvida pelas plantas.

4.2.3 Carbono e nitrogênio associados aos minerais

Não houve efeito significativo das plantas de cobertura no carbono orgânico e no nitrogênio orgânico associado aos minerais, e na relação C/N dessa fração. Também nesse caso houve diferenças entre as coletas, exceto para a relação C/N (Tabela 11).

O COam e o N-Coam aumentaram no intervalo entre as coletas, justificando o aumento nos teores totais apresentados inicialmente (Tabela 6). O aumento dessas formas de C e N, acompanhados da diminuição observada na fração COpg, Npg e Npf indicam que parte do carbono e do nitrogênio que entraram no sistema com o cultivo das espécies de cobertura estabilizou na matéria orgânica do solo no intervalo de duração do experimento.

O COam e N-COam são as frações mais estáveis desses elementos no solo; elas são protegidas pela associação com os colóides minerais do solo e pela formação dos complexos argila-húmus (BRADY; WEIL, 2013).

Tabela 11. Carbono orgânico associado aos minerais (COam), nitrogênio orgânico associado aos minerais (N-COam) e relação C/N da fração (C/Nam) em amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, em função do cultivo de plantas de cobertura e épocas de coleta.

Tratamento	COam		N-COam		C/N am	
	----- g kg ⁻¹ -----					
	0-5 cm	5-10 cm	0-5 cm	5-10 cm	0-5 cm	5-10 cm
Cs	8,06	8,65	0,74	0,82	9,82	10,84
C _{VE}	8,63	8,36	0,74	0,73	12,77	12,51
C _B	10,5	10,16	0,96	0,87	11,62	12,57
C _M	10,85	10,08	0,86	0,96	13,27	10,73
C _{CS}	10,27	9,35	0,75	0,81	13,70	11,77
C _{FP}	10,43	9,51	0,93	0,79	11,48	12,52
C						
Coleta 1	9,00 b	8,71 b	0,69 b	0,73 b	12,65	12,6
Coleta 2	10,58 a	9,99 a	0,97 a	0,93 a	11,57	11,05
Teste F						
PC	1,47 ^{Ns}	0,78 ^{Ns}	0,95 ^{Ns}	0,97 ^{Ns}	1,33 ^{Ns}	0,90 ^{Ns}
C	45,94 ^{**}	16,77 ^{**}	26,01 ^{**}	12,90 ^{**}	1,08 ^{Ns}	3,16 ^{Ns}
PC x C	2,42 ^{Ns}	0,14 ^{Ns}	0,65 ^{Ns}	0,91 ^{Ns}	0,74 ^{Ns}	0,91 ^{Ns}

Cs: parcelas com controle da vegetação espontânea; C_{VE}: consórcio de plantas de café com vegetação espontânea; C_B: consórcio com braquiária; C_M: consórcio com milho; C_{CS}: consórcio com crotalaria; C_{FP}: consórcio com feijão-de-porco; coleta 1: antes das plantas de cobertura; coleta 2: 63 dias após a roçada das plantas de cobertura.

Ns: não significativo; *, **: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Letras seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.2.4 Índice de manejo de carbono

Os valores dos índices de manejo de carbono, calculados a partir dos valores obtidos nas análises de carbono das áreas do experimento em relação à mata nativa, são apresentados Tabela 12.

Os valores de IMC na camada de 0-5 cm nos tratamentos café solteiro e vegetação espontânea variaram de aproximadamente 60 a 68 e foram menores do que os observados nas áreas cultivadas com gramíneas e leguminosas de cobertura. Entre as leguminosas, o feijão-de-porco foi a espécie com melhor resultado (90,95), e entre as gramíneas, o melhor resultado foi obtido com o

milheto (91,26). Na camada de 5-10 cm, os valores foram menores, com exceção do tratamento com feijão-de-porco, que apresentou maior IMC nesta camada (110,44) (Tabela 12).

Tabela 12. Índice de manejo do carbono (IMC) calculado com base no carbono particulado e no carbono total do solo das áreas do experimento em relação à mata.

Tratamento	MÉDIAS	
	0-5 cm	5-10 cm
Cs	67,81	57,69
C _{VE}	59,84	52,27
C _B	77,22	76,11
C _M	91,26	83,82
C _{CS}	83,62	74,01
C _{FP}	90,95	110,44

Cs: parcelas com controle da vegetação espontânea; C_{VE}: consórcio de plantas de café com vegetação espontânea; C_B: consórcio com braquiária; C_M: consórcio com milho; C_{CS}: consórcio com crotalária; C_{FP}: consórcio com feijão-de-porco.

O índice de manejo de carbono é uma medida que representa os estoques de carbono do solo usando como referência o solo com a vegetação nativa, e a partir dele é possível identificar se o manejo que vem sendo conduzido na área está sendo prejudicial ou benéfico ao solo.

O IMC relaciona o teor de carbono com a sua labilidade e, quanto mais o IMC se distancia de 100, maior é o impacto negativo das práticas de manejo nos teores de matéria orgânica e na qualidade do solo. Deste modo, café solteiro e vegetação espontânea são duas estratégias de manejo não recomendadas. Ainda, segundo Blair et al. (1995), valores de IMC abaixo de 100 indicam que o manejo realizado na área não está sendo suficiente para a manutenção dos teores de matéria orgânica. Assim, como nenhuma das espécies cultivadas resultou em IMC maior do que 100 na camada de 0-5 cm, um único cultivo de espécies de cobertura não garante o acúmulo de matéria orgânica na área, mas

é possível identificar que o feijão-de-porco, com valores de IMC próximos de 100 na camada de 0-5 e maiores do que 100 na camada de 5-10 cm, foi a espécie que deu maior ganho de qualidade para o solo, seguida do milheto.

4.3 Teores de macronutrientes nas folhas do cafeeiro

Os teores de macronutrientes nas folhas do cafeeiro estão na Tabela 13.

As plantas de cobertura não causaram variação nos teores de N, P, K, Ca e Mg e, no caso dos S, observaram-se maiores teores nas folhas das plantas cultivadas em consórcio com braquiária e crotalária.

Tabela 13. Teores foliares de macronutrientes do cafeeiro em amostras de folha coletadas, aos 63 dias após a dessecação das plantas de cobertura em consórcio com plantas de café.

Tratamentos	N	S	P	K	Ca	Mg
	g kg ⁻¹					
Cs	22,5	0,98 b	1	17,1	7	2
C _{VE}	23,9	0,87 b	1	16,1	7	2
C _B	24,3	1,08 a	1	16,5	8	2
C _M	22,4	0,95 b	2	16,8	8	2
C _{CS}	23,6	1,19 a	1	16,4	8	3
C _{FP}	23,8	0,94 b	1	16,9	7	2
Média Geral	23,40	1,00	1	16,63	7,53	2,20
Faixa adequada	25 - 30	1,5 - 2,0	1,5 - 2,0	20 - 30	10 - 15	3,0 - 5,0
CV (%)	10,57	11,61	11,4	7,31	15,51	15,83
F	0,39 ^{Ns}	3,91*	0,84 ^{Ns}	0,36 ^{Ns}	1,26 ^{Ns}	1,99 ^{Ns}

Cs: parcelas com controle da vegetação espontânea; C_{VE}: consórcio de plantas de café com vegetação espontânea; C_B: consórcio com braquiária; C_M: consórcio com milheto; C_{CS}: consórcio com crotalária; C_{FP}: consórcio com feijão-de-porco.

Faixa adequada: Faixa de teores adequados de macronutrientes segundo Quaggio et al. (2022).

Ns: não significativo; *, **: significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Letras seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Moreira et al. (2014), em experimento com plantas de cobertura na cultura do milho, observaram que a braquiária, dentre as plantas cultivadas (naboforageiro, milheto, *Urochloa ruziziensis* e *U. decumbens*, crotalária-juncea, tremoço, aveia-preta e girassol), foi a que resultou em menor teor de S nas folhas das plantas de milho, diferente do ocorrido na planta do cafeeiro, neste trabalho.

Alecrim et al. (2019), em seu trabalho cultivando feijão-de-porco, mucuna-anã, amendoim forrageiro e *Urochloa decumbens* na entrelinha do café em diferentes distâncias, constataram que a planta que mais apresentou incrementos nos macronutrientes foliares foi o feijão-de-porco, principalmente para os teores de Mg, S e Ca, além também de proporcionar bom incremento de N.

5. CONCLUSÃO

O cultivo das plantas de cobertura em consórcio com o cafeeiro não resultou em aumento nos teores totais de C e N e nem nas frações particuladas grossa, fina e associada aos minerais. Apesar disso, com base no cálculo do índice de manejo do carbono (IMC), foi possível identificar maior ganho de qualidade do solo, em curto prazo, com cultivo de feijão-de-porco e milho. Mesmo com o ganho de qualidade do solo, os efeitos das plantas de cobertura nos teores de macronutrientes nas folhas do cafeeiro foram pequenos, provavelmente devido ao curto período de tempo transcorrido entre o cultivo das plantas e a amostragem das folhas, além de ter sido avaliado o efeito de apenas um ciclo de cultivo das plantas de cobertura, demonstrando a necessidade de estudos de longa duração para indicar as espécies que, além de beneficiar o solo, favoreçam a nutrição da cultura do cafeeiro.

6. LITERATURA CITADA

ALECRIM, A. D. O.; SILVA, J. E.; MENICUCCI NETO, P.; GUIMARÃES, R. J.; CASTANHEIRA, D. T.; RESENDE, L. S.; VOLTOLINI, G. B.; LIMA, K. J. M. Atributos químicos do solo, teores foliares e crescimento de cafeeiros consorciados com plantas de cobertura. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 10., 2019, Vitória – ES: **Anais...** Embrapa Café, 2019. 5 p. Disponível em: < <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/12656>> Acesso em: 04 nov. 2022.

ALVES, M. D. S. **Plantas de cobertura no manejo de invasoras, no estoque de carbono do solo e na produtividade do guaranazeiro (*Paullinia cupana* var. *sorbilis* (Mart.) Ducke).** 2022. 75 f. Tese (Doutorado em Agronomia Tropical - Faculdade Federal do Amazonas, 2022.

BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 46, p. 1459-1466, 1995.

BLISKA, F. M. M.; GUILHOTO, J. J. M.; IMORI, D.; VEGRO, C. L. R.; CAMARGO, F. S.; SAKON, F. M. Geração de emprego na cafeicultura brasileira. In: Simpósio de Pesquisa dos cafés do Brasil, 6., 2009, Vitória. **Resumos...** Brasília, D.F.: Embrapa Café, 2009. 7 p. Disponível em: <<http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/2760>>. Acesso em: 15 set. 2021.

BOTELHO, C. E.; SOARES, T. L.; OLIVEIRA, A. C. B.; PEREIRA, A. A. Cultivares de café e suas principais características agronômicas e tecnológicas. **Informe Agropecuário**, v. 29, p. 31-41, 2008.

BRANDÃO, R. P.; RODRIGUES, R. B. R. Manejo da adubação potássica em cafeeiro em produção. **Revista Attalea Agronegócio**, 2016. Disponível em: <<https://revistadeagronegocios.com.br/grupo-vittia-biosoja-manejo-da-adubacao-potassica-em-cafeeiro-em-producao/>>. Acesso em: 04 mai. 2022.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3. ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2013. 686 p.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas.** Campinas: Instituto Agrônomo, 2009. 77 p.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 777-783, 1992.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. **Determinação da matéria orgânica**. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Eds.) *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agronômico, 2001a. p. 173-180.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. **Determinação de nitrogênio total em solo**. In: Raij, B van, Andrade, J. C.; Cantarella, H.; Quaggio, J. A. ed. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas, Instituto Agronômico, 2001b. p. 262-269.

CAPRIEL, P. Hydrophobicity of organic matter in arable soils: influence of management. **European Journal of Soil Science**, v. 48, p. 457-462, 1997.

CARMO, C. A. F. S. DO.; ARAÚJO, W. S. DE; BERNARDI, A. C. C.; SALDANHA, M. F. C. **Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 41 p.

CHAVES, J. C. D.; MIYAZAWA, M.; FANTIN, D. Manejo da biomassa de adubo verde para diminuir as perdas de nitrogênio e potencializar a nutrição do cafeeiro. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 8., 2013, Salvador – BA. **Anais...** Embrapa Café, 2013. 6 p. Disponível em: < http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcb_anais/simposio8/162.pdf> Acesso em: 04 nov. 2022.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café**. Safra 2021, segundo levantamento. Brasília: CONAB, 2021. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Conjunturas da Agropecuária**. Café – Conjuntura Semanal – 18.04 a 22.04.2022, 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-de-conjunturas-de-cafe/item/18015-cafe-conjuntura-semanal-18-04-a-22-04-2022>>. Acesso em: 26 abr. 2022.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café**. Safra 2022, terceiro levantamento. Brasília: CONAB, setembro, 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>. Acesso em: 06 set. 2022.

COSTA, M. B. B.; CALEGARI, A.; MONDARDO, A.; BULISANI, E. A.; WILDNER, L. P.; ALCÂNTARA, P. B.; MIYASAKA, S.; AMADO, T.J.C. **Adubação verde no sul do Brasil**. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1993. 346 p.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, DP; KÖGEL-KNABNER, I. Estoques de carbono e nitrogênio em frações físicas de um Acrisol subtropical influenciado por sistemas de plantio direto de longo prazo e adubação nitrogenada. **Plant and Soil**, v. 268, p. 319-328, 2005.

DUVAL, M. E.; GALANTINI, J. A.; IGLESIAS, J. O.; CANELO, S.; MARTINEZ, J. M. WALL, L.; Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. **Soil and Tillage Research**, v. 131, p. 11-19, 2013.

FREITAS, R. A.. **Controle de plantas espontâneas e aporte de nitrogênio em área cultivada com cafeeiro através do manejo de plantas de cobertura de solo**. 2017. 39 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Orgânica) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2017.

GONÇALVES, A. D. M. A.; CARVALHO, A. M.; VEIGA, A. D.; ROCHA, O. C. Decomposição e ciclagem de nitrogênio no consórcio entre café e brachiaria no cerrado. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 10., 2019, Vitória. Resumos... Brasília, DF: Embrapa Café, 2019, 6 p. Disponível em: <<http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/12591>>. Acesso em: 15 set. 2021.

GREENHOUSE, S.W.; GEISSER, S. On methods in the analysis of profile data. **Psychometrika**, v. 24, p. 95-112, 1959. DOI: 10.1007/BF02289823.

IMBANA, R., BLUM, S. C., DE AGUIAR, M. I., DE SOUSA, G. G., NDAMI, M., & DABÓ, I. Leguminosas como plantas de cobertura para melhoria da qualidade do solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 16, n. 4, p. 351-357. 2021.

JILLING A, KANE D, WILLIAMS A, YANNARELL AC, DAVIS A, JORDAN NR, KOIDE RT, MORTENSEN DA, SMITH RG, SNAPP SS, SPOKAS KA, GRANDY AS. Rapid and distinct responses of particulate and mineral-associated organic nitrogen to conservation tillage and cover crops. **Geoderma**, v. 359, 114001, 2020.

LAMAS, F.M. Plantas de cobertura: O que é isso? **Embrapa Agropecuária Oeste**, 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/28512796/artigo---plantas-de-cobertura-o-que-e-isto>>. Acesso em: 26 abr. 2022.

LAURITO, H. F. **Frações de carbono e nitrogênio mineralizável no solo em sistema de integração lavoura-pecuária**. 2021. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônoma) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2018.

LIU, J.; HUE, N. V. Ameliorating subsoil acidity by surface application of calcium fulvates derived from common organic materials. **Biology and Fertility of Soils**, v. 21, 4, p.264-270, 1996.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Sementes e mudas**: cultivares registradas. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 07 ago. 2021.

MOREIRA, S. G., LUPP, R. M., DE LIMA, C. G., MARUCCI, R. C., DE RESENDE, Á. V., & BORGES, I. D. Massa seca e macronutrientes acumulados em plantas de milho cultivadas sob diferentes espécies de cobertura. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13,, p. 218-231, 2014.

NANZER, M. C., ENSINAS, S. C., BARBOSA, G. F., BARRETA, P. G. V., DE OLIVEIRA, T. P., DA SILVA, J. R. M., & PAULINO, L. A. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, p. 136-145, 2019.

PEREIRA, N. S.; SOARES, I.; MIRANDA, F. R. Decomposition and nutrient release of leguminous green manure species in the Jaguaribe-Apodi region, Ceará, Brazil. **Ciência Rural**, v. 46, p.970–975, 2016.

PEREZ, A. M.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; COSTA, L. M. Impactos da implementação de um sistema agroflorestal com café na qualidade do solo. **Agropecuária Técnica**, v. 25, p. 25-36, 2004.

PERIN, A.; SANTOS, R. H. S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J. G. M.; CECON, P. R. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 35-40, 2004.

POIRIER, N.; SOHI, S. P.; GAUNT, J. L.; MAHIEU, N.; RANDALL, E. W.; POWLSON, D. S.; EVERSHED, R. P. The chemical composition of measurable soil organic matter pools. **Organic Geochemistry**, v. 36, p. 1174-1189, 2005.

QUAGGIO, J.A.; THOMAZIELLO, R.A.; RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. Café. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; MATTOS Jr., D.; BOARETTO, R.M.; RAIJ, B. van **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2022. p. 165-176.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA H.; QUAGGIO, J. A. Boletim Técnico 100. **Recomendações de Adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Estimulantes. Instituto Agrônomo: Fundação IAC,. v. 2. p. 97-101, 1997.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. J.; GUILHERME, L. R. G. Frações oxidáveis do carbono orgânico de Latossolo cultivado com café em diferentes espaçamentos de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 429-437, 2008.

ROSNER, B. Percentage Points for a Generalized ESD Many-Outlier Procedure. **Technometrics**, v. 25, p. 165-172, 1983.

ROSSI C.Q., PEREIRA M.G., GIÁCOMO S.G., BETTA M., POLIDORO J.C. Frações lábeis da matéria orgânica em sistema de cultivo com palha de braquiária e sorgo. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, p. 38-46, 2012.

SANTOS, G. S. **Influência de plantas de cobertura e milho em sucessão nos atributos químicos do solo e na colonização micorrizas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2018.

SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C., OLIVEIRA, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 5 ed. Brasília: Embrapa, 2018. 285 p.

SEBEN JUNIOR, G. D. F.; CORÁ, J. E.; LAL, R. Agregação do solo de acordo com a dinâmica de carbono e nitrogênio em solo sob diferentes sistemas de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1652-1659, 2016.

SILVEIRA, M. L. A. Dissolved organic carbon and bioavailability of N and P as indicators of soil quality. **Scientia Agricola**, v. 62, p. 502-508, 2005.

STROSSER, E. Methods for determination of labile soil organic matter: an overview. **Journal of Agrobiology**, v. 27, p. 49-60, 2010.

TATE, K. R.; ROSS, D. J.; FELTHAM, C. W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: effects of experimental variables and some different calibration procedures. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, p. 329-335, 1988.

THOMAZINI, A.; AZEVEDO, H. C. A.; PINHEIRO, P. L.; MENDONÇA, E. S. Atributos físicos do solo em diferentes sistemas de manejo de café, na região sul do Espírito Santo. **Coffee Science**, v. 8, p. 450-459, 2013.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Potassium dynamics in crop residues of cover plants in Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1609-1618, 2008

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 609-618, 2005.

URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; ZOTARELLI, L.; ALVES, B. J. R., BODDEY, R. M. Manejo de sistemas agrícolas para o sequestro de carbono no solo. **Conhecimentos e técnicas avançadas para o estudo dos processos da biota no sistema solo-planta**. Brasília, DF: Embrapa; 2005. p. 257-73

VAN SOEST, P. J. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2.ed. Ithaca, Cornell University Press, 1994. 476 p.

WEIL, R. R.; ISLAM, K. R.; STINE, M. A.; GRUVER, J. B.; SAMSON-LIEBIG, S. E. Estimating active carbon for soil quality assessment: a simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 18, p. 3-17, 2003.

YOUKHANA, A.; IDOL, T. Addition of Leucaena-KX2 mulch in a shaded coffee agroforestry system increases both stable and labile soil C fractions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, p. 961-966, 2011.