



Carbono orgânico no solo sob mata nativa e florestas plantadas em longo prazo

Rafael Malfitano Braga^{1*}, Francisco de Assis Braga², Nelson Venturin¹

¹Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, CP. 3037, CEP 37200-900, Lavras, MG, Brasil

²Universidade Federal de Viçosa, Campus de Florestal, Rodovia LMG 818, km 6, s/n, Campus Universitário, CEP 35690-000, Florestal, MG, Brasil

***Autor correspondente:**

rafael.malfitano@hotmail.com

Termos para indexação:

Carbono no solo
Eucalipto
Pinus

Index terms:

Soil carbon
Eucalyptus
Pinus

Histórico do artigo:

Recebido em 10/06/2020
Aprovado em 29/11/2021
Publicado em 16/09/2022

Resumo - A matéria orgânica do solo (MOS) exerce papel fundamental para a sustentabilidade de ecossistemas florestais. O estudo das frações da MOS possibilita avaliar a qualidade do solo sob florestas nativas ou plantadas. O objetivo dessa pesquisa foi comparar o carbono orgânico sob mata nativa e florestas plantadas, em longo prazo. Foram avaliados os estoques de carbono orgânico total (COT), as frações leve (COL) e pesada (COP) e o índice de manejo do carbono (IMC) da camada superficial de Latossolo Vermelho distroférrico, sob plantios de quatro espécies de eucaliptos australianos - *Eucalyptus grandis*, *E. pilularis*, *E. cloeziana* e *Corymbia maculata* - e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com 40 anos de idade, e sob Floresta Estacional Semidecidual. *C. maculata* manteve estoques de COT, COP e de COL e o IMC em níveis similares aos encontrados sob a mata nativa, sendo considerada a espécie mais eficiente na ciclagem e estocagem de carbono no solo, seguida por *E. cloeziana*. *E. pilularis* e o pinus apresentaram os menores estoques de carbono e IMC.

Organic carbon in the soil under native forest and planted forests in the long-term

Abstract - Soil organic matter (MOS) plays fundamental role in the regulation and sustainability of forest ecosystems. The soil carbon fractions (COS) from planted forests makes possible assessing changes in the ecosystem, especially if compared to native forests. The objective of this research was to evaluate the organic carbon under planted forests, in the long-term. Total organic carbon (COT), light (COL) and heavy (COP) carbon fractions, as well as the carbon management index (CMI) of a Dark Red Latosol were evaluated under *Eucalyptus grandis*, *E. pilularis*, *E. cloeziana*, *Corymbia maculata* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* with 40 years old, and under a Seasonal Semideciduous Forest remnant. *C. maculata* kept the COS, COL and COP fractions and the IMC at similar levels to those found under native forest. It was considered the most efficient species in cycling and carbon stock in the soil, followed by *E. cloeziana*. *E. pilularis* and the pine showed the lowest levels of carbon stock.



Introdução

Os ciclos biogeoquímicos são componentes de processos dinâmicos em ecossistemas florestais (Vargas et al., 2018), notadamente nas regiões tropicais onde predominam solos intemperizados e de baixa fertilidade (Laclau et al., 2010). Nessas regiões, a manutenção ou melhoria da qualidade do solo é crucial para assegurar a sustentabilidade florestal (Binkley & Fisher, 2019).

Nesse contexto, torna-se imprescindível avaliar os efeitos do uso e do manejo florestal na qualidade do solo (Freitas et al., 2017). Mas a identificação de atributos indicadores da qualidade do solo esbarra na multiplicidade de aspectos químicos, físicos e biológicos envolvidos nos processos biogeoquímicos (Mendes et al., 2009).

A matéria orgânica do solo (MOS) se destaca como um dos atributos mais utilizados para avaliar os efeitos de sistemas de uso e manejo na qualidade do solo (Araújo et al., 2012), pois desempenha papel fundamental em seu funcionamento, afetando processos físicos, químicos e biológicos (Silva & Mendonça, 2007). A MOS afeta a estrutura e a aeração, a disponibilidade de água e o ciclo de nutrientes, dentre outros fatores e, portanto, a sustentabilidade da produção florestal (Binkley & Fisher, 2019).

Desta forma, a perda da MOS representa o ponto de partida para a degradação do sistema, pois afeta diversos atributos numa reação em cadeia (Roscoe et al., 2006). Entretanto, a resposta da MOS frente ao uso e manejo do solo pode ser lenta, podendo levar décadas para ser detectada em camadas mais profundas (Dean et al., 2017).

A substituição da vegetação nativa por florestas plantadas de folhosas geralmente pouca afeta a MOS, ao passo que os reflorestamentos com coníferas tendem a reduzi-la (Guo & Gifford, 2002). Assim, estudos da MOS têm-se constituído numa valiosa ferramenta para a avaliação dos efeitos do reflorestamento na qualidade do solo, em longo prazo (Alcântara Neto et al., 2011; Aragão et al., 2012; Barreto et al., 2014; Dean et al., 2017).

A MOS é composta por resíduos animais e vegetais, em diversos estádios de decomposição, podendo ser fracionada nas frações leve (MOL) e pesada (MOP), e os seus teores utilizados como indicadores de alterações e de qualidade do solo (Silva & Mendonça, 2007).

A MOL é considerada lábil, pois a sua mineralização é rápida (semanas ou meses). É constituída por resíduos

vegetais parcialmente decompostos, substâncias não-húmicas e não ligadas aos constituintes minerais do solo, formas solúveis em água, macroorganismos (fauna) e biomassa microbiana, localizando-se inter e intragregados no solo. A MOP é conhecida por não-lábil e encontra-se em estágio avançado de decomposição, sendo formada por substâncias húmicas estáveis e mais resistentes ao ataque microbiano, em função da sua estrutura molecular e da proteção conferida pela associação com o silte e a argila do solo, que forma organominerais (Silva & Mendonça, 2007; Barros, 2013).

A quantificação das frações que compõem a MOS permite a separação de seus reservatórios funcionais (Nanzer et al., 2019). A MOP representa a maior proporção na MOS, mas devido à sua transformação ser mais lenta, a MOL é mais comumente utilizada como indicador de alterações na qualidade do sistema solo (Lima et al., 2008; Silva et al., 2011).

Para uma avaliação comparativa de qualidade ambiental, é comum a utilização de áreas de referência e avaliações temporais, que são técnicas complementares, mas prevalecendo as comparações com áreas de vegetação nativa com baixa intervenção antrópica (Mendes et al., 2009).

Nesse contexto, o índice de manejo de carbono (IMC) permite realizar comparações entre ecossistemas em avaliação com um ecossistema de referência, geralmente uma área de vegetação nativa com baixa intervenção (Blair et al., 1995). O IMC considera o estoque e a labilidade do carbono do solo. Quanto mais próximos os valores de IMC da área estudada comparada à área de referência, melhor será a qualidade do solo ou menores são os efeitos promovidos pelo uso e manejo (Conceição et al., 2014).

Em termos de amostragem, inúmeros estudos sobre a MOS (Lima et al., 2008; Fontana et al., 2011; Silva et al., 2011, 2012; Aragão et al., 2012; Matoso et al., 2012; Barreto et al., 2014; Denardin et al., 2014; Conceição et al., 2015; Melo et al., 2017; Nanzer et al., 2019; Souza et al., 2019a, 2019b) têm demonstrado que a detecção de alterações na qualidade do solo decorrentes de uso e manejo é a mais eficaz na camada superficial (0-5 cm ou 0-10 cm). As análises de perfis a maiores profundidades indicam que ocorre um efeito de diluição, notadamente da MOL (Silva et al., 2011; Morales et al., 2012). O sucesso de estudos envolvendo os solos depende da variável estudada e do seu comportamento em profundidade no perfil, sendo fundamental a adoção

de amostragem correta, para que se possa encontrar o resultado procurado com esforço amostral adequado (Medina Sotomayor, 2009).

O objetivo dessa pesquisa foi avaliar o efeito do reflorestamento no carbono orgânico do solo em longo prazo. A hipótese é que as florestas plantadas seriam capazes de atingir níveis de carbono no solo próximos aos encontrados em um ecossistema florestal nativo em longo prazo.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi realizada em área experimental de avaliação de espécies e procedências de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., instalada pelo projeto PRODEPEF/UNDP/FAO/IBDF/BRA-45 em janeiro de 1974, no Campus da Universidade Federal de Lavras, nas coordenadas 21°13'43" S e 44°58'00" W, em Lavras, MG (Moura et al., 1980).

A topografia regional é suave ondulada, com declividades entre 5% e 15% e a altitude média é de 925 m. O clima é do tipo Cwa (subtropical temperado mesotérmico), de acordo com a classificação climática de Köppen, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual é de 19,5 °C, variando de 16 °C em julho a 21,9 °C em fevereiro, com a média das mínimas de 14,4 °C e a média das máximas de 22,5 °C. A precipitação média anual é de 1.511 mm, com 84% das chuvas concentradas entre outubro e março (Dantas, et al., 2007; Junqueira Junior, 2019). A cobertura vegetal predominante é Floresta Estacional Semidecidual em transição para Cerrado (Moura et al., 1980).

O solo da área é um Latossolo Vermelho distroférrico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018), originalmente coberto por Floresta Estacional Semidecidual Montana. O preparo da área constou do corte raso da vegetação nativa, com remoção dos resíduos com trator de esteiras, aração e gradagem. O plantio seguiu alinhamento em nível, sendo as mudas plantadas em covas abertas manualmente. No ato de plantio, cada muda recebeu 70 g da formulação N:P:K 9:30:5 + B + Zn (Moura et al., 1980).

Após o plantio em campo, as mudas receberam coroamento manual com enxada e as entrelinhas foram submetidas à roçada mecânica, nos primeiros dois anos. Não foram realizadas adubações de cobertura, podas ou desbastes.

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições, sendo cada unidade amostral (parcela) constituída por 25 árvores, plantadas em arranjo 5 x 5 e espaçadas em 3 x 2 ou 3 x 3 m, respectivamente, para eucaliptos ou pinus (Moura et al., 1980).

Seleção das espécies

No presente estudo, foram avaliadas quatro espécies de eucalipto e uma de pinus, sendo: *Eucalyptus grandis* Hill. ex. Maiden, *E. pilularis* Sm., *E. cloeziana* F. Muell., *Corymbia maculata* (Hook.) K.D. Hill & LAS. Johnson e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W. H. G. Barrett & Golfari. Na escolha das espécies, considerouse a relevância em território nacional e a integridade das unidades amostrais na área experimental.

Um remanescente de Floresta Estacional Semidecidual em estágio avançado de regeneração, com 6,35 ha e adjacente à área experimental, coordenadas 21°13'40" S e 44°57'50" W (Nunes et al., 2003), foi considerado controle da condição original do solo. No fragmento, foi realizado um censo em área total e encontrados 6.527 indivíduos arbóreos com diâmetro na base do caule maior ou igual a 5 cm, pertencentes a 136 espécies botânicas (Oliveira-Filho et al., 1994).

Amostragem de solo

Em janeiro de 2014, decorridos 40 anos da implantação do experimento, foram coletadas quatro amostras compostas de solo na profundidade de 0-5 cm, sendo uma amostra por parcela. Na amostragem, cada parcela foi subdividida em quatro quadrantes, sendo coletada uma amostra no centro de cada quadrante e uma amostra no centro da parcela, perfazendo cinco amostras simples, que homogeneizadas configuraram a amostra composta da parcela.

Foram coletadas quatro amostras compostas de solo na área de mata nativa, conformadas a partir de cinco amostras simples cada, obtidas através de caminhamento aleatório, respeitando-se uma distância mínima de 200 m entre cada ponto de coleta simples.

As amostras foram coletadas com auxílio de amostrador de solos a percussão, da marca Solotest, em aço carbono niquelado, com diâmetro de 50 mm, haste de 40 cm com cabeça batente e com dois anéis biselados em aço inox, permitindo uma separação a 5 cm.

Os atributos químicos da camada superficial do Latossolo Vermelho distroférrico da área experimental e da mata nativa são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos da camada de 0-5 cm de Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes ecossistemas florestais.
Table 1. Chemical attributes of the 0-5 cm layer of dystrophic Red Latosol under different forest ecosystems.

Ecossistema	pH	K	P	Prem	Ca	Mg	Al	H+Al
	H ₂ O	---mg dm ⁻³ ---		mg L ⁻¹		----- cmol _c dm ⁻³ -----		
Mata nativa	4,2	87	2,2	3,6	0,2	0,1	2,7	20,3
<i>Corymbia maculata</i>	4,0	75	2,4	6,0	0,2	0,1	3,3	23,4
<i>Eucalyptus pilularis</i>	4,2	55	2,1	4,8	0,1	0,1	2,8	19,1
<i>E. grandis</i>	4,2	52	1,8	4,6	0,1	0,1	2,5	17,6
<i>E. cloeziana</i>	4,2	41	2,3	6,0	0,1	0,1	2,6	21,1
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	4,0	42	1,5	3,9	0,1	0,1	1,8	13,4

P e K - extrator Mehlich 1; Ca, Mg e Al - extrator KCl 1 mol L⁻¹; H+Al - extrator SMP; Prem - fósforo remanescente; segundo Teixeira et al. (2017).

A textura, densidade aparente do solo, porosidade total e densidade de partículas dos perfis pouco variaram até um metro de profundidade (Braga et al., 2013, 2015). Segundo esses autores, os valores médios de textura encontrados foram de 157 ± 8 g de areia; 99 ± 5 g de silte e 746 ± 8 g de argila por kg⁻¹ de solo; densidade aparente de 0,93 ± 0,04 g cm⁻³; porosidade total de 0,633 ± 0,014 m³ e densidade de partículas de 2,53 ± 0,05 g cm⁻³.

Maiores informações sobre os atributos físicos e químicos dos perfis do Latossolo Vermelho distroférico na área experimental e na mata nativa, até um metro de profundidade, são apresentadas por Braga et al. (2013, 2014a, 2014b; 2015).

Determinação dos estoques de carbono do solo

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). A matéria orgânica leve (MOL) foi determinada pelo método de flotação em água (Anderson & Ingram, 1996).

Amostras de 50 g de TFSA foram adicionadas em 100 mL de solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹, permanecendo em repouso por 12 h. Posteriormente, a suspensão foi agitada com bastão de vidro e passada em peneira de 0,25 mm. O material retido na peneira constitui a fração MOL e areia. O material que passou através da peneira constitui a fração MOP, silte e argila. Após o peneiramento e a separação, os dois materiais foram secos em estufa a 65 °C por 72 h e depois pesados. O teor de carbono orgânico (CO) de ambas as frações foi determinado via úmida pela oxidação com o dicromato de potássio, segundo Teixeira et al. (2017), sendo o teor de carbono orgânico total (COT) obtido pela soma das frações leve e pesada (COL + COP).

Os estoques por hectare de COT e das frações COL e COP foram calculados considerando a densidade aparente do solo na camada superficial. Para tanto, amostras indeformadas foram coletadas no centro de cada unidade amostral, na profundidade de 0-5 cm, além de quatro amostras aleatórias coletadas na área de mata nativa, perfazendo assim quatro repetições por tratamento. A densidade aparente do solo foi determinada seguindo a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017).

Os estoques de carbono do solo foram calculados pela expressão $C = (Ct \times Ds \times E)/10$, onde: C = estoque de carbono (Mg ha⁻¹); Ct = teor de carbono orgânico da fração considerada (g C kg⁻¹ solo); Ds = densidade aparente do solo (g cm⁻³); E = espessura da camada (cm).

O índice de manejo do carbono (IMC), proposto por Blair et al. (1995), foi utilizado para avaliar o efeito das florestas plantadas nos estoques e na dinâmica do carbono no solo, tendo como referência a mata nativa (IMC = 100). No cálculo do IMC, utilizou-se o índice de estoque de carbono (IEC), expresso pela relação entre o COT da área reflorestada com o COT da mata nativa, e o índice de labilidade do carbono (ILC), obtido pela relação entre a labilidade do carbono (LC) de cada área estudada e da mata nativa. A LC de cada área foi calculada pela relação entre as frações COL e COP e o IMC foi calculado usando a expressão $IMC = IEC \times ILC \times 100$.

Análise estatística

Os dados dos estoques e dos índices de carbono no solo foram submetidos à análise de variância e teste F. Para as variáveis com efeito significativo (p < 0,05), as médias foram comparadas usando o teste Scott-Knott

($p < 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software SISVAR (Ferreira, 2014).

Resultados

As coberturas florestais estudadas promoveram distintos estoques de carbono orgânico do solo (Figura 1). Os maiores estoques de carbono orgânico total (COT) foram encontrados sob *Corymbia maculata* e mata nativa, atingindo níveis intermediários sob *Eucalyptus grandis* e *E. cloeziana*, e menor valor sob *E. pilularis*, dentre as quatro espécies de eucalipto, enquanto no solo sob *Pinus caribaea* var. *hondurensis* foram obtidos os menores estoques de COT.

O estoque de carbono orgânico leve (COL) sob *C. maculata* igualou-se ao da mata nativa, seguidos por *E.*

cloeziana, sendo os menores montantes observados sob *E. grandis*, *E. pilularis* e *P. caribaea* var. *hondurensis*. Os maiores percentuais de COL, em relação ao COT (em torno de 30%), foram encontrados sob mata nativa, *C. maculata* e *E. cloeziana* (Figura 2).

O maior estoque de COP foi encontrado sob *C. maculata*, seguido pela mata nativa e *E. grandis* (Figura 1), sendo os maiores valores percentuais observados sob *E. grandis*, *E. pilularis* e *P. caribaea* var. *hondurensis* (Figura 2).

Considerando os índices do carbono, *C. maculata* igualou-se ao ecossistema de referência da mata nativa, em termos de índice de estoque de carbono (IEC), labilidade do carbono (LC) e índice de manejo do carbono (IMC) (Tabela 2). Também merece destaque *E. cloeziana*, que atingiu índices de carbono próximos aos encontrados na mata nativa e *E. maculata*.

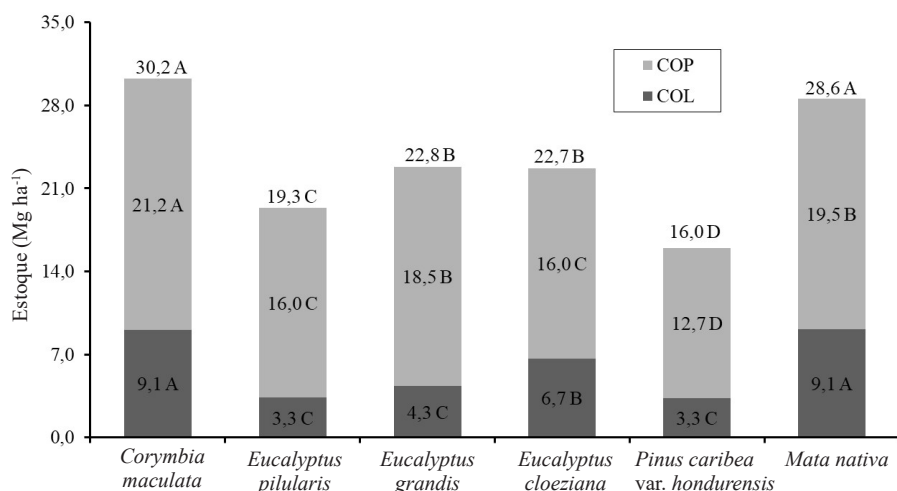


Figura 1. Estoques de carbono orgânico total no solo, leve (COL) e pesado (COP) sob diferentes coberturas florestais. As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$).

Figure 1. Total organic carbon stock of the soil and light and heavy fractions. Averages followed by the same letter do not differ by Scott-Knott's test ($p \geq 0.05$).

Figura 2. Percentuais do estoque total de carbono nas frações leve (COL) e pesada (COP), sob diferentes coberturas florestais. As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$).

Figure 2. Percentage relationship of carbon stock in light and heavy fractions. Means followed by the same letter do not differ by Scott-Knott's test ($p \geq 0.05$).

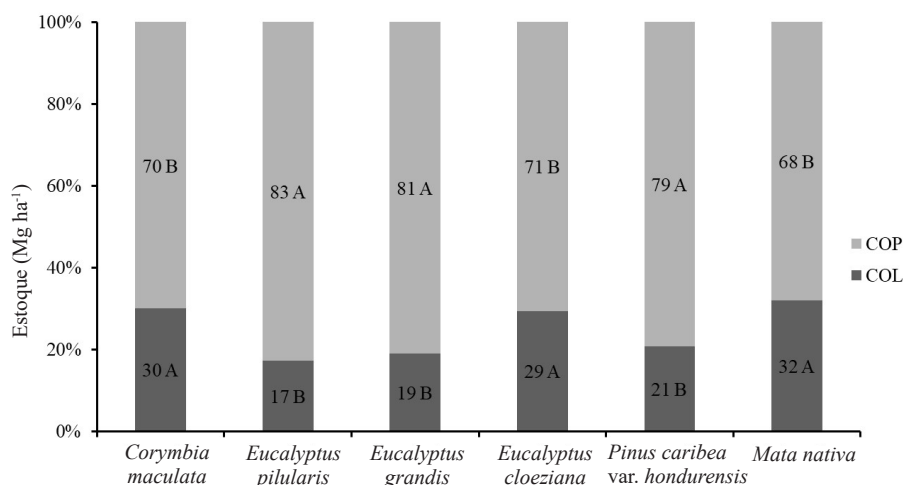


Tabela 2. Índices de carbono orgânico do solo sob diferentes ecossistemas florestais.

Table 2. Soil organic carbon indices under different forest ecosystems.

Ecossistema	IEC	LC	ILC	IMC
<i>Corymbia maculata</i>	1,05 a	0,43 a	0,91 b	95,5 a
<i>Eucalyptus pilularis</i>	0,67 c	0,21 b	0,44 d	29,5 d
<i>E. grandis</i>	0,80 b	0,23 b	0,49 c	39,2 c
<i>E. cloeziana</i>	0,79 b	0,42 a	0,89 b	70,3 b
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	0,56 c	0,26 b	0,55 c	30,8 d
Mata nativa	1,00 a	0,47 a	1,00 a	100,0 a

IEC = índice de estoque do C; LC = labilidade do C; ILC = índice de labilidade do C; IMC = índice de manejo do C. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Scott Knott ($p \geq 0,05$).

Discussão

A substituição da floresta nativa por reflorestamento com eucaliptos afetou os estoques de matéria orgânica do solo (MOS) na camada de 0-5 cm em intensidade menor do que o reflorestamento com pinus. Uma metanálise revelou que espécies de coníferas podem reduzir em até 15% o estoque de MOS, ao passo que espécies de folhosas apresentam menor efeito (Guo & Gifford, 2002). Constatamos que *Pinus caribaea* var. *hondurensis* reduziu 44% do carbono orgânico total (COT) da camada superficial do solo em relação à mata nativa, ao passo que os eucaliptos reduziram até 32%, exceto *Corymbia maculata*, que elevou o COT em 5%.

A manutenção ou aumento do estoque de MOS é essencial para a qualidade do solo e a sustentabilidade da produção florestal (Binkley & Fisher, 2019), particularmente em regiões tropicais, com solos antigos, altamente intemperizados e oligotróficos (Laclau et al., 2010), como é o caso do Latossolo Vermelho distroférico do presente estudo.

Na literatura há inúmeros relatos de redução, aumento ou mesmo de manutenção da MOS sob plantios de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. em comparação com a vegetação nativa. Esses resultados, aparentemente contraditórios, decorrem basicamente das diferentes condições mesológicas, espécies e idades pesquisadas (Rangel & Silva, 2007; Lima et al., 2008; Pulrolnik et al., 2009; Demessie et al., 2012; Silva et al., 2012; Primieri et al., 2017), além de diferenças metodológicas, como a profundidade de amostragem do solo (Montero & Delitti, 2018).

A MOS é afetada pelo aporte, a decomposição e a qualidade da serapilheira depositada, determinando um estado de equilíbrio dinâmico entre entradas e saídas de carbono e nutrientes no solo florestal (Loss et al., 2012).

O aporte de serapilheira em plantios de eucaliptos é maior do que sob pinus (Demessie et al., 2012). Apesar disso, os pinus acumulam mais serapilheira, devido aos maiores teores de polifenóis, resinas e lignina, e uma relação C:N mais alta (Pulrolnik et al., 2009; Viera & Schumacher, 2010; Montero & Delitti, 2018), limitando e restringindo o processo de decomposição a alguns microrganismos específicos (Rovira & Vallejo, 2002; Rigobelo & Nahas, 2004).

Eucaliptos e pinus são eficientes no uso de nutrientes, apresentando alta produtividade de biomassa em solos oligotróficos (Laclau et al., 2010), apesar de suas folhas decíduas terem baixas concentrações de N (Montero & Delitti, 2018). O aumento da relação C:N reduz a qualidade da serapilheira, com implicações na MOS, na ciclagem de nutrientes e na fertilidade do solo (Binkley & Fisher, 2019).

O aporte e a decomposição contínua de serapilheira de baixa qualidade (alta relação C:N) pelos plantios de pinus e eucaliptos pode levar à perda da qualidade da MOS, pois novas substâncias orgânicas são gradualmente incorporadas ao solo, substituindo lentamente a MOS original (Maquere et al., 2008).

As alterações na MOS sob cobertura florestal dependem do tempo e da profundidade no perfil do solo. As camadas mais profundadas levam mais tempo para manifestar os efeitos da alteração da cobertura vegetal na MOS, sendo improvável a sua detecção entre rotações sucessivas de corte, mas passível de detecção através de comparações com a vegetação nativa (Dean et al., 2017). Montero & Delitti (2018) observaram substituição da MOS somente na profundidade de 5 cm, em plantios de pinus e eucaliptos com 30 anos, o que corrobora o que foi observado neste estudo.

Portanto, além de reduzir os estoques de MOS, as florestas plantadas de eucaliptos e pinus podem ainda comprometer a qualidade da MOS, os ciclos biogeoquímicos e a fertilidade do solo, sendo o efeito determinado pela espécie, o aporte e a qualidade da serapilheira depositada no piso florestal. Em solos tropicais intemperizados e lixiviados, como é o caso do Latossolo Vermelho distroférico objeto desse trabalho, é relevante que a espécie florestal plantada seja eficiente no uso e na ciclagem dos nutrientes disponíveis e que

mantenham estoques de carbono e de fertilidade similares ou superiores aos encontrados no solo original (Laclau et al., 2010; Demessie et al., 2012). Constatou-se que, das cinco espécies florestais estudadas, somente o *C. maculata* manteve estoques similares de carbono no solo em relação à mata nativa, o que não refuta a possibilidade de alteração na qualidade da MOS também por essa espécie.

Além do estoque de COT, a fração de matéria orgânica leve (MOL) atua como indicadora da qualidade do solo (Rangel & Silva, 2007; Lima et al., 2008; Nanzer et al., 2019; Souza et al., 2019a, 2019b). A MOL é composta de resíduos vegetais parcialmente decompostos, sendo sensível às mudanças na qualidade e no aporte de serapilheira, tipo de cobertura florestal e outros fatores que possam alterar o equilíbrio entre a produção e a decomposição da MOS (Silva & Mendonça, 2007).

A manutenção do estoque de MOL dependente da capacidade da cobertura vegetal de adicionar resíduos à superfície do solo e de relações C/N e lignina/N favoráveis à sua mineralização (Faccin et al., 2016). Em geral, os maiores valores de MOL são encontrados na camada superficial do solo, devido à maior adição e decomposição de resíduos vegetais (Rossi et al., 2011). Por outro lado, a matéria orgânica pesada (MOP) é menos alterada por variações na cobertura vegetal em curto prazo (Loss et al., 2011).

AMOL apresenta correlação negativa com a quantidade de serapilheira acumulada, sendo diretamente associada à qualidade dos resíduos depositados no piso florestal (Barreto et al., 2014). Nesta pesquisa, observou-se que o COL representou entre 17 e 30% do COT do solo sob eucaliptos, sendo os maiores percentuais encontrados sob *C. maculata* e *E. cloeziana*, ambos similares aos obtidos sob a mata nativa (Figuras 1 e 2). No caso do pinus, foi encontrado 21% de COL, similar ao registrado para *E. grandis* e *E. pilularis*, sinalizando para as possibilidades de menor aporte e/ou taxa de decomposição e de qualidade das serapilheiras dessas espécies.

Diniz et al. (2011) compararam o aporte de serrapilheira entre uma área cultivada com um híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* e um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, ambos com 30 anos. A cultura depositou 2,4 Mg ha⁻¹, enquanto a mata nativa cerca de 1,4 Mg ha⁻¹. A serapilheira da mata nativa apresentou um tempo médio de decomposição de 58 dias e a do eucalipto foi de 151 dias, segundo os autores da pesquisa, devido à maior proporção entre galhos e folhas, maiores teores de polifenóis e lignina e maior relação C:N.

Maiores relações C:N e lignina:N acarretam menores taxas de decomposição da serapilheira, favorecendo a elevação do COP, mais estável e ligado às frações argila e silte, o que resultou nos organominerais (Silva & Mendonça, 2007). Portanto, as maiores proporções de COP (Figura 2) sob pinus, *E. grandis* e *E. pilularis* podem ser relacionadas à pior qualidade da serapilheira dessas espécies. O fato de *E. grandis* e *E. cloeziana* apresentarem estoques similares de COT, e maior proporção de COP sob o *E. grandis*, corroboram essa ideia (Figura 1 e 2). Por sua vez, *C. maculata* sustentou os maiores estoques de COT, COL e COP, esse último, inclusive, superior ao encontrado sob a mata nativa.

O processo de decomposição da MOS se inicia com a formação de MOL, passando para MOL oclusa em macro e microagregados e, finalmente, para a formação e estabilização da MOP. Todas as fases são determinantes para a manutenção da MOS no solo (Nanzer et al., 2019). Nessa pesquisa foi observado que o COP representou entre 68 a 83% do COT. A fração de COP apresenta maior recalitrância, associada à maior dificuldade de decomposição pelos microrganismos (Faccin et al., 2016), o que pode explicar os seus maiores teores encontrados no solo. O Latossolo Vermelho distroférrico muito argiloso ora estudado, apresenta altos teores de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, contribuindo para elevar o estoque e a estabilidade do COT, devido à sua alta capacidade de formação de organominerais (Roscoe & Buurman, 2003).

Finalmente, cabe comentar sobre o índice de manejo de carbono (IMC), que avalia conjuntamente as alterações nos estoques de carbono orgânico e na labilidade do carbono orgânico do solo. Nesse caso, valores inferiores a 100 indicam comprometimento em a manutenção da matéria orgânica e a qualidade do solo (Conceição et al., 2014). No presente estudo, somente *C. maculata* manteve valor do IMC de 95,5%, estatisticamente igual aos 100% da mata nativa, confirmando tratar-se da espécie mais eficaz dentre as estudadas, no uso e na ciclagem de carbono. Merece destaque *E. cloeziana*, suportando um IMC = 70,3% em relação à mata nativa, comprometido pelo menor estoque de COT.

Em termos do índice de estoque do C (IEC), que relaciona o estoque de COT da mata nativa com o encontrado nos plantios florestais, além de *C. maculata*, podemos destacar *E. grandis* e *E. cloeziana*, em segundo lugar. Adicionalmente, *C. maculata* e *E. cloeziana* apresentaram valores similares do índice de labilidade

do C (ILC) aos encontrados na mata nativa, indicando que são de espécies com dinâmica de carbono mais adequado às condições pedoclimáticas da área de estudo, e mantidas pela vegetação nativa.

A qualidade dos sítios de origem na Austrália reporta características importantes sobre a autoecologia das espécies aqui estudadas. Segundo Carpanezzi et al. (1988) e Barros et al. (1990), *C. maculata* ocorre em sítios medianos e particularmente derivados de arenito. *E. cloeziana* apresenta uma grande plasticidade, ocorrendo sob diferentes condições edáficas. Por outro lado, *E. grandis* ocorre, preferencialmente, sobre solos úmidos, profundos, de textura média, bem drenados, de origem vulcânica ou aluviões, localizados em planícies ou nas partes baixas e vales férteis e *E. pilularis* ocorre, principalmente, em solos de textura média e cresce satisfatoriamente em solos argilosos de origem vulcânica.

Possivelmente, a ocorrência natural em sítios de baixa fertilidade na Austrália, e de certa forma comparáveis à oligotrofia do Latossolo Vermelho distroférrico desse estudo, propiciou que *C. maculata* apresentasse estoques e dinâmica de carbono no solo similares aos encontrados na Floresta Estacional Semidecidual, usada como referência nesse estudo. Vale destacar o desempenho das espécies na área experimental em termos de área basal: *E. grandis* = *C. maculata* > *E. cloeziana* = *E. pilularis* (Braga et al., 2016).

Conclusões

As coberturas de floresta natural e de florestas plantadas apresentaram distintos estoques de carbono orgânico no solo, sendo os maiores encontrados sob *Corymbia maculata* e em Floresta Estacional Semidecidual, intermediários sob *Eucalyptus grandis*, *E. cloeziana*, e menores sob *E. pilularis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. *C. maculata* destacou-se por apresentar índice de manejo do C próximo ao encontrado sob a floresta natural, sinalizando o seu maior potencial de sustentabilidade em termos de estoque e dinâmica da matéria orgânica do solo em longo prazo.

Agradecimentos

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

Referências

- Alcântara Neto, F. et al. Compartimentos de carbono em Latossolo Vermelho sob cultivo de eucalipto e fitofisionomias de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 849-856, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000300019>.
- Anderson, J. M. & Ingram, J. S. I. (ed.). **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. 2. ed. Wallingford: CAB International, 1996. 221 p.
- Aragão, D. V. et al. Avaliação de indicadores de qualidade do solo sob alternativas de recuperação do solo no Nordeste Paraense. **Acta Amazônica**, v. 42, n. 1, p. 11-18, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000100002>.
- Araújo, E. A. et al. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 5, n. 1, p. 187-206, 2012.
- Barreto, P. A. B. et al. Carbono das frações da matéria orgânica em solos sob plantações de eucalipto de diferentes idades. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 571-580, 2014.
- Barros, J. D. S. Contribuições da matéria orgânica do solo para mitigar as emissões agrícolas de gases de efeito estufa. **Polêmica**, v. 12, n. 2, p. 341-351, 2013.
- Barros, N. F. et al. Algumas relações solo-espécies de eucalipto em suas condições naturais. In: Barros, N. F. & Novais, R. F. (ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1990. p. 1-24.
- Binkley, D. & Fisher, R. F. **Ecology and management of forest soils**. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2019. 440 p.
- Blair, G. J. et al. 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. <https://doi.org/10.1071/AR9951459>.
- Braga, R. M. et al. Biomassa e atividade microbiana sob diferentes coberturas florestais. **Cerne**, v. 22, n. 2, p. 137-144, 2016. <https://doi.org/10.1590/01047760201622022083>.
- Braga, R. M. et al. Caracterização de latossolo vermelho distroférrico típico sob floresta estacional semidecidual: condições químicas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, p. 487-496, 2014a. <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2014b/AGRARIAS/caracterizacao%20de%20latossolo.pdf>.
- Braga, R. M. et al. Long-term impact of eucalyptus on the chemical characteristics of dystroferic red latosol. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 8, n. 17, p. 68-76, 2014b. <http://ajbasweb.com/old/ajbas/2014/November/68-76.pdf>.
- Braga, R. M. et al. Physical attributes of dystroferic red latosol under four eucalypt species over the long term. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n. 4, p. 313-322, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542013000400004>.
- Braga, R. M. et al. Physical characterization of a dystroferic red latosols under semideciduous seasonal forest. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 9, p. 422-428, 2015. <http://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2015/April/422-428.pdf>.

- Carpanezzi, A. A. et al. **Zoneamento ecológico para plantios florestais no Estado de Santa Catarina**. Curitiba: EMBRAPA CNPF, 1988. 113 p. (EMBRAPA-CNPF. Documentos, 21).
- Conceição, P. C. et al. Eficiência de soluções densas no fracionamento físico da matéria orgânica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 490-497, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbs20140447>.
- Conceição, P. C. et al. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, v. 44, p. 794-800, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014005000004>.
- Dantas, A. A. A. et al. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000600039>.
- Dean, C. et al. Conventional intensive logging promotes loss of organic carbon from the mineral soil. **Global Change Biology**, v. 23, n. 1, p. 1-11, 2017. <https://doi.org/10.1111/gcb.13387>.
- Demessie, A. et al. Leaf litter fall and litter decomposition under Eucalyptus and coniferous plantations in Gambo District, southern Ethiopia. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science**, v. 62, n. 5, p. 467-476, 2012. <https://doi.org/10.1080/09064710.2011.645497>.
- Denardin, R. B. N. et al. Estoque de carbono no solo sob diferentes formações florestais. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 59-69, 2014. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509813323>.
- Diniz, A. R. et al. Aporte de material decídua e nutrientes para o solo em plantio de eucalipto e floresta secundária. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 65, p. 19-26, 2011. <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.65.19>.
- Faccin, F. C. et al. Frações granulométricas da matéria orgânica do solo em consórcio de milho safrinha com capim-marandu sob fontes de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 12, p. 2000-2009, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016001200011>.
- Ferreira, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>.
- Fontana, A. et al. Avaliação dos compartimentos da matéria orgânica em área de Mata Atlântica. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 3, p. 545-550, 2011. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v33i3.5169>.
- Freitas, D. A. F. et al. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 417-428, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000300002>.
- Guo, L. B. & Gifford, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 8, n. 4, p. 345-360, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>.
- Junqueira Junior, J. A. J. Interceptação da precipitação em um fragmento de Floresta Estacional Semidecídua do Sul de Minas Gerais: estudo observacional. **Sustentare**, v. 3, n. 1, p. 109-121, 2019. <http://dx.doi.org/10.5892/st.v3i1.5717>.
- Laclau, J. P. et al. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations: main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1771-1785, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.010>.
- Lima, A. M. N. et al. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1053-1063, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300014>.
- Loss, A. et al. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 568-76, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000022>.
- Loss, A. et al. Carbon and nitrogen content and stock in no-tillage and crop-livestock integration systems in the Cerrado of Goiás State, Brazil. **The Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 8, p. 96-105, 2012. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v4n8p96>.
- Maquere, V. et al. Influence of land use (savanna, pasture, Eucalyptus plantations) on soil carbon and nitrogen stocks in Brazil. **European Journal of Tropical Science**, v. 59, n. 3, p. 863-877, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01059.x>.
- Matoso, S. C. G. et al. Frações de carbono e nitrogênio de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes usos na Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 2, p. 231-240, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000200008>.
- Medina Sotomayor, J. F. **Métodos de amostragem de solos para a determinação de carbono em três ambientes**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada). Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/91/91131/tde-26062009-142935/publico/Jaime_Sotomayor.pdf.
- Melo, V. F. et al. Qualidade química e biológica do solo em diferentes sistemas de uso em ambiente de savana. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 11, n. 2, p. 101-110, 2017.
- Mendes, I. C. et al. **Bioindicadores para avaliação da qualidade dos solos tropicais: utopia ou realidade?** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2009. 31 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 246). <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/856406/1/bioindicadores.pdf>.
- Montero, L. L. & Delitti, W. Effects of eucalyptus and pinus forest management on soil organic carbon in Brazilian Wooded-Savanna. In: Shukla, G. & Chakravarty, S. **Forest biomass and carbon**. West Bengal, Índia: Intech Open, 2018.
- Morales, C. A. S. et al. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em florestas de *Pinus taeda*. **Scientia Plena**, v. 8, n. 4, p. 1-9, 2012. <https://scientiaplenua.org.br/sp/article/view/1413/679>.
- Moura, V. P. G. et al. **Avaliação de espécies e procedências de Eucalyptus em Minas Gerais e Espírito Santo: resultados parciais**. Brasília, DF: EMBRAPA/DID, 1980. 104 p. (EMBRAPA/CPAC. Boletim de pesquisa, 1).
- Nanzer, M. C. et al. 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, n. 1, p. 136-145, 2019. <https://doi.org/10.5965/223811711812019136>.

- Nunes, Y. R. F. et al. Variações da fisionomia, diversidade e composição de guildas da comunidade arbórea em um fragmento de floresta semidecidual em Lavras, MG. **Acta Botanica Brasílica**, v. 17, p. 213-229, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-33062003000200005>.
- Oliveira-Filho, A. T. et al. Composição florística e estrutura comunitária de um remanescente de floresta semidecídua montana em Lavras, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 17, n. 2, p. 167-182, 1994.
- Primieri, S. et al. Dinâmica do carbono no solo em ecossistemas nativos e plantações florestais em Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.110314>.
- Pulrolnik, K. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1125-1136, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000500006>.
- Rangel, O. J. P. & Silva, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 1609-1623, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000600037>.
- Rigobelo, E. C. & Nahas, E. Seasonal fluctuations of bacterial population and microbial activity in soils cultivated with Eucalyptus and Pinus. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 1, p. 88-93, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162004000100015>.
- Roscoe, R. & Buurman, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 70, n. 2, p. 107-119, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00160-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00160-5).
- Roscoe, R. et al. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: Roscoe, R. et al. (ed.). **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p. 17-42.
- Rossi, C. Q. et al. Frações húmicas da matéria orgânica do solo cultivado com soja sobre palhada de braquiária e sorgo. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 622-630, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000300018>.
- Rovira, P. & Vallejo, V. R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. **Geoderma**, v. 107, n. 1-2, p. 109-141, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00143-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00143-4).
- Santos, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 353 p. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>.
- Silva, E. A. et al. Frações de carbono em topossequências de solos sob eucalipto com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1167-1178, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000400011>.
- Silva, E. F. et al. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1321-1331, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000028>.
- Silva, I. R. & Mendonça, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (ed.). **Fertilidade do solo. Viçosa**, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275-374.
- Souza, A. S. et al. Acúmulo de carbono em frações densimétricas da matéria orgânica do solo em distintos sistemas de manejo e uso na Amazônia Oriental. **Revista Caribeña de Ciencias Sociales**, v. 3, 2019a. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/03/acumulo-carbono.html/hdl.handle.net/20.500.11763/caribe1903acumulo-carbono>.
- Souza, A. S. et al. Propriedades e estoque de carbono e nitrogênio do solo na Amazônia Oriental: um estudo de caso sobre os sistemas de manejo. **Revista Caribeña de Ciencias Sociales**, v. 4, 2019b. <https://www.eumed.net/rev/oel/2019/04/carbono-nitrogenio-amazonia.html>.
- Teixeira, P. C. et al. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, DF, 2017. 574 p. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>.
- Vargas, G. R. et al. Ciclagem de biomassa e nutrientes em plantios florestais. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v. 11, n. 2, p. 111-123, 2018. <https://doi.org/10.5902/1980509826880>.
- Viera, M. & Schumacher, M. V. Deposição de serapilheira e de macronutrientes em um povoamento de acácia-negra (*Acacia mearnsii* Wild.) no Rio Grande do Sul. **Revista Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 225-233, 2010. <http://dx.doi.org/10.5902/198050981848>.