

MUDANÇAS NA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO CAUSADAS PELO TEMPO DE ADOÇÃO DE UM SISTEMA AGROSSILVOPASTORIL COM EUCALIPTO⁽¹⁾

Leonardus Vergutz⁽²⁾, Roberto Ferreira Novais⁽³⁾, Ivo Ribeiro da Silva⁽³⁾, Nairam Félix de Barros⁽³⁾, Tiago Novais Nunes⁽⁴⁾ & Antônio Augusto de Moraes Piau⁽⁴⁾

RESUMO

Sistemas agrossilvopastoris (SASPs) representam práticas de manejo agroflorestal que têm como principal objetivo permitir maior diversidade e sustentabilidade do sistema. A matéria orgânica do solo (MOS) é uma das principais propriedades indicadoras da sustentabilidade de um sistema de cultivo, principalmente em solos sob condições tropicais. Os objetivos deste trabalho foram estudar o impacto dos SASPs de cultivo do eucalipto em diferentes frações de C e N da MOS ao longo do tempo. Para isso, foi amostrada uma cronosequência composta por seis tempos de implantação dos SASPs. O tempo zero foi representado pela área de referência (Cerrado), e os demais, com dois, três, quatro, sete e 10 anos de implantação. Foram coletadas amostras de solo das camadas de 0–10, 10–20, 20–40, 40–60 e 60–100 cm, na linha e na entrelinha de cultivo do eucalipto. Foi feita a caracterização física e química desses solos, assim como as determinações de C orgânico total (COT), N total (NT), C na matéria orgânica leve (MOL), N na MOL e C oxidável por permanganato de potássio, como uma medida de labilidade do C (CL). A partir desses dados foram calculados o IMC_{CL} , que é um Índice de Manejo do C, e o IMC_{CMOL} , que é uma modificação do índice original. O estoque total de C orgânico no solo (COS) (0–100 cm) na linha de plantio do eucalipto foi mantido ao longo do tempo, enquanto na entrelinha houve tendência de perda inicial de C, sem que esses estoques retornassem aos valores originais (Cerrado) no final do décimo e último ano estudado. O estoque total de N mostrou comportamento semelhante na linha e na entrelinha de cultivo do eucalipto. Após perda inicial acentuada de N, houve tendência de acúmulo desse elemento ao longo do tempo de implantação dos SASPs. Contudo, esse acúmulo não foi sustentável e, ao final do período estudado, esses valores eram menores que os originais. A fração da MOL

⁽¹⁾ Extraído da Tese de Mestrado do primeiro autor, financiado pela FAPEMIG e CAPES. Recebido para publicação em setembro de 2008 e aprovado em novembro de 2009.

⁽²⁾ Doutorando em Solos e Nutrição de Plantas, Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa – UFV. Av. Peter Henry Rolfs s/n, CEP 36570-000 Viçosa (MG). E-mail: leonardus_vergutz@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, UFV. E-mails: rfnovais@ufv.br; ivosilva@ufv.br; nfbarros@ufv.br

⁽⁴⁾ Estudante de Graduação, Departamento de Solos, UFV. E-mails: tiagonnunes@yahoo.com.br; pia65@yahoo.com.br

foi a que apresentou as maiores alterações, confirmando sua sensibilidade a alterações de manejo. As perdas de C e N da MOL também foram maiores para a entrelinha de plantio de eucalipto do que para a linha. O C lábil (CL), assim como o índice calculado a partir dele (IMC_{CL}), não possibilitou ajustes dos seus resultados como variável do tempo de implantação dos SASPs. Entretanto, o IMC modificado, calculado a partir do C da MOL (IMC_{CMOL}), apresentou bons ajustes para todas as camadas estudadas; além disso, apresentou correlação mais elevada com o COT, mostrando-se mais indicado para a comparação dos sistemas de manejo estudados. Pôde-se perceber a importância de estudar camadas mais profundas do solo, já que elas podem apresentar perdas de C significativas e de difícil recuperação. A implantação dos SASPs acarretou diminuição dos estoques de COT das camadas superficiais, e o tempo necessário para a recuperação dos estoques originais ficou além do período máximo estudado. A fração mais sensível ao manejo adotado foi a MOL livre.

Termos de indexação: balanço de carbono, estoque de carbono, matéria orgânica leve, nitrogênio, C lábil, índice de manejo do C.

SUMMARY: CHANGES IN SOIL ORGANIC MATTER ALONG A CHRONOSEQUENCE OF AN AGROSILVIPASTORAL SYSTEM OF EUCALYPT CULTIVATION

Agrosilvipastoral systems represent agro-forestry practices that allow greater diversity and sustainability of a cropping system. Soil organic matter (SOM) is one of the main indicators of the sustainability of a cropping system, especially in tropical soils. The objectives of this study were to investigate the impact of eucalypt cultivation on different C and N of SOM fractions on agrosilvipastoral systems over time. To this end, a chronosequence consisting of six implantation times of an agrosilvipastoral system was sampled. Time zero was represented by the adjacent native vegetation (Cerrado), followed by 2, 3, 4, 7 and 10 year periods since the agrosilvipastoral system implantation in previously Cerrado land. The layers 0–10, 10–20, 20–40, 40–60, and 60–100 cm were sampled in each area, within and in-between eucalypt rows. The samples were chemically and physically analyzed to determine: total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), C in the light organic matter (LOM), N in the LOM, and C oxidizable by potassium permanganate, the labile carbon (LC). From these data, the CMI proposed by Blair et al. (1995) was calculated (CMI_{LC}), as well as the modified CMI, which is based on C in the LOM (CMI_{LOM}). In the planting row, the TOC stocks in the 0–100 cm layer remained stable over time, while in-between the rows the TOC stocks initially decreased and then recover over time, but have yet to return to the level found in the native vegetation soil. The trend for the TN stock (0–100 cm) was similar for both in and between the eucalypt rows. After a sharp initial decrease, the TN stocks recovered over the years. However, this increase was not sustained and at the end of the cycle the TN stocks were lower than the original values found for the soil under native vegetation. Major changes were observed in the free LOM fractions, confirming its great sensitivity to management changes. More free LOM C and N were lost in-between than in the rows. Labile C, as well as the CMI, were found not sensitive to describe SOM changes along the implantation time, whereas the CMI_{LOM} adjusted well for all soil layers. In addition, it was best correlated with TOC and is therefore more adequate to compare the studied cropping system. These results show the importance of studying deeper soil layers; since the loss of C at greater soil depths can be relatively high and difficult to recover. The agrosilvipastoral systems induce a decrease in soil organic C in the upper layers and the time to recover the original stocks was beyond the study period. The fraction of free light organic matter was most sensitive to the management.

Index terms: carbon balance, carbon stock, light organic matter, nitrogen, labile carbon, C management index.

INTRODUÇÃO

O eucalipto produzido no Brasil apresenta o menor ciclo dentre todas as espécies produtoras de madeira e celulose cultivadas no mundo, o que resulta em produtividades elevadas. Enquanto o eucalipto aqui

cultivado apresenta produtividade média de $45 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de madeira, florestas norte-americanas apresentam $3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Sixta, 2006). Alguma restrição ao cultivo crescente de eucalipto no País diz respeito ao seu efeito sobre o ambiente. Para que os possíveis efeitos ambientais causados pelo cultivo do

eucalipto sejam avaliados, mais estudos são necessários. O avanço das pesquisas contribui para a melhoria das técnicas de manejo adotadas e, conseqüentemente, para um sistema de cultivo com menor impacto ambiental e maior sustentabilidade.

A matéria orgânica dos solos (MOS) é a principal propriedade indicadora da sustentabilidade de um sistema de cultivo (Stevenson, 1994; Canellas & Santos, 2005; Conceição et al., 2005), principalmente em solos sob condições tropicais (Solomon et al., 2002). Nessas condições, em que os fatores climáticos atuam intensamente e os solos são bastante intemperizados, a MOS é a principal responsável pela capacidade de troca catiônica (CTC), retenção de água e estruturação do solo (Canellas & Santos, 2005). Ainda que a quantidade de estudos que abordam os aspectos quantitativos e qualitativos da MOS seja crescente, percebe-se a falta de informações sobre esse assunto, sobretudo em solos cultivados com eucalipto.

Sistemas agrossilvopastoris (SASPs) representam práticas agroflorestais de uso do solo que implicam o uso simultâneo da terra para fins de produção agrícola, florestal e pecuária. Em comparação com sistemas convencionais de uso do solo, técnicas agroflorestais têm como principal objetivo permitir maior diversidade do sistema, visando proporcionar produção florestal sustentável (Lima, 1993). O aumento da biodiversidade tem impacto positivo sobre o C orgânico do solo (COS), e ecossistemas com maior biodiversidade apresentam sequestro de C mais elevado (Lal, 2004). É fato conhecido que solos sob pastagens bem manejadas apresentam potencial elevado de acúmulo e estabilização de C no solo (Cerri et al., 2007). Com isso, espera-se que os SASPs, por consorciarem espécies florestais e pastagem, apresentem elevada taxa de sequestro de C no solo, mantendo os estoques de C encontrados na área de referência (vegetação nativa), ou até mesmo elevando-os. Para que os estoques de COS sejam mantidos ou para que haja o sequestro efetivo de C na forma de MOS, é preciso que o balanço para a razão formação/decomposição do COS seja positivo (Six et al., 2002; Jandl et al., 2007).

Em algumas situações, principalmente naquelas em que mudanças de uso do solo ou alterações no sistema de manejo foram recentemente adotadas, a MOS pode não ser um eficiente discriminador das alterações na qualidade do solo (Conceição et al., 2005). Nesse caso, o fracionamento da MOS pode aumentar essa sensibilidade. A fração do COS passível de ser oxidada por solução de KMnO_4 é tida como fração lábil da MOS. Acreditando ser esse compartimento um indicador sensível da qualidade do solo, Blair et al. (1995) propuseram o cálculo de um Índice de Manejo do C (IMC) para comparar diferentes manejos. Por apresentar boa sensibilidade e simplicidade, esse índice foi amplamente difundido e utilizado em diversos trabalhos (Naklang et al., 1999; Shrestha et al., 2002; Leite et al., 2003). Entretanto, trabalhos como os de Mendham et al. (2002) e Tirol-Padre & Ladha (2004) questionam tanto a sensibilidade do compartimento

do CL em detectar mudanças na MOS, como os resultados analíticos desse fracionamento. Para esses autores, a solução de permanganato de K pode oxidar compostos não prontamente disponíveis para os microrganismos do solo, como a lignina, por exemplo.

Os objetivos deste trabalho foram estudar o impacto do sistema agrossilvopastoril de cultivo do eucalipto em diferentes frações de C e de N da MOS, como variável do tempo de implantação dos SASPs. Adicionalmente, é sugerida uma modificação no IMC proposto por Blair et al. (1995). O IMC modificado baseia-se em uma medida do fracionamento físico da MOS, a matéria orgânica leve livre, que é bastante sensível ao manejo.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizada amostragem de solo de uma cronosequência de cultivo de eucalipto em um sistema agrossilvopastoril (SASP). Essa amostragem foi realizada no ano de 2004 na fazenda Bom Sucesso, município de Vazante (latitude de $17^{\circ} 36' 09''$, longitude de $46^{\circ} 42' 02''$), região noroeste do Estado de Minas Gerais, propriedade do Grupo Votorantim Metais. O relevo da área estudada é plano e encontra-se sob domínio do bioma Cerrado, com solo classificado como Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. A altitude média da região é de 550 m e o clima predominante é o subtropical úmido de savana (Aw, segundo a classificação de Köppen), com temperatura média máxima de 32°C e média mínima de 16°C . As precipitações pluviais médias anuais são de aproximadamente 1.450 mm, sendo a estação chuvosa bem definida, com aproximadamente sete meses de seca entre os meses de abril a outubro.

A cronosequência estudada neste trabalho é composta por seis talhões com diferentes tempos de implantação dos SASPs: Tempo zero (Cerrado, *strictu sensu*), dois, três, quatro, sete e 10 anos de implantação dos SASPs. O SASP estudado apresentava espaçamento de 10 m entre as linhas de plantio do eucalipto por 4 m entre plantas (10×4 m), o que possibilitou o consórcio com as demais culturas na entrelinha. Foram cultivados clones de eucalipto, sendo consorciados com a cultura do arroz no primeiro ano, soja no segundo e pastagem a partir do terceiro ano.

Como houve o plantio de três culturas diferentes durante o ciclo do eucalipto, a linha e a entrelinha de plantio representavam duas situações distintas. Na linha de plantio do eucalipto houve o revolvimento do solo apenas por ocasião do plantio. Por sua vez, na entrelinha ocorreu a movimentação do solo e de máquinas até o terceiro ano. Assim, foram realizadas amostragens na linha e na entrelinha de cultivo do eucalipto. As amostras destinadas às análises das diferentes frações de C e N da MOS foram obtidas por meio de tradagens, num total de quatro repetições, cada uma composta de quatro amostras simples. Quanto às

análises físicas, foram abertas duas trincheiras em cada talhão, uma na linha e outra na entrelinha de plantio do eucalipto, onde foram coletadas amostras indeformadas (anel volumétrico). Em ambas as amostragens (tradagens e perfis), foram coletadas amostras de solo das camadas de 0–10, 10–20, 20–40, 40–60 e 60–100 cm. Todas as amostras de solo foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm (TFSA).

No tocante à caracterização física dos solos, amostras indeformadas retiradas dos perfis foram utilizadas para determinar a densidade do solo e, posteriormente, o equivalente de umidade e a granulometria dos solos em todas as profundidades (Quadro 1). Para a caracterização química dos solos, foram combinadas amostras de solo (TFSA) das camadas de 0–10 e 10–20 cm de todas as repetições, perfazendo uma amostra composta

Quadro 1. Características físicas (densidade, equivalente de umidade e textura) das diferentes camadas de solo dos talhões estudados

Talhão	Profundidade	Classe textural	Dens. ⁽¹⁾	E.U. ⁽²⁾	Areia grossa ⁽³⁾	Areia fina ⁽³⁾	Silte ⁽⁴⁾	Argila ⁽⁴⁾
	cm		g cm ⁻³	kg kg ⁻¹	g kg ⁻¹			
Cerrado	0–10	Muito argilosa	0,84	0,307	50	60	180	710
	10–20		0,95	0,288	50	60	170	720
	20–40		1,16	0,278	40	50	160	750
	40–60		1,14	0,293	30	40	150	780
	60–100		1,05	0,289	30	40	120	810
SASP dois anos linha	0–10	Muito argilosa	1,07	0,282	90	60	230	620
	10–20		1,15	0,279	80	80	210	630
	20–40		1,13	0,277	70	70	150	710
	40–60		1,02	0,273	80	60	150	710
	60–100		0,96	0,284	80	60	150	710
SASP dois anos entrelinha	0–10	Muito argilosa	1,14	0,264	90	90	210	610
	10–20		1,19	0,277	80	70	180	670
	20–40		1,14	0,271	70	60	150	720
	40–60		1,05	0,276	70	60	170	700
	60–100		0,96	0,278	70	50	150	730
SASP três anos linha	0–10	Muito argilosa	0,88	0,301	30	40	140	790
	10–20		0,88	0,304	30	40	160	770
	20–40		0,90	0,297	30	40	150	780
	40–60		0,89	0,305	30	40	150	780
	60–100		0,88	0,302	50	30	130	790
SASP três anos entrelinha	0–10	Muito argilosa	0,96	0,302	30	40	160	770
	10–20		0,97	0,297	30	40	160	770
	20–40		0,97	0,302	30	40	140	790
	40–60		0,89	0,304	20	40	120	820
	60–100		0,85	0,306	20	40	130	810
SASP quatro anos linha	0–10	Muito argilosa	0,89	0,294	20	70	160	750
	10–20		0,90	0,294	20	70	160	750
	20–40		0,93	0,292	20	60	160	760
	40–60		0,95	0,295	10	60	140	790
	60–100		0,92	0,292	10	60	150	780
SASP quatro anos entrelinha	0–10	Muito argilosa	0,95	0,296	20	80	170	730
	10–20		0,98	0,294	20	70	150	760
	20–40		0,99	0,292	20	60	140	780
	40–60		0,94	0,296	20	60	140	780
	60–100		0,89	0,296	20	50	140	790
SASP sete anos linha	0–10	Muito argilosa	1,06	0,284	40	110	150	700
	10–20		0,99	0,275	40	120	150	690
	20–40		1,00	0,258	40	110	140	710
	40–60		0,99	0,256	40	110	140	710
	60–100		0,96	0,262	40	100	140	720
SASP sete anos entrelinha	0–10	Muito argilosa	1,12	0,278	40	110	140	710
	10–20		1,09	0,271	40	100	140	720
	20–40		1,06	0,273	40	110	120	730
	40–60		0,99	0,278	40	110	130	720
	60–100		0,96	0,268	40	90	110	760
SASP dez anos linha	0–10	Muito argilosa	0,96	0,301	30	50	150	770
	10–20		0,92	0,289	20	40	160	780
	20–40		0,88	0,288	20	40	140	800
	40–60		0,85	0,293	20	40	150	790
	60–100		0,84	0,296	20	40	170	770
SASP dez anos entrelinha	0–10	Muito argilosa	0,99	0,303	20	60	200	720
	10–20		0,97	0,296	20	40	180	760
	20–40		0,92	0,304	20	40	180	760
	40–60		0,85	0,296	20	40	170	770
	60–100		0,84	0,337	20	40	170	770

⁽¹⁾ Densidade do solo pelo método do anel volumétrico. ⁽²⁾ Equivalente de umidade – quantidade de água retida em amostras de TFSA previamente saturadas com água e centrifugadas a uma força equivalente a um valor de potencial de -33 kPa (Métodos de análises físicas do solo, Lab. de Física do Solo, Departamento de Solos, UFV). ⁽³⁾ Peneiramento (Ruiz, 2005). ⁽⁴⁾ Método da pipeta utilizado na análise de rotina, com aplicação da lei de Stokes para o cálculo do tempo de sedimentação (Ruiz, 2005).

Quadro 2. Características químicas da camada de 0–20 cm das amostras do solo da linha (L) e entrelinha (EL) de plantio do eucalipto

Talhão	pH _{H₂O} ⁽¹⁾	P ⁽²⁾	K ⁽²⁾	Ca ²⁺ ⁽³⁾	Mg ²⁺ ⁽³⁾	Al ³⁺ ⁽³⁾	H + Al ⁽⁴⁾	SB ⁽⁵⁾	t ⁽⁶⁾	T ⁽⁷⁾	V ⁽⁸⁾	m ⁽⁹⁾	P-rem ⁽¹⁰⁾
		mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³						— % —		mg L ⁻¹
Cerrado	5,82	1,2	167	0,87	0,53	0,29	2,5	1,83	2,12	4,33	42,3	13,7	18,0
SASP 2 anos (L)	6,23	41,9	63	2,11	1,06	0,00	0,6	3,33	3,33	3,93	84,7	0,0	18,8
SASP 2 anos (EL)	6,74	6,1	69	1,78	1,09	0,00	0,6	3,05	3,05	3,65	83,6	0,0	19,1
SASP 3 anos (L)	6,15	1,7	72	1,15	0,91	0,00	1,4	2,24	2,24	3,64	61,5	0,0	16,3
SASP 3 anos (EL)	6,25	3,6	94	1,18	0,89	0,00	1,3	2,31	2,31	3,61	64,0	0,0	19,3
SASP 4 anos (L)	5,54	13,4	92	0,86	0,85	0,10	1,9	1,95	2,05	3,85	50,6	4,9	20,4
SASP 4 anos (EL)	5,56	2,6	98	0,96	0,78	0,10	1,7	1,99	2,09	3,69	53,9	4,8	20,3
SASP 7 anos (L)	5,80	6,3	47	0,69	0,79	0,05	1,7	1,60	1,65	3,30	48,5	3,0	22,8
SASP 7 anos (EL)	5,72	1,0	60	0,50	0,52	0,05	1,9	1,17	1,22	3,07	38,1	4,1	20,1
SASP 10 anos (L)	5,85	3,6	63	0,97	0,79	0,00	1,9	1,92	1,92	3,82	50,3	0,0	21,7
SASP 10 anos (EL)	6,05	2,0	44	0,92	0,72	0,00	1,9	1,75	1,75	3,65	47,9	0,0	18,4

⁽¹⁾ Relação solo:água 1:2,5. ⁽²⁾ Extrator Mehlich-1. ⁽³⁾ Extrator KCl 1 mol L⁻¹. ⁽⁴⁾ Extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0. ⁽⁵⁾ Soma de bases trocáveis. ⁽⁶⁾ Capacidade de troca catiônica efetiva. ⁽⁷⁾ Capacidade de troca catiônica a pH 7,0. ⁽⁸⁾ Índice de saturação por bases. ⁽⁹⁾ Índice de saturação por alumínio. ⁽¹⁰⁾ Fósforo remanescente (Alvarez V. et al., 2000).

por talhão estudado (0–20 cm). Essas amostras foram submetidas à análise química de rotina (Quadro 2).

A determinação do COT foi feita segundo o método descrito por Yeomans & Bremner (1988), com dicromato de K em meio ácido como agente oxidante e uma fonte externa de calor. Na determinação do N total do solo (NT) utilizou-se o método Kjeldahl. A matéria orgânica leve (MOL) livre foi quantificada pelo método densimétrico, em que 30 mL de uma de solução de NaI com densidade 1,8 kg L⁻¹ foram agitados, manualmente, com 15 g de TFSA. Após agitação, a suspensão foi centrifugada a 2.500 g. A MOL livre no sobrenadante foi separada por peneiramento, utilizando-se uma peneira de 0,250 mm de abertura. Esse material foi lavado extensivamente com água destilada, seco em estufa por 72 h a 65 °C, moído em almofariz de ágata e, posteriormente, analisados os teores de C e N por combustão via seco, em analisador elementar (CHNS). Foi analisada a fração do C oxidado por solução de permanganato de K (KMnO₄) 0,033 mol L⁻¹, de acordo com Blair et al. (1995), considerada a fração lábil do C (CL). Essa última análise foi realizada somente para as três camadas superiores (0–10, 10–20 e 20–40 cm), pelo fato de essa fração considerada lábil ocorrer em teores muito baixos em camadas mais profundas, onde a deposição de material é bastante reduzida. Foram calculados os estoques de C e N dessas frações, utilizando-se para isso a densidade do solo sob Cerrado (referência), evitando assim qualquer efeito de aumento nos estoques de COS devido à sua compactação.

Foi calculado também o índice de manejo do C (IMC) proposto por Blair et al. (1995), de acordo com a equação:

$$\text{IMC} = \text{ICC} \times \text{IL} \times 100 \quad (1)$$

Para se chegar ao IMC, outros índices devem ser previamente calculados. O ICC é o índice do compartimento do COT ($\text{ICC} = \text{COT}_{\text{AMOSTRA}} / \text{COT}_{\text{REFERÊNCIA}}$), e IL, o índice de labilidade do C ($\text{IL} = \text{L}_{\text{AMOSTRA}} / \text{L}_{\text{REFERÊNCIA}}$). Essa variável L, por sua vez, representa a labilidade do C, sendo calculada pela fórmula: $\text{L} = \text{C}_L / \text{C}_{\text{NL}}$, em que C_{NL} (C não lábil) é a diferença entre o COT e o CL. Além disso, calculou-se um IMC modificado que, de maneira distinta do IMC originalmente proposto por Blair et al. (1995), substitui o IL da equação 1 pelo índice do compartimento do C da MOL (ICMOL), o qual é calculado de forma semelhante ao ICC, em que $\text{ICMOL} = \text{CMOL}_{\text{AMOSTRA}} / \text{CMOL}_{\text{REFERÊNCIA}}$. Portanto, a fórmula modificada do IMC, calculada a partir do CMOL, é:

$$\text{IMC}_{\text{CMOL}} = \text{ICC} \times \text{ICMOL} \times 100 \quad (2)$$

O experimento seguiu um delineamento inteiramente casualizado, com parcelas subdivididas; o tempo foi a parcela principal, e as profundidades, as subparcelas. Para a análise estatística dos resultados, utilizou-se como ferramenta o software SAEG 9.0, procedendo-se a análise de variância (ANOVA); regressões, para cada fator estudado como variável do tempo de adoção do sistema agrossilvopastoril; e correlação de Pearson, entre todos os dados. A partir das equações ajustadas, foi possível determinar os pontos de máximo e de mínimo, que indicam os pontos de máximo acúmulo e máxima perda de C e N nas frações estudadas, respectivamente. Adicionalmente, essas equações foram utilizadas como modelos para extrapolação dos dados além do período máximo estudado (10 anos), com o intuito de se determinar o

tempo necessário para que os estoques retornassem aos valores originais, e também para o cálculo do balanço total de C nas diferentes frações analisadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estoques de C orgânico total (COT) e N total (NT)

As amostras de solo coletadas na linha de plantio do eucalipto apresentaram alterações acentuadas nos estoques de COT (Figura 1). Aos 3,14 anos, a camada de 0–10 cm atingiu sua perda máxima de C, com diminuição de 44,70 % em relação ao estoque original de C nessa camada. A partir dessa época, o estoque de COT mostrou recuperação, porém sem alcançar os valores originais no décimo ano de introdução dos SASPs – período máximo estudado (17,19 % menor que o da referência). Utilizando a equação ajustada aos dados dessa camada (Quadro 3), verifica-se que o estoque original de COT seria atingido somente aos 12,56 anos. Para a camada de 10–20 cm, a máxima perda de C foi de 41,39 %, em relação ao estoque da área de referência. No décimo ano de introdução dos SASPs, essa camada apresentou apenas 66,51 % dos valores originais do estoque de C. Mudanças de uso do solo, principalmente quando este se encontra sob vegetação nativa, acarretam perdas de COS. Isso

ocorre principalmente devido à redução da deposição de resíduos orgânicos e à exposição da MOS antes protegida fisicamente. Contudo, essas perdas são mais intensas em condições tropicais como as deste estudo, em que fatores como temperatura e umidade proporcionam condições ótimas para a microbiota do solo (Stevenson, 1994; Solomon et al., 2002; Cerri et al., 2003).

Embora as perdas iniciais de C nessas duas profundidades sejam parecidas, a recuperação do estoque original da camada de 10–20 cm deverá ocorrer, apesar dos riscos da extrapolação do período de tempo estudado (10 anos), aos 19,37 anos, o que está de acordo com Turner & Lambert (2000). Esses autores observaram a diminuição do estoque de C na camada de 0–10 cm após distúrbio inicial do solo, porém essa perda de C cessa e se estabiliza dentro do período de rotação estudado (35 anos). Ainda segundo esses autores, essa resposta é mais demorada para camadas mais profundas (0–50 cm), nas quais a recuperação do COS para os valores originais não ocorreu dentro do período estudado (35 anos).

A camada mais profunda da linha de plantio (60–100 cm) apresentou acúmulo inicial de C (Figura 1). Esse acúmulo se deu aos 3,33 anos após a implantação dos SASPs e representou um aumento de 80,26 % em relação ao estoque de COT da área de referência. A partir desse ponto, os estoques de C começaram a decair e no décimo e último ano atingiram um valor

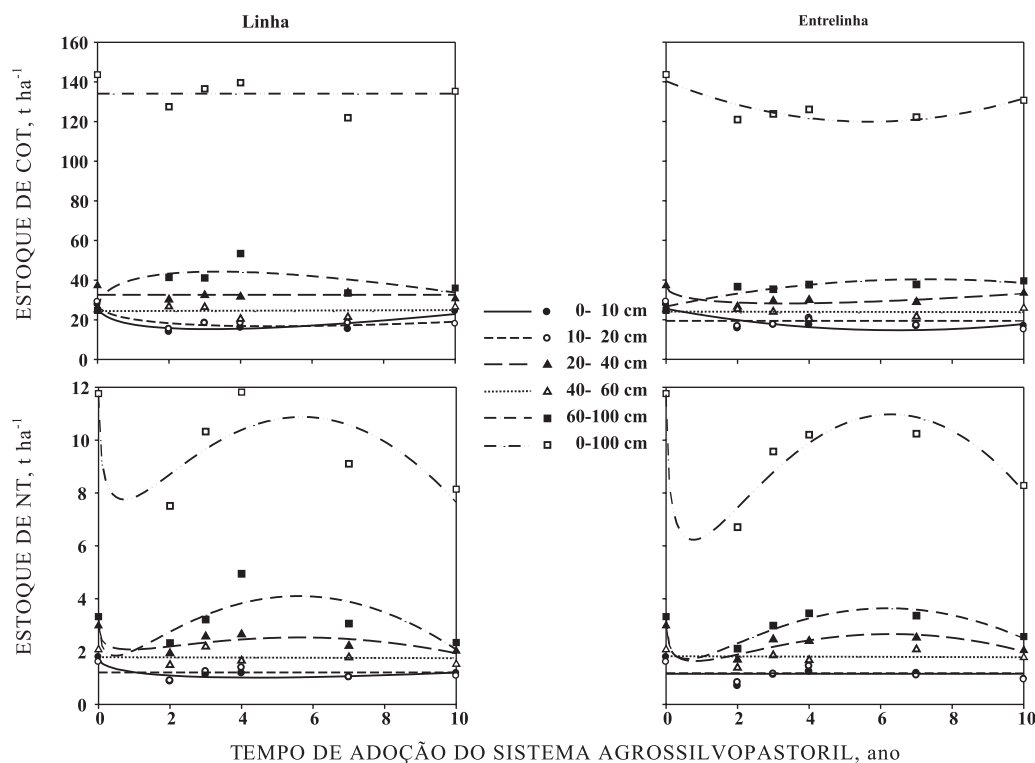


Figura 1. Estoques de C orgânico total (COT) e N total (NT) como variável do tempo de adoção do sistema agrossilvopastoril, para as cinco profundidades estudadas, na linha e na entrelinha de cultivo do eucalipto.

Quadro 3. Equações de regressão para os estoques de C orgânico total (COT) ($t\ ha^{-1}$) como variável do tempo de adoção (ano) do sistema agrossilvopastoril, na linha e entrelinha de plantio do eucalipto, em cada profundidade estudada. *, **, * e °: significativos a 0,1; 1; 5 e 10 %, respectivamente**

Profundidade	Linha	Entrelinha
cm		
0–10	$\hat{y} = 27,64 - 13,94^{***}x^{0,5} + 3,93^{**}x \quad R^2 = 0,84$	$\hat{y} = 25,46 - 3,33^*x + 0,26^*x^2 \quad R^2 = 0,72$
10–20	$\hat{y} = 28,56 - 10,74^*x^{0,5} + 2,44^*x \quad R^2 = 0,88$	$\hat{y} = 19,37$
20–40	$\hat{y} = 32,60$	$\hat{y} = 37,08 - 9,84^*x^{0,5} + 2,72x \quad R^2 = 0,87$
40–60	$\hat{y} = 24,37$	$\hat{y} = 23,67$
60–100	$\hat{y} = 24,57 + 21,61^{***}x^{0,5} - 5,92^{***}x \quad R^2 = 0,67$	$\hat{y} = 26,62 + 3,78^*x - 0,26^*x^2 \quad R^2 = 0,84$
0–100	$\hat{y} = 134,08$	$\hat{y} = 140,30 - 7,20^*x + 0,63^*x^2 \quad R^2 = 0,75$

ainda 37,16 % superior ao da área de referência. Contudo, se mantidas as taxas atuais de entrada e de saída de C no sistema, a partir dos 13,32 anos o estoque de C nessa camada já será inferior àquele do Cerrado (Quadro 1).

Nas amostras da entrelinha de plantio do eucalipto, as alterações ocorridas no compartimento do COT para as diferentes camadas estudadas foram mais uniformemente distribuídas ao longo do tempo (Figura 1). A camada de 0–10 cm apresentou perdas máximas de 42,35 % em relação ao estoque de COT encontrado na área de referência. A partir desse ponto, o estoque de C voltou a se recuperar, atingindo, aos 10 anos de implantação dos SASPs, 70,16 % do estoque original. Apenas aos 12,96 anos é que os valores originais seriam atingidos (Quadro 1). Esses números são semelhantes àqueles encontrados para as amostras da linha de plantio, porém o tempo necessário para que a perda máxima de C na entrelinha ocorra é de 6,48 anos, mais que o dobro do necessário para as amostras da linha de plantio. Isso se deve, provavelmente, à grande deposição de resíduos vegetais proporcionada pelas culturas anuais na entrelinha de cultivo do eucalipto (Spagnollo, 2004).

Para a camada de 20–40 cm na entrelinha de plantio do eucalipto, as perdas de C foram pequenas. Ainda que tenha perdido apenas 24,01 % de seu C já aos 3,27 anos, sua recuperação foi lenta, diminuindo essa perda para 10,57 % ao final do décimo ano, sendo necessários 13,09 anos para que os valores originais sejam recuperados. À semelhança do que ocorreu para a linha de plantio, a camada de 60–100 cm da entrelinha também apresentou acúmulo de C, mas em menor magnitude e mais uniformemente distribuída ao longo do tempo. O acúmulo máximo deu-se aos 7,28 anos e foi 51,70 % superior ao do estoque original. A partir desse ponto, o estoque de C diminui, porém aos 10 anos de implantação dos SASPs o estoque de C dessa camada ainda era 44,49 % superior ao original. Somente após 14,56 anos esses valores serão menores que os originais.

Esse aumento inicial do estoque de COT em profundidade (Figura 1) não foi devido à incorporação de material não humificado por ocasião do preparo do solo, uma vez que o estoque de CMOL não aumentou (Figura 2). Contudo, o intenso revolvimento do solo, com a quebra de estruturas de macro e de microagregados, leva à perda da proteção física da MOS, bastante significativa em solos muito argilosos e oxidícos (Wilcke & Lilienfein, 2004; Jandl et al., 2007), como os deste estudo. Com essa quebra de agregados, coloides orgânicos (solúveis na solução do solo ou não) antes incorporados à estrutura do solo podem estar se eluviando em profundidade no perfil do solo. Isso, somado à deposição de C pela morte de raízes, estaria acarretando esse aumento do estoque de COT em profundidade, o que também foi observado por Neu (2005); essa autora cita, ainda, a possível contribuição de exsudatos radiculares para esse aumento de C em profundidade.

A perda inicial de COS após mudanças de uso do solo é fato conhecido. Quando se pensa em sustentabilidade de um sistema ou em sequestro de C no solo com o intuito de mitigar o efeito estufa, esforços são concentrados em diminuir essas perdas iniciais e na adoção de práticas que promovam a recuperação mais rápida dos teores originais de C no solo. No entanto, muitos desses estudos levam em consideração apenas camadas superficiais do solo. Turner & Lambert (2000) e Turner et al. (2005), por exemplo, levam em consideração apenas as camadas de 0–10 e 0–50 cm de profundidade. Para essas camadas, eles encontraram padrões semelhantes aos das camadas superficiais deste estudo, com perda inicial de C e tendência de recuperação ao longo do tempo. Em estudo desenvolvido nessa mesma área, Wendling (2007) avaliou as camadas de 0–10 e 10–20 cm e concluiu que esse SASP promove redução inicial nos teores de C e N, porém com potencial de recuperação ao final do ciclo. Todavia, quando camadas mais profundas são levadas em consideração, como no presente estudo, percebe-se que a recuperação dos estoques originais de C é dificultada. Isso acontece

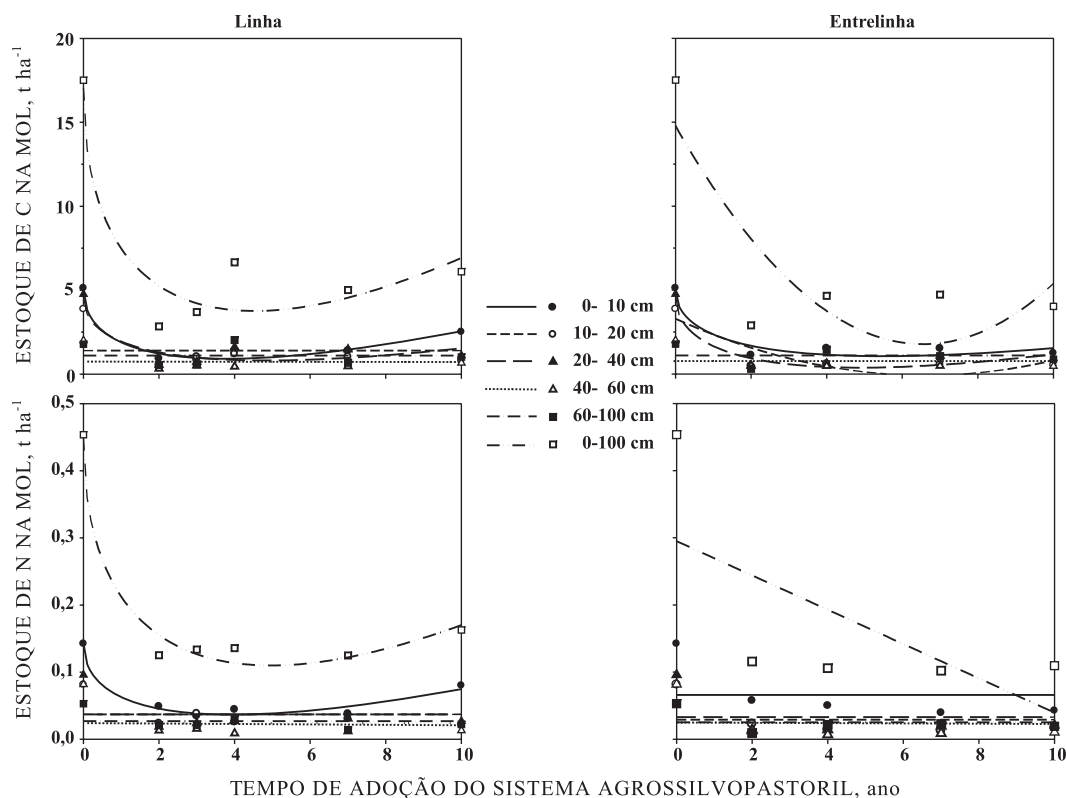


Figura 2. Estoques de C e N na matéria orgânica leve (MOL) livre como variável do tempo de adoção do sistema agrossilvopastoril, para as cinco camadas de solo estudadas, na linha e na entrelinha de cultivo do eucalipto.

devido às perdas de C que estão ocorrendo nessas camadas e à dificuldade de elevar a deposição de material vegetal (raízes) nelas. Esses resultados confirmam a importância de estudar camadas mais profundas do solo quando se deseja avaliar o balanço do estoque total de C na MOS.

O balanço total de C nesse SASP, para a camada de 0–100 cm, foi de que na linha de plantio do eucalipto o estoque de COT não sofreu alterações ao longo do tempo. Por sua vez, a entrelinha apresentou diminuição de 14,56 % no estoque total de C aos 5,68 anos, com relação à área de referência (Cerrado). No décimo e último ano da cronosequência estudada, a amostra da entrelinha não conseguiu retomar os estoques originais de C do solo de Cerrado (93,89 %). É provável que essa diferença seja devido à maior quantidade de raízes da cultura do eucalipto, somada ao menor revolvimento do solo. Para que um manejo seja sustentável, no final de cada ciclo ele deve promover o sequestro de C em tal magnitude que compense a perda inicial causada pela implantação da cultura (Turner & Lambert, 2000). Portanto, no final de cada ciclo os estoques de C deverão ser os mesmos que os da área de referência; caso contrário, os estoques serão cada vez menores, o que pode levar ao aparecimento de áreas degradadas. Para um sistema nessas condições, ele deverá ter o seu ciclo aumentado (Jandl et al., 2007), de modo que a

recuperação do estoque da MOS ocorra dentro do período de cada ciclo, ou o manejo nas condições de um ciclo menor deverá ser melhorado. Para fins de comparação, o estoque total de C no solo (0–100 cm) sob SASP, no final do décimo ano estudado, foi de 135,3 e 130,7 t ha⁻¹ (linha e entrelinha, respectivamente). Para áreas de pastagem típica, eucalipto em monocultura e Cerrado adjacentes, esses estoques foram de 130,8, 137,5 e 143,7 t ha⁻¹, respectivamente (dados não apresentados).

Os estoques de N, assim como os de C, variaram de forma semelhante na linha e na entrelinha de cultivo do eucalipto (Figura 1). As maiores alterações nos estoques de N ocorreram nas camadas mais profundas, principalmente de 60–100 cm de profundidade. Na linha de plantio, a camada de 0–10 cm apresentou perda máxima de 42,43 % do estoque de N original aos 4,39 anos, chegando ao décimo ano com 68,55 % do estoque original, sendo necessários, teoricamente, 17,58 anos para que a recuperação atinja 100 % (Quadro 4). A camada de 20–40 cm apresentou uma perda brusca de 29,76 % do estoque de N no primeiro ano (aos 0,90 anos), seguida de uma fase de recuperação, que durou até os 5,57 anos e elevou o estoque de N a 85,43 % do estoque original. A partir desse ponto, a tendência foi de decréscimo, atingindo 65,17 % do estoque inicial de N no décimo ano de implantação dos SASPs. Para a

camada de 60–100 cm a perda inicial foi de 43,96 % aos 0,47 ano, chegando a um acúmulo de N 24,67 % maior que o estoque original; contudo, esse incremento não foi sustentável, chegando a 63,10 % do estoque inicial no décimo ano.

Para a entrelinha de plantio, a camada de 20–40 cm perdeu 44,79 % do seu estoque de N aos 0,81 ano (Figura 1). Posteriormente, o incremento que ocorreu até os 6,26 anos elevou esse estoque para valores de 89,67 % do estoque original. Entretanto, esse incremento não se manteve e aos 10 anos de implantação dos SASPs o estoque de N já havia diminuído novamente, representando 67,40 % do estoque inicial desse nutriente. Já a camada de 60–100 cm mostrou decréscimo de 48,19 % no seu estoque inicial ao 0,61 ano. Após esse período, os estoques de N voltaram a aumentar, ultrapassando em 9,87 % os estoques originais de N aos 6,18 anos. Entretanto, ao final do décimo ano, o estoque de N dessa camada equivale a 75,27 % dos valores originais. Essa característica de elevação dos estoques de N com posterior diminuição pode ser devido à qualidade dos materiais vegetais utilizados nesse SASP. Os resíduos da soja cultivada no segundo ano de implantação do SASP levariam ao aumento da quantidade de N no solo. Como após esse período são cultivados somente eucalipto e braquiária na área (plantas que apresentam elevada relação C/N), a quantidade de N no solo também tende a diminuir, até encontrar um novo equilíbrio, que é imposto pela qualidade do novo material vegetal depositado no solo.

A redução inicial dos teores de N no solo em ambas as posições (linha e entrelinha) também foi encontrada por Andrade et al. (2005), que explicaram isso como consequência da mineralização do N contido na MOS e sua posterior perda por erosão e lixiviação, aliado ao baixo aporte de resíduos vegetais e à grande demanda por N na fase inicial de crescimento das culturas. Possivelmente, a maior exigência e exportação de N pelas culturas anuais tenham proporcionado a diminuição mais brusca do estoque desse elemento na camada de 20–40 cm da entrelinha. Todavia, esses três cultivos também propiciaram maiores aportes de

resíduo ao solo, o que resulta no maior e mais rápido acúmulo de N, uma vez que a principal fonte desse elemento é via deposição de resíduos orgânicos (Neu, 2005).

Os resultados de Binkley et al. (2004) mostraram que os fluxos e as formas de N no solo (orgânica ou inorgânica), bem como sua influência sobre o acúmulo de C no solo, variaram substancialmente entre sítios e estudos, indicando que não existe um modelo simples para descrever todas as situações. Para esses autores, a maior influência do N sobre o solo se dá devido aos seus efeitos sobre a microbiota do solo.

Levando em consideração o estoque total de N na camada de 0–100 cm, a perda inicial desse elemento foi maior na entrelinha que na linha de plantio do eucalipto (redução de 43,61 e 33,68 %, respectivamente). Entretanto, o acúmulo de N ao longo do tempo de adoção do SASP foi maior para a entrelinha que para a linha, chegando a um máximo de recuperação em relação ao N do solo de Cerrado de 99,46 % aos 6,25 anos e 91,56 % aos 5,66 anos, para a entrelinha e linha, respectivamente. Adicionalmente, no final do período estudado (10 anos), o estoque de N na camada total de solo foi maior para a entrelinha que para a linha de plantio. Para fins de comparação, o estoque total de N no solo (0–100 cm) sob SASP, no final do décimo ano estudado, foi de 8,1 e 8,3 t ha⁻¹ (linha e entrelinha, respectivamente). Para áreas de pastagem típica, eucalipto em monocultura e Cerrado adjacentes, esses estoques foram de 9,9, 10,7 e 11,8 t ha⁻¹, respectivamente (dados não apresentados).

Estoques de C e N na matéria orgânica leve (MOL)

O coeficiente de variação dos dados referentes às variáveis relacionadas à MOL (CMOL e NMOL) apresentou valores elevados, entre 49 e 59 %, o que é característica inerente dessa fração da MOS. Marin et al. (2006) verificaram maior variabilidade espacial e sazonal da MOL em relação a outras frações da MOS em sistemas agroflorestais. Segundo esses autores, os teores de MOL variaram tanto com a época de

Quadro 4. Equações de regressão para os estoques de N total (NT) (t ha⁻¹) como variável do tempo de adoção do sistema agrossilvopastoril, na linha e entrelinha de plantio do eucalipto, em cada profundidade estudada. *, **, * e °: significativos a 0,1, 1, 5 e 10 %, respectivamente**

Profundidade	Linha		Entrelinha	
cm				
0–10	$\hat{y} = 1,76 - 0,71^{**}x^{0,5} + 0,17x$	$R^2 = 0,74$	$\hat{y} = 1,16$	
10–20	$\hat{y} = 1,21$		$\hat{y} = 1,18$	
20–40	$\hat{y} = 2,96 - 2,16x^{0,5} + 1,60x - 0,32x^{1,5}$	$R^2 = 0,30$	$\hat{y} = 2,97 - 3,36x^{0,5} + 2,53x - 0,50x^{1,5}$	$R^2 = 0,86$
40–60	$\hat{y} = 1,78$		$\hat{y} = 1,81$	
60–100	$\hat{y} = 3,29 - 4,66^{***}x^{0,5} + 4,38^{***}x - 0,96^{***}x^{1,5}$	$R^2 = 0,34$	$\hat{y} = 3,31 - 4,55^{***}x^{0,5} + 3,82^{***}x - 0,78x^{1,5}$	$R^2 = 0,89$
0–100	$\hat{y} = 11,69 - 10,52x^{0,5} + 8,40x - 1,73x^{1,5}$	$R^2 = 0,62$	$\hat{y} = 11,72 - 14,27x^{0,5} + 11,03x - 2,18x^{1,5}$	$R^2 = 0,86$

amostragem quanto com a distância de amostragem em relação à linha de plantio da espécie florestal. Com isso, as equações de regressão dessas frações para algumas camadas, mesmo apresentando ajustes com valores de R^2 próximos a 0,99, tiveram seus modelos rejeitados a 10 % de significância.

Neste estudo, a fração da MOL foi a que apresentou as maiores reduções em relação aos estoques originais (Figura 2). Essas alterações estão de acordo com o encontrado na literatura, onde tem sido reportado que a MOL é um compartimento que apresenta tempo de ciclagem relativamente curto e é bastante sensível a mudanças de manejo (Stevenson, 1994; Diekow, 2003; Leite et al., 2003; Tirol-Padre & Ladha, 2004; Bongiovanni & Lobartini, 2006; Xavier et al., 2006).

A fração CMOL da linha de plantio apresentou valores semelhantes de reduções nos estoques originais para as camadas estudadas (Figura 2). As perdas máximas ocorridas nas camadas de 0–10 e 20–40 cm foram de 82,01 e 82,44 %, aos 3,77 e 4,82 anos, respectivamente, em relação ao solo sob Cerrado. A camada de 0–10 cm continha, no décimo ano do estudo, um estoque de CMOL na linha de plantio equivalente a 50,39 % do original, necessitando de um tempo de rotação estimado de 15,08 anos para que os estoques dessa camada retornassem aos valores encontrados no solo sob Cerrado (Quadro 3). A camada de 20–40 cm mostrou valor de recuperação do estoque

de CMOL menor que o da camada de 0–10 cm no décimo ano de implantação dos SASPs; esta camada atingiu, nessa época, 33,48 % do estoque original. O tempo necessário para que ela atingisse 100 % do estoque original seria de 19,31 anos.

Para o CMOL das amostras oriundas da entrelinha de plantio (Figura 2), a redução máxima do estoque da camada de 0–10 cm foi de 78,82 % aos 5,50 anos, com a elevação do estoque de CMOL dessa camada para 30,78 % do original no décimo ano dos SASPs. O tempo necessário para que esse valor atingisse 100 % seria de 21,98 anos (Quadro 5). A camada de 10–20 cm chegou ao décimo ano com estoque bastante baixo, 24,62 % do original, porém o tempo necessário para a recuperação é menor: 13,21 anos para se atingirem os valores das áreas de Cerrado. Para a camada de 20–40 cm, a redução máxima foi de 91,08 % e se deu aos 4,78 anos, sendo necessários 19,12 anos para atingir os valores originais. Considerando o estoque total de CMOL na camada de 0–100 cm, as amostras da entrelinha tiveram perda mais acentuada do que na linha, sendo essa perda máxima de 88,13 e 77,98 %, respectivamente.

Com relação ao estoque de N na MOL (Figura 2), a amostra da linha de plantio da camada de 0–10 cm apresentou perda de 74,27 % aos 3,92 anos. No décimo ano de implantação dos SASPs, o estoque de NMOL era de 52,22 % do estoque original. Para que recuperasse 100 % do estoque de NMOL do solo de

Quadro 5. Equações de regressão para os estoques de C na matéria orgânica leve (CMOL) ($t\ ha^{-1}$) como variável do tempo de adoção (ano) do sistema agrossilvopastoril, na linha e entrelinha de plantio do eucalipto, em cada profundidade estudada. *, **, * e °: significativos a 0,1, 1, 5 e 10 %, respectivamente**

Profundidade	Linha		Entrelinha	
cm				
0–10	$\hat{y} = 5,06 - 4,28***x^{0,5} + 1,10**x$	$R^2 = 0,97$	$\hat{y} = 5,00 - 3,36*x^{0,5} + 0,72*x$	$R^2 = 0,94$
10–20	$\hat{y} = 1,40$		$\hat{y} = 3,287 - 1,020*x^{0,5} + 0,08*x$	$R^2 = 0,77$
20–40	$\hat{y} = 4,60 - 3,45**x^{0,5} + 0,79*x$	$R^2 = 0,86$	$\hat{y} = 4,66 - 3,88**x^{0,5} + 0,89*x$	$R^2 = 0,96$
40–60	$\hat{y} = 1,73$		$\hat{y} = 0,78$	
60–100	$\hat{y} = 1,10$		$\hat{y} = 1,10$	
0–100	$\hat{y} = 17,06 - 12,52*x^{0,5} + 2,94*x$	$R^2 = 0,89$	$\hat{y} = 14,79 - 3,98*x + 0,30*x^2$	$R^2 = 0,69$

Quadro 6. Equações de regressão para os estoques de N na matéria orgânica leve (NMOL) ($t\ ha^{-1}$) como variável do tempo de adoção (ano) do sistema agrossilvopastoril, na linha e entrelinha de plantio do eucalipto, em cada profundidade estudada. *, **, * e °: significativos a 0,1, 1, 5 e 10 %, respectivamente**

Profundidade	Linha		Entrelinha	
cm				
0–10	$\hat{y} = 0,143 - 0,107**x^{0,5} + 0,027*x$	$R^2 = 0,97$	$\hat{y} = 0,066$	
10–20	$\hat{y} = 0,037$		$\hat{y} = 0,029$	
20–40	$\hat{y} = 0,037$		$\hat{y} = 0,033$	
40–60	$\hat{y} = 0,024$		$\hat{y} = 0,024$	
60–100	$\hat{y} = 0,027$		$\hat{y} = 0,025$	
0–100	$\hat{y} = 0,449 - 0,305*x^{0,5} + 0,069*x$	$R^2 = 0,98$	$\hat{y} = 0,295 - 0,026*x$	$R^2 = 0,43$

Cerrado, seriam necessários 15,68 anos (Quadro 6). Já para as amostras da entrelinha, apenas o estoque total de NMOL da camada de 0–100 cm possibilitou o ajuste de um modelo. Esse modelo é linear e, de acordo com ele, o NMOL das amostras da entrelinha de plantio apresentou, ao final do décimo e último ano estudado, redução de 88,14 % com relação ao estoque inicial de NMOL no solo sob Cerrado.

Como a fração MOL foi a mais negativamente alterada pela introdução dos SASPs, percebe-se que, se mantidas as taxas atuais de deposição de resíduos no solo, a recuperação dos teores originais de CMOL e NMOL será muito demorada. Devido à complexidade do manejo dos SASPs, percebeu-se que no décimo ano da cronosequência estudada a pastagem apresentava-se com visível aspecto de degradação. Andrade et al. (2001), que também conduziram experimento nesses mesmos SASPs, porém dando ênfase à pastagem, concluíram que a baixa produtividade das pastagens com o passar dos anos deve-se, além do sombreamento causado pelo eucalipto, à baixa disponibilidade de N no solo. Somando essa baixa produção de matéria seca vegetal pela pastagem à baixa produtividade da floresta, devido ao elevado espaçamento de plantio de eucalipto, o tempo necessário para que a fração da MOL recupere seus valores originais pode ser ainda maior, uma vez que a deposição de resíduos é bastante diminuída nessas condições.

A análise do compartimento MOL mostrou-se importante para este tipo de estudo, uma vez que apresentou as maiores alterações, sendo o compartimento mais sensível ao manejo adotado. Adicionalmente, a MOL é uma medida direta da quantidade de material que está entrando no sistema. Estratégias de manejo que visem à melhoria do solo e ao aumento da MOS devem levar em consideração o aumento dos estoques da MOL (Xavier et al., 2006).

Estoque de C lábil (CL) e índices de manejo do C (IMC)

Apesar de o sequestro de C no solo estar particularmente associado às frações mais estáveis da MOS, compartimentos com ciclagem rápida como o CL e a MOL são muito responsivos a mudanças na taxa de

depósito de C no solo (Stevenson, 1994; Leite et al., 2003; Tirol-Padre & Ladha, 2004). Com isso, têm sido recomendados seus usos como indicadores precoces das mudanças na MOS e da sustentabilidade dos sistemas. Com base nessa sensibilidade, Blair et al. (1995) propuseram o IMC, utilizando os compartimentos de COT e CL. Todavia, trabalhos como o de Mendham et al. (2002) relatam a baixa eficiência desse compartimento de CL em detectar mudanças no estoque total de C. Adicionalmente, Tirol-Padre & Ladha (2004) concluem que a fração do COS oxidada por permanganato de K não pode ser tomada como medida confiável de labilidade do C, já que essa solução oxidou mais rapidamente compostos menos acessíveis à microbiota, como a lignina, em comparação a outros prontamente disponíveis, como os carboidratos solúveis na solução do solo.

A MOL apresenta tempo de ciclagem curto e é bastante sensível quanto a alterações no manejo adotado (Diekow, 2003; Leite et al., 2003; Tirol-Padre & Ladha, 2004; Bongiovanni & Lobartini, 2006; Xavier et al., 2006; Wendling, 2007), além de ser um compartimento que reflete a quantidade de material depositado no solo. Essas características fazem com que ela seja um fator muito importante para o cálculo de qualquer índice de manejo do C. Com isso, a ideia de Diekow (2003) de substituir a medida de CL do cálculo do IMC proposto por Blair et al. (1995) por uma medida de fracionamento físico equivalente à MOL é bastante compreensível. Contudo, ao fazer essa modificação, Diekow (2003) simplesmente tomou o resultado do fracionamento físico como medida de labilidade do C, dando sequência aos cálculos do IMC conforme Blair et al. (1995) haviam proposto. Ao fazer isso, dá-se peso maior para esse compartimento de C, o qual é utilizado para calcular os fatores L e IL da equação 1. Assim, no presente estudo foi feita uma modificação no IMC originalmente proposto por Blair et al. (1995), que consiste na substituição desse IL pelo ICMOL (Equação 2).

O C oxidável por permanganato, tido como medida de labilidade do C (CL), não mostrou tendências claras para identificar variações ao longo da cronosequência estudada (Quadro 7), o que influenciou também o IMC calculado a partir do CL (IMC_{CL}) (Quadro 8). A

Quadro 7. Equações de regressão para os estoques de C lábil (CL) ($t \text{ ha}^{-1}$) como variável do tempo de adoção (ano) do sistema agrossilvopastoril, na linha e entrelinha de plantio do eucalipto, em cada profundidade estudada. *, **, * e °: significativos a 0,1, 1, 5 e 10 %, respectivamente**

Profundidade	Linha	Entrelinha
cm		
0–10	$\hat{y} = 2,157 - 1,111 \cdot x^{0,5} + 0,293 \cdot x \quad R^2 = 0,88$	$\hat{y} = 1,35$
10–20	$\hat{y} = 1,20$	$\hat{y} = 1,16$
20–40	$\hat{y} = 1,89$	$\hat{y} = 1,76$
0–40	$\hat{y} = 6,039 - 1,925 \cdot x^{0,5} + 0,452 \cdot x \quad R^2 = 0,83$	$\hat{y} = 4,22$

Quadro 8. Equações de regressão para o índice de manejo do C calculado a partir do C lábil (IMC_{CL}) (%), como variável do tempo de adoção (ano) do sistema agrossilvopastoril, na linha e entrelinha de plantio do eucalipto, em cada profundidade estudada. *, **, * e °: significativos a 0,1, 1, 5 e 10 %, respectivamente**

Profundidade	Linha	Entrelinha
cm		
0–10	$\hat{y} = 64,0$	$\hat{y} = 62,6$
10–20	$\hat{y} = 84,2$	$\hat{y} = 76,5$
20–40	$\hat{y} = 83,6$	$\hat{y} = 77,2$
0–40	$\hat{y} = 75,2$	$\hat{y} = 70,7$

máxima redução do estoque de CL para a camada superficial de 0–10 cm na linha de plantio foi de 51,13 %, o que se deu aos 3,60 anos de introdução dos SASPs (Figura 3). Para o estoque total da camada de 0–40 cm, essa redução foi de 33,94 % e se deu aos 4,54 anos. Em trabalho desenvolvido nessa mesma área, Wendling (2007) também concluiu que essa fração do C oxidada por permanganato de potássio não é adequada para o cálculo do IMC; esse índice expressa melhor as mudanças de uso e manejo do solo quando calculado a partir de uma fração do C oxidada por diferentes concentrações de H_2SO_4 .

Embora os estoques de CL nas demais camadas não tenham se mostrado sensíveis à implantação dos SASPs, é interessante notar que esses dados variam de maneira semelhante dentro de cada fração de tempo estudada. Ao contrário dessa falta de sensibilidade dos dados de CL e IMC_{CL} , os modelos de IMC calculados a partir do CMOL (IMC_{CMOL}) foram bastante sensíveis ao tempo de implantação dos SASPs (Quadro 9). É importante lembrar que não existe valor ótimo para este índice, e o valor de 100 % indica um manejo semelhante ao da área de referência, com a manutenção dos estoques de C nos compartimentos COT e CMOL.

O IMC_{CMOL} da camada de 0–10 cm da linha de plantio do eucalipto apresentou seu menor valor (9,02 %) aos 3,85 anos, sendo necessários 15,41 anos para elevar esse índice a 100 % (Figura 3). A camada de 0–10 cm da entrelinha atingiu seu pior índice (12,61 %) aos 6,05 anos, sendo necessários 24,20 anos para elevá-lo a 100 %. Provavelmente, a maior deposição de resíduos sobre o solo proporcionada pelos cultivos anuais (arroz e soja) e pela pastagem, realizados na entrelinha de cultivo do eucalipto, proporcionou essa menor queda do índice na entrelinha, que ocorreu em um período de tempo maior do que para a linha de plantio. Contudo, o estado de degradação da pastagem, como já comentado, parece estar dificultando a recuperação do IMC_{CMOL} da entrelinha de plantio, que ocorre posteriormente.

Para as camadas subsuperficiais de 10–20 e 20–40 cm na entrelinha, o maior revolvimento do solo provocado pelo cultivo convencional, somado à perda de vigor da pastagem ao longo do tempo, parece estar influenciando negativamente os IMC_{CMOL} dessas camadas. Para a camada de 10–20 cm, os menores valores de IMC_{CMOL} foram de 11,80 e 3,81 % (linha e entrelinha) (Figura 3). Esses valores foram atingidos praticamente ao mesmo tempo: aos 5,47 anos para a linha e aos 5,66 anos para a entrelinha. O tempo necessário para que esses índices retornem aos valores originais (100 %) são também similares (21,86 e 22,63 anos, linha e entrelinha) (Quadro 7). Do mesmo modo, para a camada de 20–40 cm, os menores índices alcançados pela linha de plantio foram maiores que os da entrelinha (21,20 % na linha contra 9,25 % na entrelinha). Com isso, o IMC_{CMOL} da camada total de 0–40 cm apresentou melhores resultados para a linha de plantio que para a entrelinha. Na linha de plantio esse índice chegou a 13,35 % aos 4,69 anos, enquanto na entrelinha chegou a 8,88 % aos 5,44 anos. Ao final do décimo e último ano do período estudado os valores de IMC_{CMOL} da linha de plantio já eram de 31,97 %, enquanto na entrelinha eram de apenas 20,54 %.

O estoque de COT apresentou correlação mais elevada com o estoque de CL do que com o de CMOL (Quadro 10), tanto na linha quanto na entrelinha, porém a correlação do COT com o IMC_{CMOL} foi maior do que com o IMC_{CL} . Adicionalmente, a correlação do

Quadro 9. Equações de regressão para o índice de manejo do C calculado a partir do C da MOL (IMC_{CMOL}) (%), como variável do tempo de adoção (ano) do sistema agrossilvopastoril, na linha e entrelinha de plantio do eucalipto, em cada profundidade estudada. *, **, * e °: significativos a 0,1, 1, 5 e 10 %, respectivamente**

Profundidade	Linha	Entrelinha
cm		
0–10	$\hat{y} = 99,37 - 92,07***x^{0,5} + 23,46***x$ $R^2 = 0,98$	$\hat{y} = 97,65 - 77,87***x^{0,5} + 17,98***x$ $R^2 = 0,94$
10–20	$\hat{y} = 97,11 - 72,98***x^{0,5} + 15,61**x$ $R^2 = 0,92$	$\hat{y} = 98,37 - 79,53***x^{0,5} + 16,72***x$ $R^2 = 0,98$
20–40	$\hat{y} = 96,10 - 68,14***x^{0,5} + 15,50**x$ $R^2 = 0,80$	$\hat{y} = 98,28 - 82,07***x^{0,5} + 19,38***x$ $R^2 = 0,97$
0–40	$\hat{y} = 97,65 - 77,87***x^{0,5} + 17,98***x$ $R^2 = 0,94$	$\hat{y} = 98,05 - 76,43***x^{0,5} + 16,88***x$ $R^2 = 0,96$

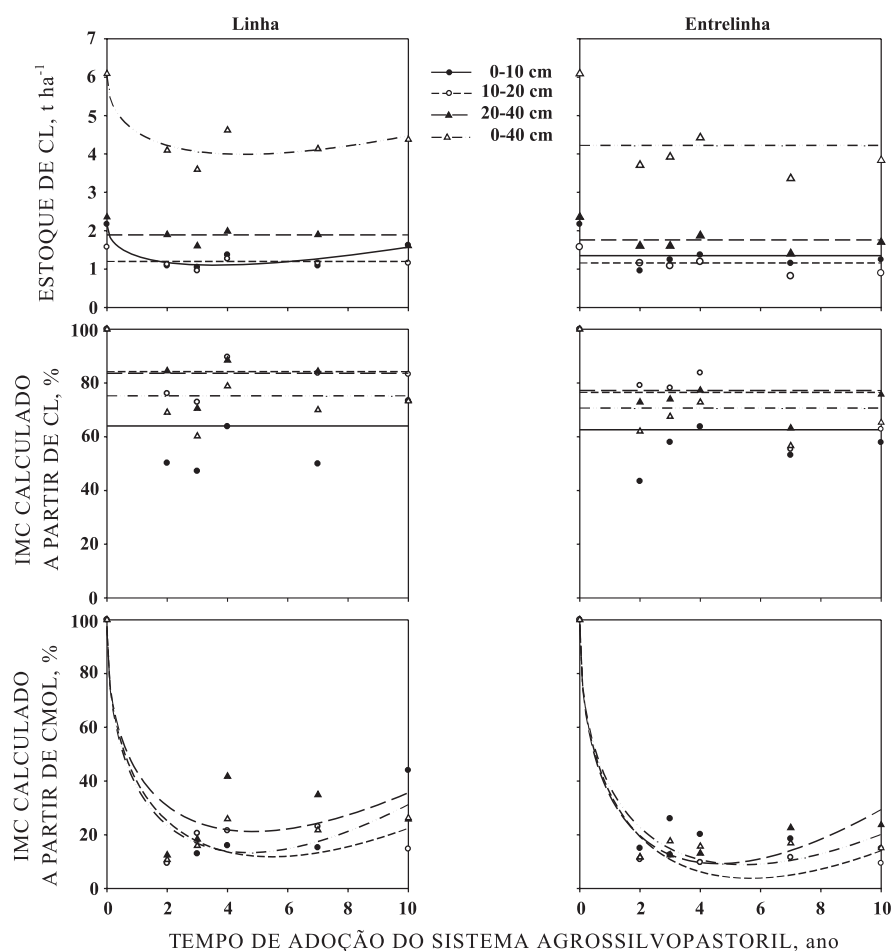


Figura 3. Estoques de C lábil (CL) e índices de manejo do C (IMC) calculados a partir do CL e do C da MOL (CMOL), como variável do tempo de adoção do sistema agrossilvopastoril, para as cinco profundidades de solo estudadas, na linha e na entrelinha de cultivo do eucalipto. ***, **, * e °: significativos a 0,1, 1, 5 e 10 % respectivamente.

Quadro 10. Correlações de Pearson para os estoques de C orgânico total (COT), N total (NT), C da matéria orgânica leve (CMOL), N da matéria orgânica leve (NMOL) e C lábil (CL); e índices de manejo do C, IMC_{CL} e IMC_{CMOL} , das amostras retiradas das profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, na linha e na entrelinha de plantio do eucalipto

	COT	NT	CMOL	NMOL	CL	IMC_{CL}	IMC_{CMOL}
Linha							
COT	1,00	0,87***	0,43***	0,28**	0,73***	0,36***	0,54***
NT		1,00	0,44***	0,25*	0,73***	0,30**	0,41***
CMOL			1,00	0,93***	0,64***	0,33**	0,82***
NMOL				1,00	0,53***	0,25*	0,75***
CL					1,00	0,60***	0,62***
IMC_{CL}						1,00	0,58***
IMC_{CMOL}							1,00
Entrelinha							
COT	1,00	0,83***	0,43***	0,24*	0,69***	0,42***	0,53***
NT		1,00	0,42***	0,20*	0,70***	0,35***	0,37***
CMOL			1,00	0,92***	0,58***	0,34**	0,83***
NMOL				1,00	0,47***	0,23*	0,76***
CL					1,00	0,64***	0,54***
IMC_{CL}						1,00	0,54***
IMC_{CMOL}							1,00

***, ** e *: significativos a 0,1, 1 e 5 % respectivamente.

COT com o CMOL e IMC_{CMOL} foi semelhante para as duas situações (linha e entrelinha). Por sua vez, a correlação do COT com CL e IMC_{CL} variou entre as amostras da linha e entrelinha. O IMC_{CMOL} mostrou maior reprodutibilidade que o IMC_{CL} , uma vez que a correlação com o COT, além de maior, foi bastante semelhante para as duas posições (linha e entrelinha). O IMC_{CMOL} confirmou a tendência de maiores perdas de C na entrelinha de plantio do eucalipto, de acordo com os estoques de COT. Contudo, o IMC_{CMOL} mostrou-se mais sensível ao manejo adotado. Portanto, o IMC_{CMOL} mostrou-se melhor que o IMC_{CL} , sendo uma ferramenta capaz de comparar sistemas de manejo quanto à sustentabilidade da MOS.

CONCLUSÕES

1. A implantação dos SASPs apresentou impacto negativo na MOS, levando à diminuição dos estoques de COT das camadas superficiais; o período necessário para que ocorra o restabelecimento dos estoques originais está além do período máximo estudado (10 anos). Embora a camada subsuperficial de 60–100 cm tenha apresentado acúmulo de C, esse efeito não foi sustentável.

2. A fração mais sensível ao manejo adotado foi a MOL livre, pois é pouco protegida e, portanto, apresentou as maiores reduções após a implantação dos SASPs, com tendência de recuperação nos SASPs mais antigos.

3. O CL e o IMC_{CL} não apresentaram tendências claras como variáveis do tempo de adoção dos SASPs, além de mostrarem valores diferentes de correlação com o COT na linha e na entrelinha de cultivo do eucalipto.

4. Ao contrário do IMC_{CL} , o IMC_{CMOL} foi sensível às alterações ocorridas na MOS ao longo do tempo de implantação dos SASPs. Além disso, apresentou correlação com o COT de maneira semelhante nos dois sítios estudados (linha e entrelinha). Isso, somado à simplicidade dos cálculos, o torna um bom índice para comparar sistemas de manejo quanto à sustentabilidade da MOS.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos pelo suporte logístico e pessoal da Votorantim Metais-Zinco, em especial ao Eng. Raul Melido, pelo auxílio na seleção das áreas do estudo. À FAPEMIG e ao CNPq, pelo contínuo suporte financeiro.

LITERATURA CITADA

- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. B. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo, 25:27-32, 2000.
- ANDRADE, C.M.S.; GARCIA, R.; COUTO, L. & PEREIRA, O.G. Fatores limitantes ao crescimento do capim Tanzânia em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto, na região dos Cerrados de Minas Gerais. R. Bras. Zootec., 30:1178-1185, 2001.
- ANDRADE, C.A.; OLIVEIRA, C. & CERRI, C.C. Qualidade da matéria orgânica e estoques de carbono e nitrogênio em Latossolo tratado com biossólido e cultivado com eucalipto. R. Bras. Ci. Solo, 29:803-816, 2005.
- BINKLEY, D.; KAYE, J.; BARRY, M. & RYAN, M.G. First-rotation changes in soil carbon and nitrogen in a *Eucalyptus* plantation in Hawaii. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:1713-1719, 2004.
- 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. Aust. J. Agric. Res., 46:1459-1466, 1995.
- BONGIOVANNI, M.D. & LOBARTINI, J.C. Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro- and microaggregates as affected by cultivation. Geoderma, 136:660-665, 2006.
- CANELLAS, L.P. & SANTOS, G.A. Humosfera: Tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas. Campos dos Goytacazes, CCTA/UENF, 2005. 309p.
- CERRI, C.E.P.; COLEMAN, K.; JENKINSON, D.S.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R. & CERRI, C.C. Modeling soil carbon from forest and pasture ecosystems of Amazon, Brazil. Soil Sci. Soc. Am. J., 67:1879-1887, 2003.
- CERRI, C.E.P.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; COLEMAN, K.; BERNOUX, M.; FALLOON, P.; POWLSON, D.S.; BATJES, N.; MILNE, E. & CERRI, C.C. Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models. Agric. Ecosyst. Environ., 122:46-57, 2007.
- CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. & SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. R. Bras. Ci. Solo, 29:777-788, 2005.
- DIEKOW, J. Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema de plantio direto. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 164p. (Tese de Doutorado)
- JANDL, R.; LINDNER, M.; VESTERDAL, L.; BAUWENS, B.; BARITZ, R.; HAGEDORN, F.; JOHNSON, D.W.; MINKKINEN, K. & BYRNE, K.A. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? Geoderma, 137:253-268, 2007.
- LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma, 123:1-22, 2004.
- LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L.; MACHADO, P.L.O.A. & GALVÃO, J.C.C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. R. Bras. Ci. Solo, 27:821-832, 2003.
- LIMA, W.P. Impacto ambiental do eucalipto. 2.ed. São Paulo, Edusp, 1993. 301p.

- MARIN, A.M.P.; MENEZES, R.S.C.; SILVA, E.D. & SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito da *Gliricidia sepium* sobre nutrientes do solo, microclima e produtividade do milho em sistema agroflorestal no agreste paraibano. R. Bras. Ci. Solo, 30:555-564, 2006.
- MENDHAM, D.S.; SANKARAN, K.V.; O'CONNELL, A.M. & GROVE, T.S. *Eucalyptus globulus* harvest residue management effects on soil carbon and microbial biomass at 1 and 5 years after plantation establishment. Soil Biol. Biochem., 34:1903-1912, 2002.
- NAKLANG, K.; WHITBREAD, A.; LEFROY, R.; BLAIR, G.; WONPRASAID, S.; KONBOON, Y. & SURIYA-ARUNROJ, D. The management of rice straw, fertilizers and leaf litters in rice cropping systems in Northeast Thailand. Plant Soil, 209:21-28, 1999.
- NEU, V. Influência da cobertura vegetal na ciclagem de nutrientes via solução do solo na região de Manaus – AM. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2005. 93p. (Tese de Mestrado)
- RUIZ, A.R. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). R. Bras. Ci. Solo, 29:297-300, 2005.
- SHRESTHA, R.K.; LADHA, J.K. & LEFROY, R.D.B. Carbon management for sustainability of an intensively managed rice-based cropping system. Biol. Fert. Soils, 36:215-223, 2002.
- SIX, J.; CALLEWAERT, P.; LENDERS, S.; DE GRYZE, S.; MORRIS, S.J.; GREGORICH, E. G.; PAUL, E.A. & PAUSTIAN, K. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. Soil Sci. Soc. Am. J., 66:1981-1987, 2002.
- SIXTA, H. Handbook of pulp. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2006. 1316p.
- STEVENSON, F.J. Humus chemistry: Genesis, compositions, reactions. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1994. 496p.
- SOLOMON, D.; FRITZSCHE, F.; LEHMANN, J.; TEKALIGN, M. & ZECH, W. Soil organic matter dynamics in the subhumid agroecosystems of the Ethiopian Highlands: Evidence from natural ^{13}C abundance and particle-size fractionation. Soil Sci. Soc. Am. J., 66:969-978, 2002.
- SPAGNOLLO, E. Dinâmica da matéria orgânica em agroecossistemas submetidos à queima e manejos dos resíduos culturais. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 186p. (Tese de Doutorado)
- TIROL-PADRE, A. & LADHA, K.J. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:969-978, 2004.
- TURNER, J. & LAMBERT, M.J. Change in organic carbon in forest plantation soils in Eastern Australia. For. Ecol. Manag., 133:231-247, 2000.
- TURNER, J.; LAMBERT, M.J. & JOHNSON, D.W. Experience with patterns of change in soil carbon resulting from forest plantation establishment in Eastern Australia. For. Ecol. Manag., 220:259-269, 2005.
- XAVIER, F.A.S.; MAIA, S.M.F.; OLIVEIRA, T.S. & MENDONÇA, E.S. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba – CE. R. Bras. Ci. Solo, 30:247-258, 2006.
- WENDLING, B. Carbono e nitrogênio no solo sob diferentes usos e manejos e sua modelagem pelo Century. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2007, 122p. (Tese de Doutorado)
- WILCKE, W. & LILIENFEIN, J. Soil carbon-13 natural abundance under native and managed vegetation in Brazil. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:827-832, 2004.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, L.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 19:1467-1476, 1988.

