

RODINEI FACCO PEGORARO

**SEQÜESTRO DE CARBONO E ALTERAÇÕES BIOQUÍMICAS DA MATÉRIA
ORGÂNICA DE SOLOS CULTIVADOS COM EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2007

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

P376s
2007

Pegoraro, Rodinei Facco, 1977-
Seqüestro de carbono e alterações bioquímicas da
matéria orgânica de solos cultivados com eucalipto /
Rodinei Facco Pegoraro. – Viçosa, MG, 2007.
ix, 140f. : il. ; 29cm.

Inclui anexo.

Orientador: Ivo Ribeiro da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Humus. 2. Solos - Teor de lignina. 3. Solos - Teor
dos fenóis. 4. Cromatografia a líquido. 5. Solos flores-
tais. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.417

RODINEI FACCO PEGORARO

**SEQÜESTRO DE CARBONO E ALTERAÇÕES BIOQUÍMICAS DA MATÉRIA
ORGÂNICA DE SOLOS CULTIVADOS COM EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 7 de dezembro de 2007.

Prof. Roberto Ferreira de Novais
(Co-Orientador)

Prof. Nairam Félix de Barros
(Co-Orientador)

Prof. Arnaldo Chaer Borges

Pesq. Fernando Palha Leite

Prof. Ivo Ribeiro da Silva
(Orientador)

A minha família:

Juliana (esposa)

Luigi (filho)

Valdir e Tereza (pais)

Tarciano e Ronaldo (irmãos)

Adelina e Vitorino in memoriam (avós)

Vitória e João (avós) in memoriam

Cici (sogra) e ao vô João in memoriam

Que sempre me apoiaram nos momentos mais difíceis da minha caminhada....

...gostaria de dedicar esta conquista!

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, que me concedeu o privilégio desta oportunidade.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão das bolsas de estudo.

Ao Prof. Ivo Ribeiro da Silva, pela orientação, pelos ensinamentos e pela amizade construída e transmitida no transcorrer do tempo.

Aos conselheiros Roberto Ferreira de Novais e Nairam Félix de Barros, aos professores Maurício Dutra Costa e Reinaldo Bertola Cantarutti, e ao pesquisador Fernando Palha Leite, pela colaboração e dedicação.

À empresa Aracruz e ao pesquisador Sebastião pela disposição das áreas para realização deste trabalho.

Aos laboratoristas Cardoso e Beto; às secretárias Luciana, Júnia e Sônia, pela colaboração e amizade.

Aos colegas de pesquisa Carlos, Fabrício, Flancer, Tiago, Leonardo, Guilherme Jesus, Augusto, César, Eulene, Emanuelle, Michelle, Dalton, Karina, Caroline, Fernanda, Beno, Valdinei, Adelião, Mistura, Ratinho, Alcides e colegas de disciplinas, pelo auxílio e amizade.

Aos funcionários, Geraldo, Zé Luiz, Carlinhos, João, Pedro Lelis e Tião, pela prontidão e amizade nos seus serviços prestados.

Aos professores com os quais tive a oportunidade de cursar disciplinas, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos amigos Lurdinha e Juquinha, pela amizade adquirida no transcorrer do período de doutorado.

A toda a família, que mesmo distante sempre esteve do meu lado, ajudando-me e dando-me força para continuar firme na caminhada do dia-dia.

Aos velhos e aos novos amigos, que nos churrascos afora, compartilharam com um pouco da minha e eu das suas vidas.

E a todos que, de alguma forma, tiveram contribuição na realização deste trabalho.

..... que Deus lhes recompense um dia pelos seus atos!

..... Meu muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO-----	vi
ABSTRACT-----	viii
INTRODUÇÃO GERAL-----	1
LITERATURA CITADA-----	4
CAPÍTULO I-----	9
ESTOQUES E BALANÇO DE CARBONO NA BIOMASSA E NO SOLO AO LONGO DE UMA ROTAÇÃO DE EUCALIPTO SOB SISTEMA DE REFORMA E DE TALHADIA-----	9
1.1. RESUMO-----	9
1.2. ABSTRACT-----	10
1.3. INTRODUÇÃO-----	11
1.4. MATERIAL E MÉTODOS-----	13
1.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	17
1.5.1. Estoques de carbono no ecossistema florestal-----	17
1.5.2. Estoques de carbono nas árvores de eucalipto-----	22
1.5.3. Estoques de carbono na matéria orgânica do solo e manta orgânica-----	26
1.5.4. Incremento de C no ecossistema-----	30
1.6. CONCLUSÕES-----	34
1.7. LITERATURA CITADA-----	35
CAPÍTULO II-----	41
ABUNDÂNCIA DE FENÓIS DERIVADOS DA LIGNINA, CARBOIDRATOS E AMINOAÇÚCARES EM LITTER E SOLOS CULTIVADOS COM EUCALIPTO E PASTAGEM-----	41
2.1. RESUMO-----	41
2.2. ABSTRACT-----	42
2.3. INTRODUÇÃO-----	43
2.4. MATERIAL E MÉTODOS-----	45
2.4.1. Determinação do carbono orgânico total e nitrogênio total do solo-----	48
2.4.2. Oxidação da lignina com CuO e análise dos derivados por cromatografia líquida-----	49
2.4.3. Separação e quantificação de carboidratos-----	50
2.4.4. Separação e quantificação de aminoaçúcares-----	52
2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	53
2.5.1. Teores de fenóis derivados de lignina (VSC) e carboidratos na serapilheira-----	53
2.5.2. Teores totais de fenóis derivados de lignina (VSC), carboidratos e aminoaçúcares no solo-----	59
2.6. CONCLUSÕES-----	64
2.7. LITERATURA CITADA-----	65

CAPÍTULO III-----	70
CARBOIDRATOS, AMINOAÇÚCARES E COMPOSTOS FENÓLICOS DERIVADOS DA LIGNINA NA SERAPILHEIRA E EM SOLO CULTIVADO COM EUCALIPTO DE CURTA-ROTAÇÃO NO SISTEMA CONVENCIONAL E FERTIRRIGADO-----	70
3.1. RESUMO-----	70
3.2. ABSTRACT -----	71
3.3. INTRODUÇÃO -----	72
3.4. MATERIAL E MÉTODOS-----	73
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	78
3.5.1. Teores totais de fenóis derivados de lignina (VSC) totais e carboidratos totais na serapilheira -----	78
3.5.2. Teor de fenóis derivados de lignina (VSC), carboidratos e aminoaçúcares no solo-----	82
3.6. CONCLUSÕES -----	90
3.7 LITERATURA CITADA-----	90
CAPÍTULO IV-----	95
BIOMARCADORES DERIVADOS DE PLANTA E DE MICRORGANISMOS EM SOLOS DE TABULEIROS COSTEIROS SOB USOS FLORESTAIS DISTINTOS -----	95
4.1. RESUMO-----	95
4.2. ABSTRACT -----	96
4.3. INTRODUÇÃO -----	97
4.4. MATERIAL E MÉTODOS-----	99
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	102
4.5.1. Teores de fenóis derivados de lignina (VSC) e carboidratos na serapilheira -----	102
4.5.2. Teores de fenóis derivados de lignina (VSC), carboidratos e aminoaçúcares no solo-----	108
4.6. CONCLUSÕES -----	118
4.7. LITERATURA CITADA -----	118
CONCLUSÕES GERAIS-----	124
ANEXOS -----	125

RESUMO

PEGORARO, Rodinei Facco, D Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2007.
Seqüestro de carbono e alterações bioquímicas da matéria orgânica de solos cultivados com eucalipto. Orientador: Ivo Ribeiro da Silva. Co-Orientadores: Roberto Ferreira de Novais e Nairam Félix de Barros.

A manutenção da matéria orgânica do solo (MOS) em cultivos comerciais de eucalipto está associada à adoção de técnicas adequadas de manejo da cultura e do solo. Alterações nos estoques de C e na qualidade da MOS provocadas pelo uso e manejo do solo podem ser identificadas pela quantificação dos estoques de C nos compartimentos florestais (solo e planta) ao longo do tempo de cultivo, e pela presença de compostos bioquímicos (bioindicadores) derivados de plantas e da atividade microbiana. Este estudo teve o objetivo de avaliar alterações na estocagem de C no solo e nas plantas de eucalipto durante uma rotação (sete anos), conduzido sob sistema de talhadia e reforma, bem como, avaliar as alterações causadas pelo cultivo do eucalipto convencional comparado com cultivos em sistema fertirrigado, eucalipto de longa rotação (24 anos), pastagem, acácia e mata nativa: nos teores de fenóis derivados de lignina, carboidratos e aminoaçúcares, no estágio de decomposição da MOS, e na contribuição de compostos de origem microbiana para a MOS em solos do litoral Norte do Espírito Santo. Os resultados indicaram que o cultivo de eucalipto no sistema de talhadia teve os maiores estoques (192 t ha^{-1}) e incrementos (36 t ha^{-1} em sete anos) de C no ecossistema (plantas + serapilheira + solo) após sete anos de cultivo, seguido por clones mais produtivos em sistema de reforma. Os maiores incrementos nos estoques de C deveram-se à maior produtividade, estocagem de C na MOS e nas raízes das plantas. O maior aporte de matéria seca da serapilheira, água e nutrientes no sistema fertirrigado favoreceu o incremento dos teores de C orgânico, N total, carboidratos totais, lignina, e aminoaçúcares no solo, indicando maior atividade microbiana no solo do sistema de

cultivo de eucalipto fertirrigado em comparação ao sistema convencional. Também, notou-se o alargamento da relação dos aminoácidos glucosamina/ácido murâmico no sistema fertirrigado e no cultivo da acácia, indicando maior contribuição fúngica e de outros microorganismos secundários, produtores de glucosamina (actinomicetos), para a formação da MOS. Nesses cultivos (eucalipto fertirrigado e acácia), o aumento da atividade fúngica pode favorecer a agregação de partículas de solo com compostos orgânicos e aumentar o tempo de residência do C no solo. A rotação de cultivos de eucalipto com acácia e o aumento do tempo de rotação do eucalipto favoreceram o estreitamento da relação lignina/N e C/N da serapilheira, aumentaram o teor de lignina, carboidratos e aminoácidos de origem microbiana. Também se observou que nos solos cultivados com eucalipto há maior contribuição direta de componentes de origem vegetal para a matéria orgânica que aqueles de origem microbiana, em comparação aos solos sob mata nativa, acácia e pastagem. A relação ácido/aldeído dos fenóis derivados de lignina no solo cultivado com eucalipto em rotação curta é menor, indicando que a MOS encontra-se em estágio menos avançado de decomposição do que no solo cultivado com acácia, e naquele de mata nativa.

ABSTRACT

PEGORARO, Rodinei Facco, D Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2007.
Carbon sequestration and biochemical changes in organic matter of soils cultivated with eucalyptus. Adviser: Ivo Ribeiro da Silva. Co-Advisers: Roberto Ferreira de Novais and Nairam Felix de Barros.

The maintenance of soil organic matter (SOM) in commercial plantations of eucalyptus depends on the adoption of appropriate crop and soil management. Changes in inventories of C and the quality of the MOS caused by the use and soil management can be identified by quantifying the stocks of C in forest compartments (soil and plant) over time of cultivation, and the presence of biochemical compounds (bioindicators) derived from plant and microbial activity. This study aimed to evaluate changes in the storage of C in the soil and in plants during a rotation (seven years) of eucalyptus, conducted by coppicing and new planting (reform) wealso assessed the changes caused by the cultivation of eucalyptus compared under conventional management with that under fertirrigated system, long rotation eucalyptus (24 years), pasture, acacia and native forest on the levels of phenols derived from lignin, carbohydrates and amino sugars, the stage of decomposition of SOM, and the contribution of compounds of microbial origin for SOM in coastal plain soils of northern Espírito Santo state, Brasil. The results showed that the cultivation of eucalyptus through coppicing had the largest stock (192 t ha^{-1}) and increment (36 t ha^{-1} in seven years) of C in the ecosystem (plant + litter + soil) after seven years of cultivation, followed by more productive clones in the reform system. The largest increases in C stocks were due to higher productivity, storage of C in the SOM and roots of plants. The greater apport of dry matter of litter, water and nutrients in the fertirrigated system favored the increase of organic C, total N, total carbohydrates, lignin, amino sugars in the soil, indicating greater microbial activity in the soil, of eucalyptus under the fertirrigated as compared to that under the conventional system. Also,

it was noticed the widening of the there is the extension of the relationship of amino glucosamine / muramic acid ratio in the soil of eucalyptus under system fertirrigated and in that under acacia cultivation, indicating greater contribution of fungi and other microorganisms, producers of glucosamine (actinomycetes) for the formation of the SOM. In soils under such (fertirrigated eucalyptus and acacia), the increased fungal activity can encourage aggregation of soil particles with organic compounds and increase the mean residence time of C in soil. The rotation of eucalyptus crops with acacia and the increase in the rotation length of eucalyptus favored the narrowing of the lignin / N and C / N ratios of the litter, increased the contents of lignin, carbohydrates and amino sugars of microbial origin. It was also found that the soil under eucalyptus there is more direct contribution of compounds of plant origin for the organic matter than those of microbial origin as compared to the soils under native forest, acacia and pasture. The acid / aldehyde ratio of phenols derived from lignin in the soil under short rotation eucalyptus is lower, indicating that the SOM is in a less advanced stage of decomposition than that in soils under acacia plantation and native forest.

INTRODUÇÃO GERAL

A sustentabilidade da produtividade de solos cultivados com eucalipto depende, dentre outros fatores, da manutenção dos teores de matéria orgânica do solo (MOS). Esta tem importante papel na qualidade física, química e biológica do solo (Stevenson, 1994; Baldock & Nelson, 2000), além de atuar como dreno de CO₂ atmosférico (Krull & Skjemstad, 2003; Lal, 2005; Epron et al., 2006). Notoriamente, a redução da MOS está relacionada à diminuição na produtividade de muitas culturas (Bauer & Black, 1994), tanto agrícolas como florestais, suportando sua utilização como indicadora da qualidade do solo. Sua formação e, ou, constituição é fortemente influenciada, dentre outros fatores, pelo tipo e manejo das plantas no ecossistema (Mendham et al., 2002; Lal, 2005). Assim, plantas e técnicas de manejo que proporcionem menor revolvimento do solo (Bayer et al., 2006), maior relação raiz-parte aérea (Rasse et al., 2005) e maior aporte de resíduos ao solo, pelo aumento da produtividade (Wilts et al., 2004; Deckmyn et al., 2004; Wu et al. 2005; Diekow et al., 2005), podem contribuir para a maior estabilização do C no solo (Silva et al., 2004).

A substituição de pastagens nativas e florestas naturais por sistemas agrícolas de cultivo podem levar a uma redução no conteúdo de C do solo, primariamente em resposta à aceleração na taxa de decomposição, causada pelo manejo do solo e maior aeração e exposição física da MOS aos microrganismos decompositores (Silva et al., 1994; Richter et al., 1999; Zinn et al., 2002). A longo prazo, a economia de C do solo nesses sistemas seriam governadas pela produtividade das culturas que, por sua vez, resultariam em maior aporte de resíduos vegetais ao solo (Zinn et al., 2002).

Alterações no conteúdo de C do solo estão associadas, principalmente, às interações entre processos físicos, a exemplo da exposição do solo à erosão, a alteração da comunidade microbiana, e a processos químicos, como a estabilização de compostos orgânicos ao formarem complexos argilo-orgânicos. Em muitas situações, esses processos podem favorecer a síntese da MOS, principalmente da fração humificada. Isso ocorre quando o aporte de

resíduos vegetais ao solo é maior que a demanda por energia pela vida existente naquele local. Do contrário, pode haver consumo do C ou de outro elemento originário da decomposição da MOS, causando efeito “priming” negativo levando a uma redução no seu teor (Fontaine et al., 2003).

Sistemas de cultivo conservacionistas que privilegiam o aporte de resíduos ao solo e menor revolvimento deste podem mitigar a redução nos conteúdos de C e N do solo, causada por mudanças em sistemas naturais. Plantações de eucalipto estão inseridas neste contexto, como potenciais seqüestradoras de C da atmosfera, pela expressiva produção de biomassa em curto espaço de tempo. No entanto, a maior riqueza de lignina, largas relações C:N e lignina:N do “litter” (Lemma et al., 2007) influenciam a atividade microbiana do solo (Mendham et al., 2004), e podem dificultar a conversão de resíduos vegetais em MOS, possivelmente pela baixa disponibilidade de N do litter (Forrester et al., 2006). O cultivo de outras espécies florestais capazes de fixar N₂ atmosférico, em rotação ou em consórcio com o eucalipto de rotação curta, tem demonstrado maior eficácia em aumentar o teor de C e N no solo, possivelmente, por estreitar as relações C:N e lignina:N, aumentar a labilidade de componentes do litter e favorecer a estabilização da MOS nativa (Forrester et al., 2006), além de alterar a constituição bioquímica do litter e a atividade microbiana do solo (Neff et al., 2002; Sjöberg et al., 2004).

O aumento do aporte de N, via fertilizante ou fixação biológica, também pode levar à redução na taxa de decomposição das substâncias húmicas do solo (Berg & Matzner 1997; Matzner, 2002) e incrementar teores de C em formas recalcitrantes (Neff et al., 2002; Hagedorn et al., 2003), resultando em acúmulo de MOS estabilizada (Berg & Matzner, 1997). Neste sentido, além da quantidade, a qualidade do resíduo aportado ao solo interfere diretamente no seu processo de decomposição e formação da MOS. Dentre os componentes do litter, a lignina é a de decomposição mais lenta em virtude da sua maior complexidade estrutural (Heim & Schmidt, 2007) e, por isso, contribui, substancialmente, com o

compartimento de C estável no solo (Stevenson, 1994; Rasse et al., 2006). A decomposição da lignina no solo é limitada a poucos microrganismos, destacando-se os fungos (“white-rot”, “brown-rot” e “soft-rot”) como os principais agentes degradadores.

A estabilização da lignina no solo pode ser favorecida pela maior presença de N na serapilheira ou no solo. O incremento do teor de N no solo pode reduzir a habilidade competitiva de fungos responsáveis pela decomposição da lignina (Fog, 1998), suprimir a formação de enzimas que fazem sua quebra (Carreiro et al., 2000). Adicionalmente, o N pode interagir com resíduos de lignina e outros compostos fenólicos, formando complexos de alta resistência à degradação microbiana (Stevenson, 1994). Conseqüentemente, resíduos de planta com alto teor de lignina podem aumentar a formação e estabilização de C recalcitrante no solo em resposta à adição de N. Também, diferentes estádios de decomposição ou humificação destes compostos fenólicos podem ser identificados pela abundância de grupamentos ácidos e aldeídos no solo (relação Ac/Al), sendo o grau de humificação proporcional a esta relação (Otto & Simpson, 2006).

Embora se considere que o teor de lignina nos resíduos de plantas tenha grande importância para a formação da MOS, em virtude da maior recalcitrância, os compostos orgânicos responsáveis pela maior entrada de C em solos de florestas advêm de celulose e hemicelulose, compostos orgânicos predominantes nas plantas (Kaiser & Benner, 2000; Möller et al., 2002). Açúcares derivados de plantas, especialmente polímeros de pentoses, constituídos por sacarídeos tais como, arabinose (ara) e xilose (xil), atuam como fonte de energia e C para os microrganismos do solo que, por sua vez, sintetizam e aumentam a abundância de polímeros de hexoses-galactose (gal) + manose (man) no solo (Solomon et al., 2002; Spielvogel et al., 2007). Assim, com base na abundância desses açúcares torna-se possível identificar a contribuição relativa de plantas e microrganismos para a formação da MOS. Todavia, não é possível identificar a contribuição microbiana (Zhang et al., 1998), uma vez que distintas comunidades microbianas produzem diferentes açúcares. No entanto, fungos

decompositores produzem tipicamente o aminoaçúcar glucosamina, enquanto ácido murâmico é produzido apenas por bactérias (Zhang et al., 1998; Solomon et al., 2002; Möller et al., 2002; Simpson et al., 2004). Portanto, é possível se estabelecer relações a exemplo de glucosamina : ácido murâmico, que servem como bio-indicadores da contribuição fúngica e bacteriana para a MOS (Zhang et al., 1998; Amelung et al., 1999; Liang et al., 2007) e avançar no processo de entendimento de mecanismos envolvidos na estabilização de C e N em solos. Embora vários estudos tenham avaliado os estoques e a origem da MOS em florestas temperadas, pouco se conhece sobre a MOS em ecossistemas tropicais, em especial nas plantações de eucalipto de curta rotação. Portanto, o presente estudo objetivou quantificar os estoques de C nos componentes da biomassa de eucalipto e no solo, bem como, avaliar as possíveis alterações nos estoques e na qualidade da MOS em solos cultivados com eucalipto sob manejos distintos, tendo como referência os solos sob vegetação nativa e usos alternativos na região dos Tabuleiros Costeiros, na região Norte do Estado do Espírito Santo.

LITERATURA CITADA

- AMELUNG, W.; FLACH, K.W. & ZECH, W. Neutral and acidic sugars in particle-size fractions as influenced by climate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:865-873, 1999.
- BALDOCK, J.A. & NELSON, P.N. Soil organic matter. In: SUMMER, M.E. *Handbook of Soil Sciences*, CRC Press, Boca Raton, Florida. 2000, p.1325-1384.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil Till. Res.* 86:237-245, 2006.
- BAUER, A. & BLACK. A.L. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:185-193, 1994.
- BERG, B. & MATZNER, E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems. *Environ. Rev.*, 5:1-25, 1997.

- CARREIRO, M.M.; SINSABAUGH, R.L.; REPERT, D.A. & PARKHURST, D.F. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology*, 81:2359-2365, 2000.
- DECKMYN, G.; MUYS, B.; QUIJANO, J.G. & CEULEMANS, R. Carbon sequestration following afforestation of agricultural soils: comparing oak/beech forest to short-rotation poplar coppice combining a process and a carbon accounting model. *Global Change Biol.*, 10:1482-1491, 2004.
- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. & KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil Till. Res.*, 81:87–95, 2005.
- EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; DELEPORTE, P.; IFO, S.; KAZOTTI, G.; M'BOU, A.T.; MOUVONDY, W.; ANDRE, L.S.; ROUPSARD, O.; JOURDAN, C. & HAMEL, O. Soil carbon balance in a clonal Eucalyptus plantation in Congo: effects of logging on carbon inputs and soil CO₂ efflux. *Global Change Biol.*, 12, 1021-1031, 2006.
- FOG, K. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter. *Biol. Rev.*, 63:433-462, 1988.
- FONTAINE, S.; MARIOTTI, A. & ABBADIE, L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biol. Biochem.*, 35:837–843, 2003.
- FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J. & COWIE, A.L. Carbon allocation in a mixed-species plantation of Eucalyptus globulus and Acacia mearnsii. *For. Ecol. Manag.*, 233:275-284, 2006.
- HAGEDORN, F.; SPINNLER, D. & SIEGWOLF, R. Increased N deposition retards mineralization of old soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.*, 35:1683-1692, 2003.
- HEIM, A. & SCHMIDT, M.W.I. Lignin turnover in arable soil and grassland analysed with two different labelling approaches. *Europ. J. Soil Sci.*, 58:599-608, 2007.

- KAISER, K. & BENNER, R. Determination of amino sugars in environmental samples with high salt content by high-performance anion-exchange chromatography and pulsed amperometric detection. *Anal. Chem.*, 72:2566-2572, 2000.
- KRULL, E.S. & SKJEMSTAD, J.O. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ profiles in ^{14}C -dated Oxisol and Vertisols as a function of soil chemistry and mineralogy. *Geoderma*, 112:1-29, 2003.
- LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. *For. Ecol. Manag.*, 220:242-258, 2005.
- LEMMA, B.; NILSSON, I.; KLEJA, D.B.; OLSSON, M. & KNICKER, H. Decomposition and substrate quality of leaf litters and fine roots from three exotic plantations and a native forest in the southwestern highlands of Ethiopia. *Soil Biol. Biochem.*, 39:2317-2328, 2007.
- LIANG, C.; ZHANG, X.; RUBERT IV, K.F. & BALSER, T.C. Effect of plant materials on microbial transformation of amino sugars in three soil microcosms. *Biol. Fertil. Soils*, 43:631-639, 2007.
- MATZNER, K.M.E. Nitrogen content of forest floor Oa layers affects carbon pathways and nitrogen mineralization. *Soil Biol. Biochem.*, 34:1807-1813, 2002.
- 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.
- MENDHAM, D.S.; HEAGNEY, E.C.; CORBEELS, M.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S. & MCMURTRIE R.E. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*. *Soil Biol. Biochem.*, 36:1067-1074, 2004.
- MÖLLER, A.; KAISER, K. & ZECH, W. Lignin, carbohydrate, and amino sugar distribution and transformation in the tropical highland soils of northern Thailand under cabbage cultivation, Pinus reforestation, secondary forest, and primary forest. *Austr. J. Soil Res.*, 40:977-998, 2002.

- NEFF, J.C.; TOWNSEND, A.R.; GLEIXNER, G.; LEHMAN, S.J.; TURNBULL, J. & BOWMAN, W.D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature*, 419:915-917, 2002.
- OTTO, A. & SIMPSON, M.J. Evaluation of CuO oxidation parameters for determining the source and stage of lignin degradation in soil. *Biogeochemistry*, 80:121-142, 2006.
- RASSE, D.P.; DIGNAC, M.F.; BAHRI, H.; RUMPEL, C.; MARIOTTI, A. & CHENU, C. Lignin turnover in an agricultural field: from plant residues to soil-protected fractions. *Europ. J. Soil Sci.*, 57:530-538, 2006.
- RASSE, D.P.; RUMPEL, C. & DIGNAC, M.F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant Soil*, 269: 341-356, 2005.
- RICHTER, D.D.; MARKEWITZ, D.; TRUMBORE, S.E. & WELLS, C.G. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a reestablishing forest. *Nature*, 400:56-58, 1999.
- SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & SILVA, E.F. Manejo de resíduos e matéria orgânica do solo em plantações de eucalipto: uma questão estratégica para a manutenção da sustentabilidade. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.29, 2004, p.10 - 20.
- SILVA, J.E.; LEMAINSKI, J. & RESCK, D.V.S. Perdas de matérias orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de Cerrados do Oeste baiano. *R. Bras. Ci. Solo*. 18:541-547, 1994.
- SIMPSON, R.T.; FREY, S.D.; JOHAN SIX, J.& THIET, R.K. Preferential accumulation of microbial carbon in aggregate structures of no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1249-1255, 2004.
- SJÖBERG, G.; KNICKER, H.; NILSSON, S.I. & BERGGREN, D. Impact of long-term N fertilization on the structural composition of spruce litter and mor humus. *Soil Biol. Biochem.*, 36:609-618, 2004.

- SOLOMON, D.; FRITZSCHE, F.; TEKALIGN, M.; LEHMANN, J. & ZECH W. Soil Organic matter composition in the subhumid Ethiopian highlands as influenced by deforestation and agricultural management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66:68-82, 2002.
- SPIELVOGEL, S.; PRIETZEL, J. & KÖGEL-KNABNER, I. Changes of lignin phenols and neutral sugars in different soil types of a high-elevation forest ecosystem 25 years after forest dieback. *Soil Biol. Biochem.*, 39:655-668, 2007.
- STEVENSON, F.J. *Humus Chemistry: Genesis, Composition and Reactions*. 2.ed. New York, Willey & Sons Inc., 1994. 496p.
- WILTS, A.R.; REICOSKY, D.C.; ALLMARAS, R.R. & CLAPP, C.E. Long-term corn residue effects: harvest alternatives, soil carbon turnover, and root-derived carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1342-1351, 2004.
- WU, T.; SCHOENAU, J.J.; LI, F.; QIAN, P.; MALHI, S.S. & SHI, Y. Influence of tillage and rotation systems on distribution of organic carbon associated with particle-size fractions in Chernozemic soils of Saskatchewan, Canada. *Biol. Fertil. Soils*, 42:338-344, 2006.
- ZHANG, X.; AMELUNG, W.; YUAN, Y. & ZECH, W. Amino sugar signatures of particle size fractions in soils of the native prairie as affected by climate. *Soil Sci.*, 163:220-229, 1998.
- ZINN, Y.L.; RESCK, D.V.S. & SILVA, J.E. Soil organic carbon as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the Cerrado region of Brasil. *For. Ecol. Manage.*, 166:285-294, 2002.

CAPÍTULO I

**ESTOQUES E BALANÇO DE CARBONO NA BIOMASSA E NO SOLO AO LONGO
DE UMA ROTAÇÃO DE EUCALIPTO SOB SISTEMA DE REFORMA E DE
TALHADIA**

1.1. RESUMO

Cultivos de eucalipto de curta rotação e com alta produtividade têm grande potencial de seqüestro de CO₂ da atmosfera. Todavia, pouco se conhece sobre os efeitos de materiais genéticos e da adoção de técnicas de manejo distintas nos estoques de C nesse ecossistema. Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do cultivo de diferentes clones de eucalipto em sistema de talhadia (RB), reforma com mudas clonais (RF) e reforma com mudas originárias de semente (RFS) nos estoques e incremento de C em vários componentes do ecossistema ao longo de uma rotação. Os resultados demonstraram que o clone 1 RB foi o que apresentou maior estoque e incremento de C no ecossistema, seguido do clone 2 RF e do 4 RF, principalmente pela maior alocação de C na MOS e nas raízes grossas. O sistema de talhadia destacou-se por apresentar maior estoque de C na MOS, 106 t ha⁻¹, na camada até 1,2 m de profundidade e incremento correspondente a 33 t ha⁻¹ de C na MOS, como resultado da manutenção do seu sistema radicular e do não revolvimento do solo durante a condução da rebrota. A MOS foi o compartimento que apresentou maiores estoques de C em relação a todo o ecossistema (solo e planta) com, aproximadamente, 55 % nos cultivos em sistema de talhadia, 53 % no sistema de reforma com mudas clonais (originadas de microestaquia) e 51 % no sistema de reforma com mudas originadas de semente. O estoque de C na MOS em área cultivada com mudas originárias de sementes, as quais apresentaram maior relação raiz:parte aérea, não diferiu daquela em áreas plantadas com mudas clonais ao final da rotação.

CARBON STOCKS AND BALANCE IN THE BIOMASS AND SOIL A LONG ROTATION OF EUCALIPT UNDER REFORM AND COPPICE SYSTEMS

1.2. ABSTRACT

Short-rotation eucalyptus and with high productivity have great potential for CO₂ sequestration from the atmosphere. However, little is known about the effects of eucalypt clones and distinct management practices on C stocks in this ecosystem. Therefore, this study aimed to evaluate the effect of cultivating different clones of eucalyptus under coppice system (RB), reform (new planting) with clonal seedlings (RF), and reform with seedlings originated from seed (RFS) on C increments and C stocks in various components of the ecosystem along a rotation (seven years). The results showed that the clone 1 RB was the one with the highest C stocks and C increment in the ecosystem, followed by clones 2 RF and 4 RF, mainly as a result of greater allocation of C in soil organic matter (SOM) and coarse roots. The coppice system shaved up by presenting the largest C stock, 106 t ha⁻¹, in the soil layer up to 1.2 m deep and the largest C increment, corresponding to 33 t ha⁻¹ in the SOM, as a result of maintaining its root system and not disturbing the soil for site preparation. The SOM is the largest C compartment in the entire ecosystem (soil at plant) accounting for approximately 55% of the total C stock in the coppice system, 53% in the system under reform with clonal seedlings and 51% in the system reform with seedlings originated from seeds. By the end of the rotation the stock of C in SOM in the area planted with seedlings originating from seeds, which had greater root: shoot ratio, did not differ from that in areas planted with clonal seedlings.

1.3. INTRODUÇÃO

O aumento da concentração de CO₂ na atmosfera desde a revolução industrial é atribuído principalmente ao aumento da utilização de combustíveis fósseis, fabricação de cimento, e substituição de florestas nativas (Malhi et al, 1999; Soares & Oliveira, 2002). Esses fatores têm sido motivo da crescente preocupação da sociedade em razão das possíveis alterações no clima do planeta (Cerri et al., 2007). Estima-se que, aproximadamente, 3,4 Gt de C seja acumulada por ano na atmosfera (Swift, 2001). Grande parte desse C (CO₂) gerado pela atividade antrópica pode, potencialmente, ser estocado no solo. A matéria orgânica do solo (MOS) é de fundamental importância no ciclo global do C e se constitui no maior reservatório de C orgânico terrestre (Bruce et al.; 1999; Swift, 2001; Lal, 2005; Epron et al., 2006).

A formação da MOS e estabilização do C orgânico definem a magnitude dos estoques de C no solo, os quais são influenciados, dentre outros fatores, pelo tipo e manejo dos cultivos no ecossistema (Mendham et al., 2002, Lal, 2005). Assim, plantas e técnicas de manejo que proporcionem menor revolvimento do solo (Bayer et al., 2006), maior relação raiz-parte aérea (Rasse et al., 2005) e maior aporte de resíduos ao solo, pelo aumento da produtividade (Wilts et al., 2004; Deckmyn et al., 2004; Wu et al. 2005; Diekow et al., 2005), combinados com a não retirada de resíduos da colheita, incluindo a casca de árvores como no caso do eucalipto, podem contribuir para a maior alocação do C no solo e, por sua vez, manter ou até aumentar o seu estoque (Silva et al., 2004). Na região Norte do Estado do Espírito Santo as áreas cultivadas com clones de eucalipto mais produtivos são as que apresentam os maiores estoques de MOS (Grespan, 1997).

No Brasil, a maioria das florestas comerciais de eucalipto são colhidas, aproximadamente, aos sete anos de idade. A próxima rotação pode ser feita no sistema de reforma, ou seja, envolvendo o preparo da área após a colheita e novo plantio, ou no sistema

de talhadia, que se refere à condução da rebrota, sem preparo do solo e com pouca interferência pós-colheita na área (Martins, 1995).

O sistema de condução de rebrota do eucalipto favorece o rápido aporte de biomassa vegetal da parte aérea e a manutenção de maior quantidade de raízes vivas (Teixeira, 1996) que, aliado ao não revolvimento do solo no início da próxima rotação, pode contribuir para maior acúmulo de C no ecossistema florestal (Deckmyn et al., 2004). Adicionalmente, nas áreas de eucalipto com condução de rebrota, as taxas de decomposição dos resíduos vegetais e, possivelmente, da MOS podem ser menores e favorecer o maior acúmulo de C no solo. No povoamento de eucalipto com um ano e meio de idade, conduzido por talhadia, era maior o estoque de serapilheira ($13,85 \text{ t ha}^{-1}$) de matéria seca em comparação a povoamento reformado ($9,56 \text{ t ha}^{-1}$). Além da maior deposição de restos vegetais pela desbrota, nos povoamentos com condução da rebrota foram encontradas menores taxas de decomposição da serapilheira foliar (constante $k = 0,67$) do que nas áreas reformadas ($k = 0,93$) (Cunha et al., 2005). O sistema de condução de rebrota tem sido preterido em detrimento da reforma na maioria das áreas cultivadas com eucalipto, em virtude da baixa taxa de rebrota de plantas colhidas e, ou, pelas vantagens de substituição do material genético por outro melhor adaptado e mais produtivo (Martins, 1995; Sims et al., 1999; Sims et al., 2001; Whittock et al., 2004).

A indisponibilidade de clones adaptados às mais variadas condições climáticas e menores custos das mudas, em muitas regiões são considerados fatores que justificam os plantios com mudas originárias de semente. Quando adultas essas plantas podem apresentar maior produção de raízes grossas e galhos grossos, e menor biomassa de lenho em relação a plantas clonais, resultando em maior relação raiz/parte aérea (Mello et al., 1998). Sabe-se que o C derivado de raízes pode apresentar maior tempo de residência no solo do que aquele derivado da parte aérea (Rasse et al., 2005). Dessa forma, é possível que povoamentos

plantados com mudas derivadas de sementes sejam mais efetivos no aporte de MOS que aqueles implantados com mudas clonais.

Além do C seqüestrado no solo na forma de MOS, grandes quantidades de C podem ser estocadas na biomassa das florestas plantadas, especialmente nas constituídas por plantas de rápido crescimento, que apresentam bom potencial de seqüestro de C, como o eucalipto. O Brasil dispõe de grandes áreas ainda inexploradas e com potencial para plantios de florestas comerciais de eucalipto. Esses novos plantios poderiam, além de contribuir para remover CO₂ da atmosfera, reduzir a derrubada de florestas nativas. Assim, torna-se importante determinar o balanço final de C no ecossistema para saber se as técnicas de manejo adotadas levam as plantações de eucalipto a se caracterizarem como dreno ou fonte de CO₂ (Barros & Comerford, 2002; Madeira et al., 2002; Lima et al., 2006; Silva et al., 2004).

O presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito do cultivo de diferentes clones de eucalipto em sistema de condução de rebrota, reforma com mudas clonais, ou reforma com mudas originárias de semente, na dinâmica dos estoques de C no solo e nos componentes da planta ao longo de um ciclo de rotação (sete anos).

1.4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no município de Aracruz, região litorânea do Estado do Espírito Santo, com coordenadas 19°48' S e 40°17' W. Esta área havia sido cultivada anteriormente com eucalipto por três rotações, ou seja, por aproximadamente 21 anos. Antes do eucalipto, essa área era cultivada com pastagem de *Panicum* spp. O local representa uma microbacia típica da região com relevo plano de tabuleiro costeiro. O solo foi caracterizado como Argissolo Amarelo coeso fase floresta tropical subperenifólia textura média sobre argilosa, derivado do grupo Barreiras. Ao final da terceira rotação, e antes do início da quarta rotação, foram coletadas amostras de solo em diferentes profundidades para caracterização química e física (Quadro 1).

Foram avaliados cinco tratamentos, constituídos por cinco materiais genéticos provenientes de híbridos *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (“urograndis”): quatro clones, doravante denominados: 1 (1RF e 1RB), 2 (2RF), 3 (3RF) e 4 (4RF), além do material genético 5 (5RFS), uma linhagem do mesmo híbrido proveniente de propagação por sementes. O clone 1 foi cultivado em sistema de rebrota (1RB) ou reforma (1RF) e os demais materiais somente em sistema de reforma. Nas parcelas destinadas a reforma, logo após a colheita o solo foi preparado mediante gradagem (‘bedding’), coveado, plantado e fertilizado manualmente com 100 g cova⁻¹ de NPK 6-30-6. A mesma fertilização foi aplicada na área sob condução de rebrota.

Quadro 1. Características químicas e físicas de amostras do Argissolo Amarelo cultivado com eucalipto na região litorânea do Estado do Espírito Santo.

Prof. ---cm---	§pH	#Ca ²⁺ -----mmol _c dm ⁻³ -----	#Mg ²⁺ -----mmol _c dm ⁻³ -----	#H+Al -----mmol _c dm ⁻³ -----	€P ---mg dm ⁻³ ---	€K ---mg dm ⁻³ ---	¢C.O. g kg ⁻¹	A.grossa -----%-----	A.fina -----%-----	Silte -----%-----	Argila -----%-----	Dens. kg dm ⁻³
0-20	4,0	8,30	1,90	31,00	8,7	35,1	11,63	57	19	9	15	1,45
20-40	3,8	3,00	0,77	31,00	5,7	31,2	4,26	31	24	13	31	1,53
40-80	3,8	3,33	0,77	35,67	5,7	31,2	2,52	29	21	11	39	1,61
80-120	3,8	2,13	0,53	32,00	5,7	28,6	1,55	30	21	8	41	1,60

§: pH em CaCl₂, #: Método SMP, €: Resina mista, ¢: Walkley & Black. Fonte: Neves (2000).

O experimento foi implantado no final de 1996 - início de 1997, no espaçamento de 3 x 3 m. Cada parcela cobria uma área de aproximadamente 1 ha e era composta por 1.111 plantas. Todas as parcelas foram alocadas em área cultivada anteriormente com o clone 1. Após 90 dias do plantio as mudas receberam aplicação de 350 kg ha⁻¹ de fosfato natural de Araxá e, ao final do primeiro ano, mais 160 kg ha⁻¹ de NPK 6-30-6.

Para obtenção do C alocado na biomassa das árvores de eucalipto, efetuou-se amostragem destrutiva de 10 plantas de cada parcela em vários períodos de tempo ao longo da rotação. Foram feitas coletas e, posteriormente, determinação da matéria seca das raízes (raiz grossa com diâmetro > 5 mm; raiz média com 2 a 5 mm e, raiz fina < 2 mm) e parte aérea,

anualmente, de 1999 a 2004. O clone 1, cultivado por meio de condução de rebrota, foi colhido em 2003 e os outros, submetidos à reforma, em 2004, todos com aproximadamente sete anos de idade. A parte aérea das árvores selecionadas para o abate foi dividida em folhas, galhos, casca e lenho. Os componentes do material vegetal foram separados a campo e, posteriormente, em laboratório, foram secados em estufa com ventilação forçada de ar, a 70 °C até peso constante. Com base na massa dos componentes de parte aérea e raiz foram estimados os estoques de C. Para a coleta das raízes, áreas de 9 m², no local de plantio da árvore, foram amostradas, sendo escavados até a profundidade onde, visualmente, percebia-se a existência de raízes. As raízes coletadas foram separadas por catação manual, peneiradas e estratificadas nos diâmetros citados anteriormente. As raízes foram lavadas e secadas em estufa para obtenção da matéria seca. Por ocasião da coleta de material de planta, também foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-20; 20-40; 40-60; 60-80; 80-100 e 100-120 cm de profundidade para determinação do teor de C em compostos orgânicos (C orgânico) do solo, determinadas pelo método de oxidação via úmida, com aquecimento externo (Yeomans & Bremner, 1988). Também foram coletadas amostras da serapilheira (manta orgânica), anualmente, durante a condução do experimento para avaliar os estoques de C orgânico neste compartimento. A primeira coleta de solo para caracterização física e química no início do experimento foi realizada logo após a colheita do cultivo anterior (tempo zero – T₀), ocasião em que foram amostrados o solo, a manta orgânica e as raízes e, estimados os estoques iniciais de C para cada compartimento.

Os resíduos da colheita anterior (casca, galhos e folhas) que permaneceram na área após a colheita foram considerados componentes da manta orgânica para fins de cálculo de seu estoque de C. Eles não foram computados como parte da serapilheira no cultivo atual por ainda constituírem parte da árvore.

Calculou-se o estoque de C da biomassa para cada componente da parte aérea e raízes das árvores, serapilheira e solo, este último até a profundidade de 120 cm, bem como o

balanço final do C durante a rotação, subtraindo-se o estoque de C exportado pelo lenho daqueles dos demais compartimentos. Para efeito de comparação entre os sistemas de condução de rebrota e reforma, foi avaliado, no momento da colheita das árvores, o conteúdo de C estocado nas cepas remanescentes no sistema de reforma, ou seja, remanescente do cultivo anterior, uma vez que as cepas no sistema de rebrota ainda eram constituintes da nova planta.

O estoque de C para cada compartimento da árvore (parte aérea e raízes) foi calculado multiplicando-se a matéria seca produzida (kg planta^{-1}) em cada compartimento pelo teor de C do mesmo e pelo número de árvores em um hectare (1.111). Posteriormente, realizou-se o somatório dos estoques de C de cada componente das árvores para obtenção do estoque total de C na árvore (biomassa). Da mesma forma, efetuou-se o cálculo para obtenção dos estoques de C na manta orgânica, no solo, e em cada profundidade estudada, foi obtido o estoque de C total do solo pela multiplicação do teor de C orgânico no solo pelo volume de solo em cada camada (ex.: 0-20 cm) por sua densidade (kg dm^{-3}). Ao final, realizou-se o somatório dos estoques de C de cada camada, obtendo-se o total entre 0 e 120 cm. Com o somatório de cada compartimento (árvore, serapilheira e solo) estimou-se o estoque total de C e o balanço de C ao final de uma rotação (diferença entre o estoque de C ao final da rotação – sete anos, do estoque de C no início do estudo – T_0).

O delineamento experimental foi em blocos completamente casualizados, com quatro repetições, e parcelas subdivididas no tempo. Os resultados foram analisados no programa estatístico SAEG 9.0 (FUNARBE, 2005). As médias dos tratamentos foram comparadas por meio do teste de LSD de Fisher ($p < 5\%$) protegido (Steel et al., 1997), ou seja, foram realizadas comparações múltiplas apenas quando o teste de F da análise de variância foi significativo ($p < 5\%$). Para os estoques de C no solo, os cultivos foram testados como parcelas e as camadas de solo amostradas (0-20; 20-40; 40-60; 60-80; 80-100 e 100-120 cm), como sub-parcelas.

1.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.5.1. Estoques de carbono no ecossistema florestal

Os estoques de C no ecossistema (biomassa + serapilheira + solo) nos povoamentos de eucalipto ao final de um ciclo de cultivo (sete anos) corresponderam a 191,7 t ha⁻¹ no sistema de condução de rebrota (RB), 172,4 t ha⁻¹ no de reforma com mudas clonais (RF) e 168,2 t ha⁻¹ no de reforma com mudas originárias de semente (RFS). As quantidades de C que foram exportadas da área pelo lenho variaram de 50,5 a 51,6 t ha⁻¹ e, as que permaneceram como folhas, galhos, casca e raízes (componentes da biomassa), juntamente com a serapilheira e solo (0-120 cm) variaram de 118 a 141 t ha⁻¹, ao final da rotação de sete anos (Quadro 2). Os estoques de C obtidos nesse estudo foram semelhante aos obtidos em florestas de eucalipto da savana tropical no norte da Austrália, com estoque total médio de 204 t ha⁻¹ de C e variação de 136 a 286 t ha⁻¹, considerando a árvore inteira, manta orgânica e solo na profundidade de 0 a 100 cm (Chen et al., 2003), naqueles solos de plantações de *Eucalyptus globulus* Labill de seis anos de idade e manejadas com adubação e irrigação, com 82,2 t ha⁻¹ de C, na camada de 0-60 cm de profundidade, e 137,6 t ha⁻¹ em todo o ecossistema (incluindo o lenho) (Madeira et al., 2002).

O estoque de C na biomassa vegetal da parte aérea viva (cascas, folhas e galhos), no momento da colheita das árvores foi, em média, 10,6 t ha⁻¹ (RB= 11,6 t ha⁻¹; RF= 10,1 t ha⁻¹ e RFS= 10,1 t ha⁻¹) (Quadro 2), sendo que, somente na casca das árvores obteve-se, em média, 6,2 t ha⁻¹ de C (RB= 7,0 t ha⁻¹; RF= 5,8 t ha⁻¹ e RFS= 5,8 t ha⁻¹), o que corresponde a 4 % do C total do ecossistema. Esses resultados ressaltam a importância da manutenção dos resíduos da colheita (cascas, galhos, folhas) na área de cultivo no momento do corte das árvores e, a não realização da prática da queima ou remoção dos resíduos após a colheita do lenho. Neste sentido, Johnson & Curtis (2001) constataram incremento de 18 % no estoque de C orgânico do solo quando se realizou apenas a colheita do tronco das árvores em detrimento de uma redução de 6 % quando foi efetuada a colheita da árvore inteira com os resíduos. Quando sob

prática da queimada, Mendham et al. (2003) observaram em áreas com *E. globulus* na Austrália perdas de C maior do que 30-50 t ha⁻¹ e de N acima de 219-347 kg ha⁻¹ do solo na forma de gases, além de aumentar suas perdas por lixiviação e erosão. Da mesma forma, Johnson & Curtis (2001) relataram redução no teor de C orgânico do solo quando se praticou a queima dos resíduos da colheita.

Comparando-se os resultados aqui obtidos aos de outros estudos, observou-se estoques inferiores de C na biomassa da parte aérea (excluindo o lenho) em povoamentos com espécies com menor potencial de crescimento, tais como cultivos de *E. camaldulensis*, com 6,7 t ha⁻¹, *E. pellita*, com 8,3 t ha⁻¹ (Ladeira, 1999) e, em *E. camaldulensis*, com 5,5 t ha⁻¹ (Dantas, 2000), ambos com seis a sete anos de idade, e estoques semelhantes em povoamentos mais produtivos de *E. urograndis*, com 11,4 t ha⁻¹ aos seis a sete anos de idade (Silva, 1999).

Quadro 2. Estoques de C em plantios de eucalipto em sistema de talhadia (RB) e reforma com mudas clonais (RF) (média de três clones) ou reforma com mudas originárias de semente (RFS) no período de colheita.

Componente	RB	RF	RFS	F	CV (%)
	-----t ha ⁻¹ -----				
1 [‡] Lenho	50,67a	51,65a	50,47a	0,12 ^{ns}	6,20
2 Casca	6,99a	5,85b	5,78b	74,98 ^{***}	2,19
3 Folhas	1,56a	1,24a	1,07a	1,65 ^{ns}	25,92
4 Galhos	3,01a	2,95a	3,28a	0,04 ^{ns}	47,80
I Parte aérea = 1 + 2 + 3 + 4	62,24a	61,69a	60,61a	0,11 ^{ns}	7,16
C Cepas	-	7,82	7,82	-	-
5 Raiz grossa	17,33a	9,52c	13,40b	15,87 [*]	12,66
6 Raiz média	0,10c	0,19b	0,29a	71,02 ^{***}	10,11
7 Raiz fina	0,04b	0,18a	0,19a	103,86 ^{***}	10,28
II Raízes = 5 + 6 + 7	17,47a	9,89b	13,88c	15,14 [*]	12,27
8 Serapilheira	6,45a	5,29b	3,89c	76,24 ^{***}	4,89
9 MOS (0-120 cm)	105,56a	87,75b	81,98b	5,97 ^o	9,50
Ecosistema					
10 Total da árvore = I + II	79,71a	71,58a	74,49a	1,69 ^{ns}	7,29
11 Total da vegetação = 10 + 8 + C	86,16a	84,69a	86,19a	0,06 ^{ns}	7,12
12 Total do ecossistema = 9 + 11	191,72a	172,44a	168,18a	2,44 ^{ns}	7,83
Relações					
MOS/ Total do ecossistema = 9/12	0,55	0,51	0,49		
Parte aérea/ Total do ecossistema = I/12	0,33	0,36	0,36		
Raízes/ Tot. do ecossistema = II/12	0,09	0,06	0,08		
Raízes/ Parte aérea (II/I)	0,28	0,16	0,23		

[‡]: Exportado da área de cultivo para indústria. Médias seguidas da mesma letra minúscula, nas linhas, não diferem entre si a 5 % pelo teste DMS. F: coeficiente de significância da ANOVA. ns, °, *, **, *** - não significativo (p > 5 %) e significativo a p < 10, 5, 1 e 0,1 %, respectivamente. CV (%): coeficiente de variação.

Após a colheita das árvores, o C alocado nos resíduos vegetais pode ser convertido em matéria orgânica (MOS) e estocado no solo, ou retornar à atmosfera como CO₂, em virtude dos processos de decomposição biológica. Sabe-se que por ser um compartimento que está diretamente em contato com o ar, ele pode apresentar maiores perdas de C para a atmosfera com a mineralização. Técnicas de manejo que aumentem a eficiência de conversão do C dos resíduos das árvores de eucalipto para formas mais estáveis no solo são necessárias diante da

grande importância de se manter a MOS e, por conseguinte, a sustentabilidade dos plantios (Silva et al., 2004), além de minimizar a emissão de CO₂ para a atmosfera (Lal, 2005; Epron et al., 2006).

Os estoques de C na manta orgânica foram de 6,4; 5,3 e 3,9 t ha⁻¹ e corresponderam a, aproximadamente, 3 % do estoque total de C do ecossistema, para o RB, RF e RFS, respectivamente. Já, resultados obtidos em cultivos de espécies de *E. grandis* aos 38 meses de idade indicaram maior estoque de C na serapilheira, da ordem de 13 t ha⁻¹ (Gatto, 2000). Estoques semelhantes a esse também foram encontrados em florestas de *E. camaldulensis* e *E. pellita* com seis a sete anos de idade no Estado de Minas Gerais (Contreras, 1997). Os menores estoques de C na serapilheira neste estudo, provavelmente, se devem às condições mais favoráveis a sua decomposição na região litorânea, devido a melhor distribuição de chuvas ao longo do ano, em comparação às regiões mais interioranas, onde foram feitos os estudos citados.

O estoque de C nas raízes em relação ao total da árvore (parte aérea + raízes) foi maior no sistema RB (22 %) e no RFS (19 %) em comparação ao RF (14 %) e, este compartimento foi semelhante em relação ao estoque total de C do ecossistema; 9, 8 e 6 % (17,5; 13,9 e 9,9 t ha⁻¹) para o RB, RFS e RF, respectivamente. O maior estoque de C para o sistema radicular no sistema RB em relação ao RF deveu-se a permanência de maior biomassa viva desta após a colheita, já que no sistema RB manteve-se a cepa viva do cultivo anterior. No sistema RB, a maioria das raízes pode ter permanecido viva, formando um novo sistema radicular sobre o antigo, o que pode ter contribuído para maior estoque de raízes grossas ao longo do tempo de cultivo (Quadro 2).

A MOS foi o compartimento com o maior estoque total de C no ecossistema, com 55 % (105,6 t ha⁻¹) para o RB, 51 % (87,7 t ha⁻¹) para o RF e 49 % (82,0 t ha⁻¹) para o RFS. Ao desconsiderar o que foi estocado pelo lenho do total do ecossistema, o que ocorre quando da colheita e exportação da parte comercial (Quadro 2), e acrescer o que foi alocado às raízes,

às cepas e à MOS observa-se que 87 % (123,0 t ha⁻¹ no RB e 103,8 t ha⁻¹ no RF) e 88 % (103,7 t ha⁻¹ no RFS) do C encontravam-se abaixo da superfície do solo, o que demonstra a grande importância deste compartimento na estocagem de C. Resultados semelhantes foram encontrados por Chen et al. (2003) que estudaram o balanço de C em uma savana tropical do norte da Austrália, onde se observou que 84 % do C no ecossistema solo-planta encontrava-se no primeiro metro abaixo da superfície do solo e 74 % de um total (solo + planta + manta orgânica) de 204 t ha⁻¹ encontrava-se na fase mineral do solo, na forma de C orgânico. Zinn (2002), estudando solos do Cerrado brasileiro sob povoamentos de eucalipto com sete anos de idade e sob savana nativa, obtiveram estoques de C orgânico entre 41,64 e 65,75 t ha⁻¹ na camada de 0 a 60 cm de profundidade. Para solos do Rio Grande do Sul, onde as condições de clima mais ameno são mais favoráveis a manutenção da MOS, os estoques de C são bem maiores que os do presente estudo. Sisti et al. (2004) encontraram para a profundidade de 0-100 cm estoques médios de 175,2 e 163,8 t ha⁻¹ de C para ecossistemas de culturas anuais (soja, trigo e milho) em semeadura direta e convencional, respectivamente. Similarmente, em plantações de eucalipto (*E. saligna*) ao final da primeira rotação, no Hawaii, Binkley et al. (2004) encontraram estoque médio de 135 t ha⁻¹ de C nos primeiros 45 cm de profundidade do solo, após oito anos de cultivo. Esses estoques são bem superiores aos observados por Degryze et al. (2004) que encontraram valores variando de 46,7; 45,7 e 62,4 t ha⁻¹ de C em solos argilosos (Typic Hapludalf), na camada de 0 a 50 cm de profundidade, cultivados por várias décadas com agricultura (rotação soja, trigo e milho), floresta plantada com álamo e floresta nativa de carvalho, respectivamente, no sudoeste de Michigan. Cromack et al. (1999) encontraram em solos argilo-arenosos (Andic Haplumbrepts) estoque de C de 176 t ha⁻¹, até a profundidade de 100 cm, em florestas de coníferas nove anos após o seu plantio em área anteriormente coberta por floresta nativa de “Douglas-Fir” e com ocorrência de espécie fixadora de N₂ (red Alder).

1.5.2. Estoques de carbono nas árvores de eucalipto

Os estoques de C na biomassa das árvores foram semelhantes para a maioria dos tratamentos, sendo o clone 1 em sistema de condução de rebrota (1 RB) aquele que apresentou maior estoque de C na árvore inteira (raízes + parte aérea) durante seu crescimento, reflexo do maior estoque de C no seu sistema radicular, especialmente de raízes grossas (> 5 mm). Todavia, o clone em sistema de reforma (4 RF) foi aquele que apresentou maior estoque de C na biomassa da parte aérea ao final do período de cultivo: $72,20 \pm 2,08 \text{ t ha}^{-1}$ (Figuras 1 e 2).

Ao separar-se o estoque de C nos compartimentos da árvore ao longo da rotação, verificaram-se acréscimos no estoque de C no lenho e casca até, aproximadamente, sete anos de idade, ocasião em que às árvores foram colhidas. Os clones e sistema de cultivo 4 RF com $80,59 \pm 2,21 \text{ t ha}^{-1}$, seguido do 1 RB ($79,70 \pm 0,24 \text{ t ha}^{-1}$), foram os que acumularam maior estoque de C nestes compartimentos até a época de colheita (Figura 1). Já para folhas e galhos, observaram-se períodos de acúmulo máximo de C nos estádios intermediários de crescimento das árvores (dois a três anos para a maioria dos clones), possivelmente pela maior demanda fotossintética inicial da planta ao estabelecer seu crescimento vegetativo, e posterior decréscimo em virtude da reorganização dos processos fisiológicos da planta quanto à competição entre plantas por luz, água e nutrientes, culminando com a ciclagem bioquímica (Gama-Rodrigues & Barros, 2002; Barros & Comerford, 2002).

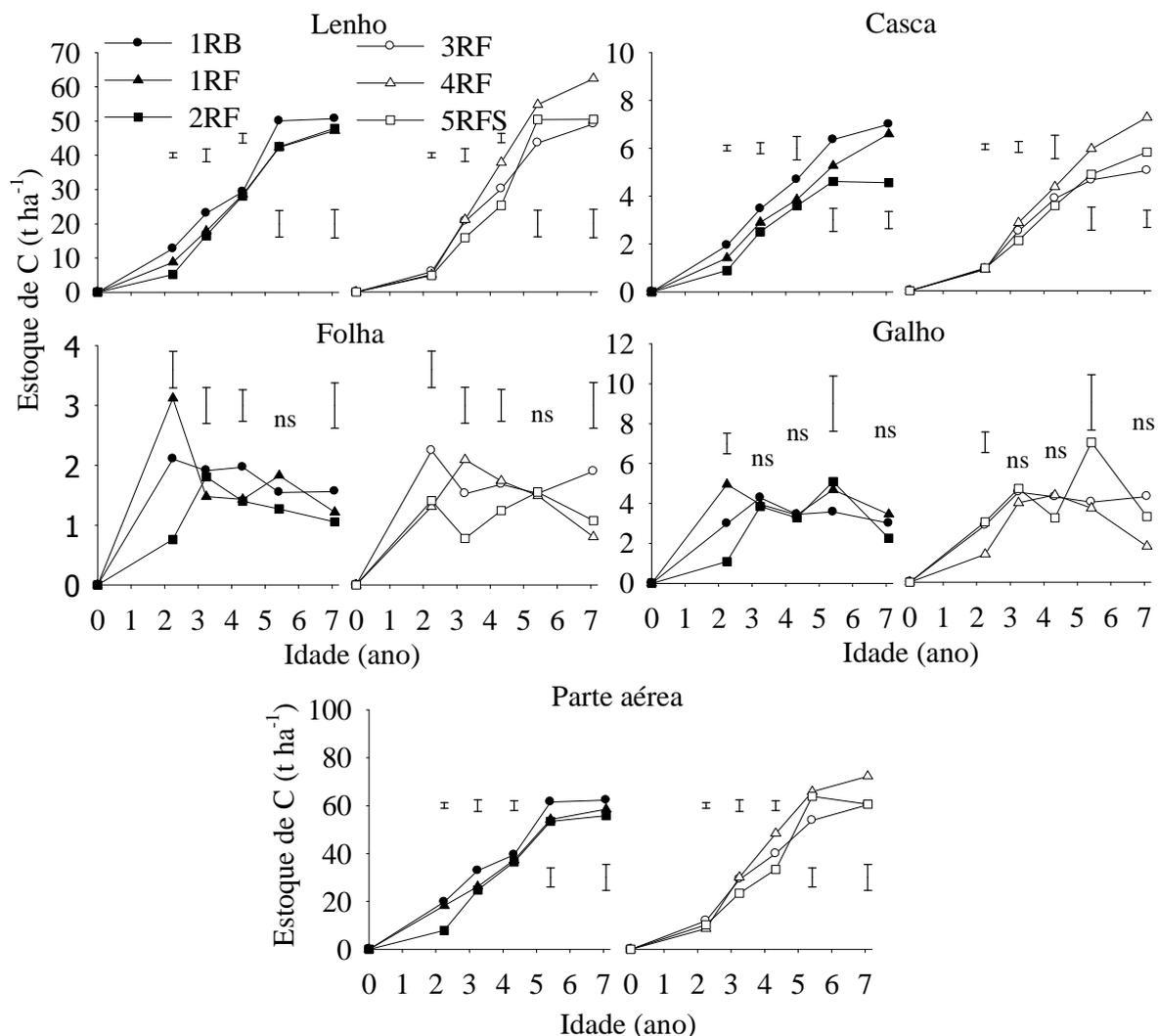


Figura 1. Estoques de C na parte aérea e seus componentes durante o crescimento das árvores de eucalipto clonal cultivado em sistema de talhadia (1 RB), reformado com mudas clonais (1 RF, 2 RF, 3 RF, 4 RF) e reformado com mudas originárias de semente (5 RFS), na região litorânea do Estado do Espírito Santo. ^{ns} nos gráficos indicam diferença não significativa ($p > 0,05$) entre os clones, e linhas verticais indicam diferença mínima significativa pelo teste de LSD ($p < 0,05$).

O estoque de C nas raízes decresceu após os dois anos e meio de idade dos clones (Figura 2), em virtude da maior contribuição de raízes velhas (do cultivo anterior). No momento da última coleta de raízes médias e finas (aos sete anos de idade) o estoque de C ainda foi inferior ao do cultivo anterior.

Na fase inicial de cultivo, o C das raízes velhas foi, possivelmente, transferido para outros compartimentos do ecossistema, tais como para a MOS (Figura 3), para a atmosfera na

forma de CO₂, e para a própria biota do solo. Com o aumento da idade das plantas há tendência de novo acúmulo de C nas raízes. Binkley et al. (2004) observaram que as raízes grossas de plantas de eucalipto foram capazes de incrementar 1,4 t⁻¹ ha⁻¹ ano⁻¹ em sua massa durante oito anos de cultivo. No presente estudo a maior diferença nesta característica ocorreu no clone cultivado em sistema de rebrota em que se obteve maior acúmulo de C após os dois primeiros anos de crescimento até o corte das árvores, em decorrência do maior estoque de C nas raízes grossas, quando comparadas entre clones cultivados em sistema de reforma. Observou-se que, após a colheita das árvores que foram conduzidas em talhadia, praticamente formou-se um novo sistema radicular, tendo como base aquele derivado na rotação anterior. Dessa forma, o estoque de C no sistema radicular do clone 1 do sistema de talhadia (1 RB) foi praticamente o dobro daquele observado no mesmo clone manejado com reforma, aos sete anos de idade (Figura 2 e Quadro 2). As plantas derivadas de mudas originárias de semente (5 RFS) apresentaram alocação de C para as raízes intermediária ao clones 1, cultivado em sistema de talhadia e reforma (Quadro 2). Embora apresentasse uma maior relação raiz:parte aérea, o material derivado de semente aportou menor quantidade absoluta de C ao sistema radicular em comparação ao clone mais produtivo, 4 RF (Figura 2).

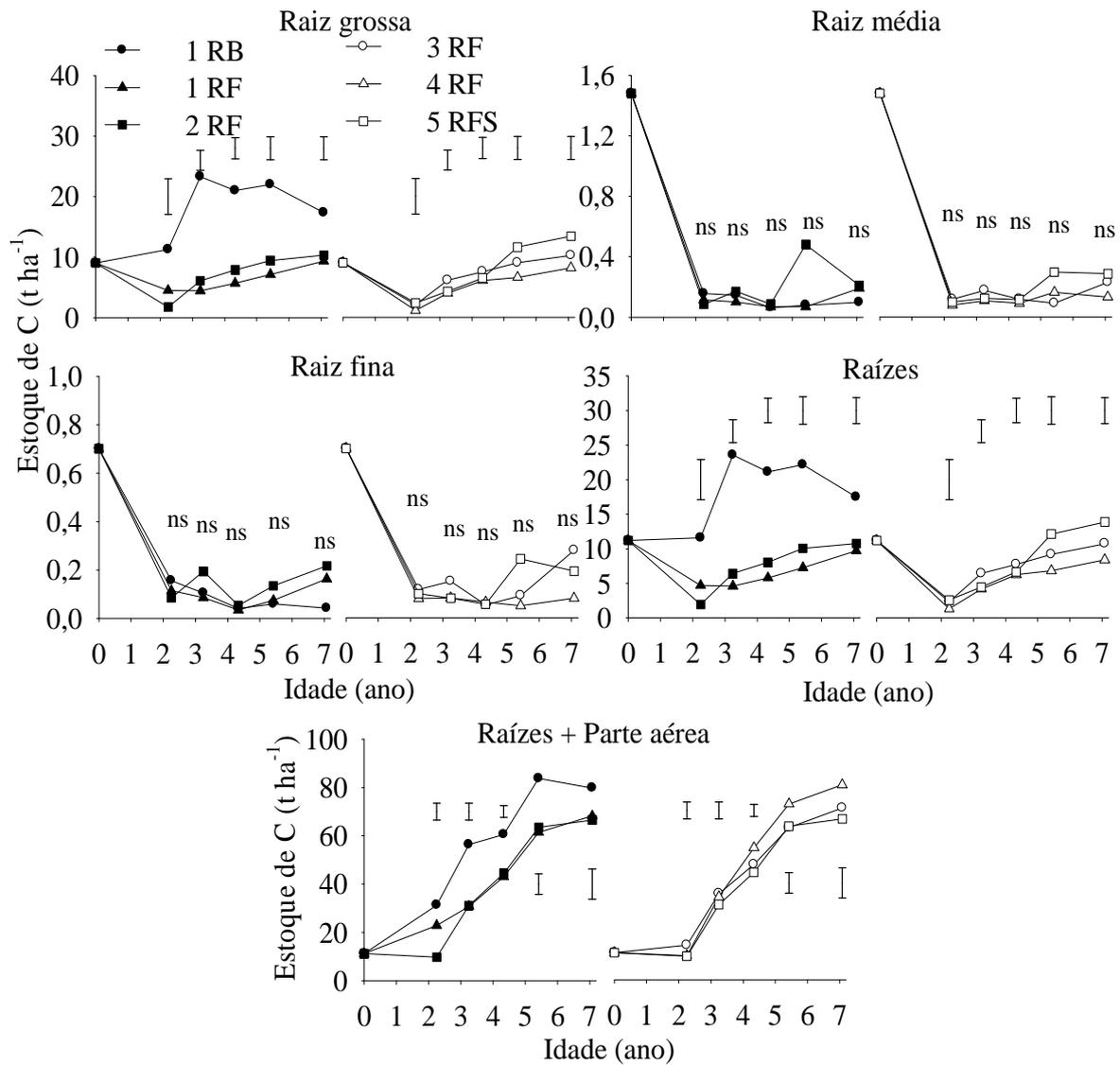


Figura 2. Estoques de C na biomassa alocada nas raízes com diferentes diâmetros, em todas as raízes e nas raízes + parte aérea durante o crescimento do eucalipto em sistema de talhadia (1 RB), eucalipto reformado com mudas clonais (1 RF, 2 RF, 3 RF, 4 RF) e eucalipto reformado com mudas originárias de semente (5 RFS), na região litorânea do Estado do Espírito Santo. ^{ns} nos gráficos indicam diferença não significativa ($p > 0,05$) entre os clones e linhas verticais indicam diferença mínima significativa pelo teste de LSD ($p < 0,05$).

1.5.3. Estoques de carbono na matéria orgânica do solo e manta orgânica

Os estoques de C no perfil do solo aumentaram até dois a três anos de idade para a maioria dos clones. O C estava estocado, principalmente, nas três primeiras camadas do solo (0-20, 20-40 e 40-60 cm) (Figura 3). Esta é a região onde a maior parte do sistema radicular da planta velha se concentra (Neves, 2000). Na primeira camada ainda há incorporação do C da manta orgânica nesse período. Binkley & Resh (1999) encontraram perdas no estoque de C na camada superficial (0-30 cm) de solo nos três primeiros anos de cultivo de eucalipto no Hawaii, como resultado da maior perda do C derivado do cultivo anterior de cana-de-açúcar (-511 g m⁻²) em relação ao aporte pelo eucalipto (+426 g m⁻²).

Como a árvore jovem, no início do cultivo, não consegue contribuir com grandes aportes de C via resíduos (Figura 4), os processos de decomposição do C do solo passam a predominar em relação aos de acúmulo em decorrência do maior aporte de resíduos da colheita do ciclo anterior até, aproximadamente, os cinco anos de idade.

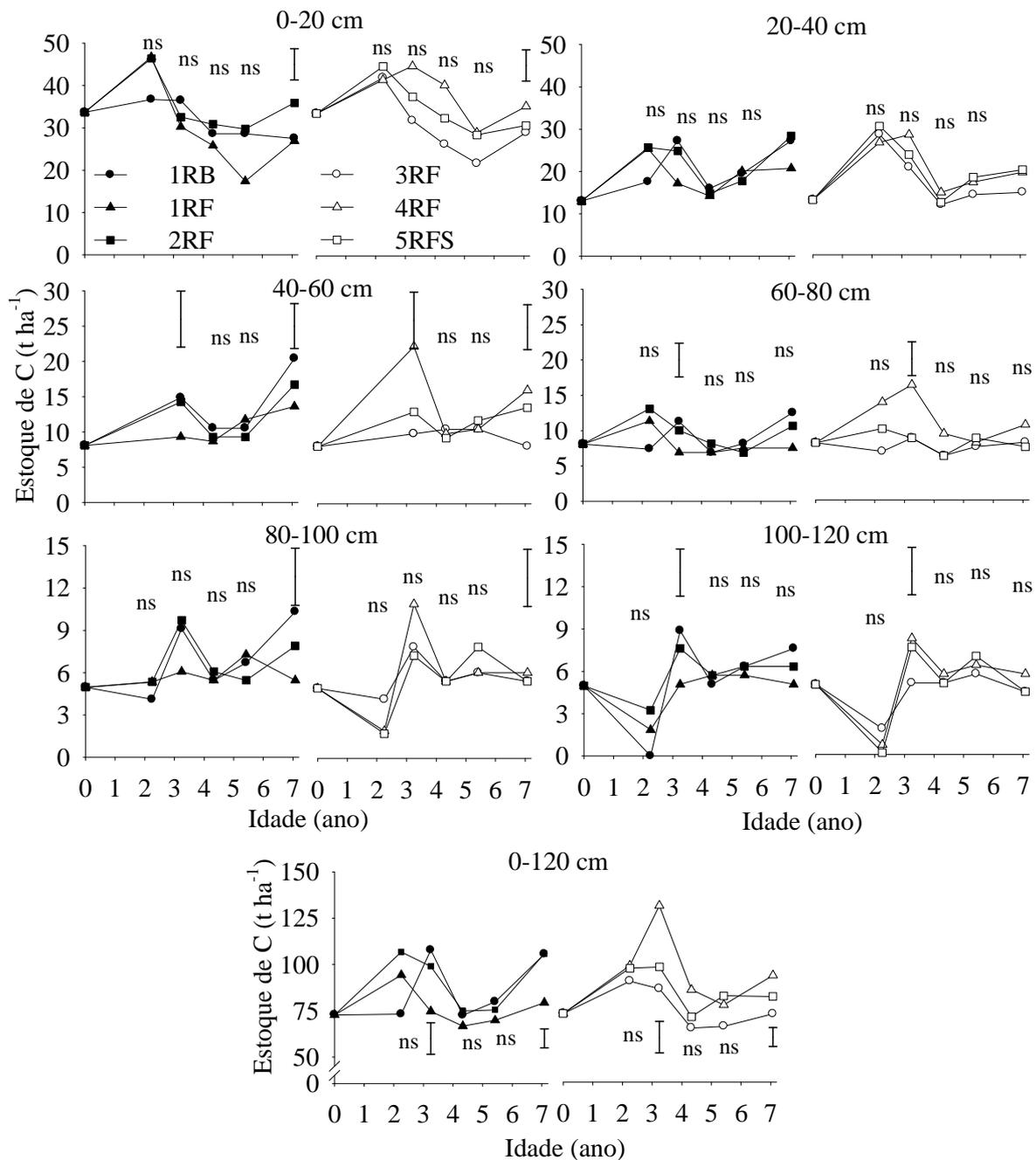


Figura 3. Estoques de C na matéria orgânica do solo para as seis profundidades estudadas (0-20; 20-40; 40-60; 60-80; 80-100; 100-120 cm) e total (0-120 cm) em solos cultivados com eucalipto em sistema de talhadia (1 RB), reforma com mudas clonais (1 RF, 2 RF, 3 RF, 4 RF) e reforma com mudas originárias de semente (5 RFS) na região litorânea do Estado do Espírito Santo. ^{ns} nos gráficos indicam diferença não significativa ($p > 0,05$) entre os clones e linhas verticais indicam diferença mínima significativa pelo teste de LSD ($p < 0,05$).

Na camada de 0-40 cm há aumento nos estoques de C até o 2^o - 3^o ano, dependendo do material genético e manejo, decrescendo até por volta do 5^o - 6^o ano, após o qual os processos de acúmulo de C voltam a predominar pela maior produção de biomassa da árvore, atingindo seu máximo no momento de corte, aos sete anos de idade (Figuras 3 e 4). Loumeto et al. (2001) também observaram tendência de recuperação nos teores de C orgânico em plantações de eucalipto “urograndis” na região das savanas do Congo a partir de seis a sete anos da implantação, sendo estes ganhos maiores para os clones mais produtivos.

No presente estudo houve redução nos estoques de C nas camadas mais profundas (80-100 e 100-120 cm) do solo nos tratamentos 3 RF, 4 RF e 5 RFS. Para o 1 RB, 1 RF e 2 RF essa redução ocorreu apenas na camada de 100-120 cm de profundidade (Figura 3). Turner & Lambert (2000) observaram que em profundidades maiores (0-50 cm) o decréscimo no estoque de C continuou por longo período de tempo e não aparentou incremento num período de 35 anos de cultivo, indicando que rotações curtas podem propiciar maior redução no estoque de C, principalmente nas camadas superficiais do solo. Com isso, a redução no estoque de C no solo no início do período de cultivo é maior nas camadas superficiais do solo (0-10 ou 0-15 cm), assim como seu acúmulo ao longo dos anos (Turner & Lambert, 2000; Binkley et al., 2004).

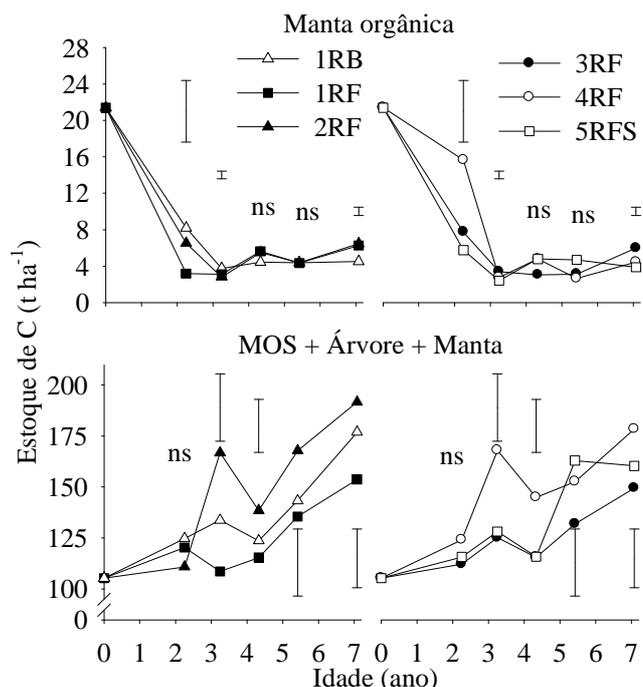


Figura 4. Estoques de C na manta orgânica e total do ecossistema (MOS + árvore + manta) para cinco materiais genéticos de eucalipto em sistema de condução de rebrota (1 RB) ou reforma com mudas originárias de estaquia (1 RF, 2 RF, 3 RF, 4 RF) e semente (5 RFS), na região litorânea do Estado do Espírito Santo. ^{ns} nos gráficos indicam diferença não significativa ($p > 0,05$) entre os clones, e linhas verticais indicam diferença mínima significativa pelo teste de LSD ($p < 0,05$).

Até os 2,5 anos, o estoque de C na MOS na área cultivada com o clone 1 em sistema de talhadia (1RB) teve menor estoque total de C na camada de 0 – 120 cm que o mesmo clone, e os demais, cultivados no sistema de reforma (1RF, 2 RF, 3 RF, 4 RF) (Figura 3). Possivelmente, a não incorporação dos resíduos da superfície do solo devido a ausência de preparo de sítio e a manutenção de parte do sistema radicular vivo retardaram a entrada de C orgânico para compartimento da MOS no início do cultivo do eucalipto no sistema de talhadia. Com o aumento do tempo de cultivo, o sistema de talhadia tende a produzir maior volume de serapilheira (13 t ha^{-1} a mais que no eucalipto da rotação anterior) (Cunha et al., 2005) e incrementar os estoques de C na MOS, que também são favorecidos pelo desbaste da brotação e pela redução na taxa de decomposição dos resíduos no solo (Figura 3). De fato, no momento da colheita das árvores, o clone 1RB apresentou o maior estoque de C na MOS,

juntamente com o clone mais produtivo, o 2RF. Cunha et al. (2005) obtiveram constantes de decomposição (k) da serapilheira foliar para o talhão em primeira rotação de *E. grandis* (oito anos) de 0,93, enquanto nos cultivos em talhadia de 1,5 e cinco anos, os valores de k foram de 0,67 e 0,35, respectivamente, indicando maior taxa de decomposição dos resíduos de eucalipto em sistema de reforma.

Os estoques de C na manta orgânica no momento da colheita das árvores foram de, aproximadamente, $5,0 \text{ t ha}^{-1}$. Estudo realizado em solos do Cerrado brasileiro indicou estoque de C na serapilheira de eucalipto (*E. citriodora*) similar, com $6,4 \pm 3,9 \text{ t ha}^{-1}$ (Neufeldt et al., 2002). Mesmo assim, os estoques de C na manta orgânica no final da rotação (próximo aos sete anos) foram menores aos obtidos no início do cultivo do eucalipto (Figura 4), provavelmente em decorrência da deposição dos resíduos da colheita que antecedeu ao novo cultivo. Da mesma forma que para as raízes no solo do sistema de reforma, inicialmente o resíduo da manta orgânica foi decomposto pela biota do solo e alocado em outros compartimentos do ecossistema (Figura 4), o que pode ter contribuído para o aumento do estoque de C na MOS nos primeiros anos de cultivo da floresta (Figura 3).

1.5.4. Incremento de C no ecossistema

Ao final dos sete anos de cultivo obtiveram-se acréscimos significativos no estoques de C no ecossistema em comparação ao início do crescimento (Figura 4). Os clones mais produtivos cultivados em sistema de talhadia e reforma, como exemplo o clone 1 RB que teve estoque inicial de, aproximadamente, 108 t ha^{-1} de C, no plantio da floresta, chegou a 192 t ha^{-1} aos sete anos de idade, resultando num seqüestro de $12 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C. Estes resultados revelam a capacidade que florestas plantadas de eucalipto de rápido crescimento têm em capturar CO_2 da atmosfera em curto período de tempo, quando comparadas a outros ecossistemas, como florestas nativas clímax e cultivos agrícolas. Florestas boreais, temperadas e tropicais estocam em média 53, 96 e 157 t ha^{-1} de C na planta e 296, 122 e 122 t

ha⁻¹ no solo (Lal, 2005). Bayer et al. (2006) obtiveram uma taxa média de seqüestro de C de 0,35 t ha⁻¹ ano⁻¹ em cultivos anuais sob semeadura direta. Em cultivos anuais, em semeadura direta ou convencional, obtêm-se taxas de seqüestro de C maior que 0,5 t ha⁻¹ ano⁻¹ a médio e longo prazo (Sisti et al., 2004).

O somatório do C alocado no perfil do solo (0-120 cm de profundidade), manta orgânica e planta demonstrou que o clone 1 em sistema de talhadia (1 RB) teve balanço mais favorável de C alocado no ecossistema (36 ±1,72 t ha⁻¹), não diferindo do clone 2 RF, com 32 ±4,29 t ha⁻¹, seguido do 4 RF (19 ±6,72 t ha⁻¹), do 5 RFS (12 ±10,23 t ha⁻¹), do clone 1 RF (9 ±5,14 t ha⁻¹) e do 3 RF (3 ±7,03 t ha⁻¹) durante um ciclo de cultivo (Figura 5). Com clone 1 RB, o C estocado no ecossistema foi 34 % maior no final do cultivo; todavia, para o mesmo clone cultivado em reforma (1 RF), o ganho foi de apenas 8 %. Esses resultados reforçam a grande dificuldade em obter ganhos tão significativos de C imobilizado no solo, e que resultados favoráveis como os encontrados no sistema de rebrota e para os clones mais produtivos cultivados em sistema de reforma apontam na direção para a qual os futuros cultivos devem se nortear.

Em cultivo de eucalipto durante oito anos, verificou-se que apenas 7 % do C do ecossistema foi alocado no solo (“litter”, MOS e raízes) e 93 % foi perdido na forma de CO₂ (Binkley et al., 2004). Mesmo assim, esses ganhos foram contrabalançados pelas perdas de C originário de plantas C₄ de cultivos anteriores.

Neste estudo, o incremento no estoque de C verificado nos cultivos ocorreram, principalmente, pelo maior estoque de C nas raízes grossas (1 RB e 5 RFS), na MOS (4 RF, 1 RF, 2 RF e 5 RFS) e nas cepas originárias do cultivo anterior (3 RF, 4 RF, 1 RF e 5 RFS) (Figura 6).

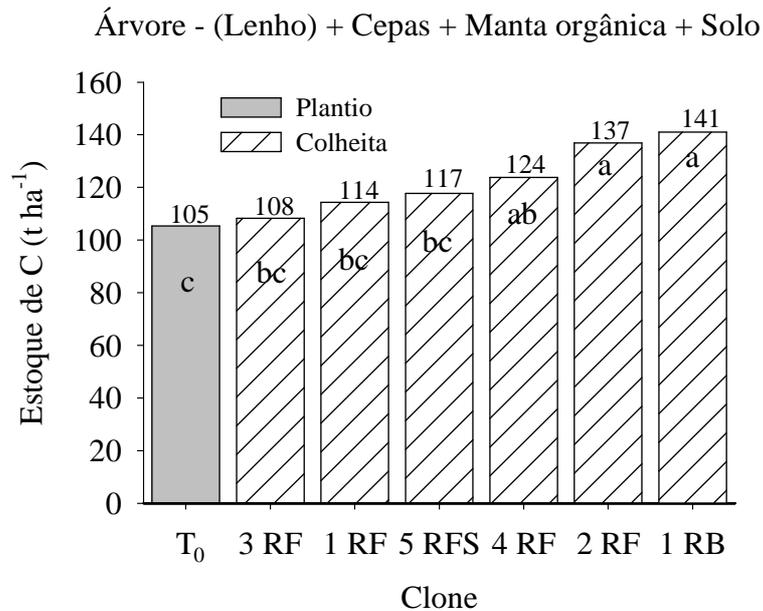


Figura 5. Balanço de C no ecossistema para os cinco materiais genéticos de eucalipto em sistema de talhadia (1 RB), eucalipto reformado com mudas clonais (1 RF, 2 RF, 3 RF, 4 RF) e eucalipto reformado com mudas originárias de semente (5 RFS), na região litorânea do Estado do Espírito Santo. Letras minúsculas distintas indicam diferença mínima significativa pelo teste de LSD ($p < 0,05$). Plantio: representa o tempo inicial (T_0), após o corte do clone 1 (sete anos), e o local onde foram conduzidos os clones deste estudo.

O compartimento do ecossistema de eucalipto que apresentou maior incremento de C foi o da MOS, exceto para o clone 3 RF, em que o maior estoque de C estava alocado nas cepas do cultivo antecedente ($7,82 \pm 1,86 \text{ t ha}^{-1}$) e nos galhos ($1,60 \pm 0,99 \text{ t ha}^{-1}$) (Figura 6). O segundo compartimento que mais contribuiu para o incremento de C para o 1 RB e 5 RFS foi a raiz grossa. O incremento de C verificado na MOS tem origem na deposição de resíduos, tanto na superfície do solo, quanto em sub-superfície, pela exsudação radicular, aporte e decomposição das raízes. Resultados encontrados por Madeira et al. (2002) também indicaram que o solo e as raízes foram o segundo e terceiro compartimentos, após o lenho, de maior magnitude para o incremento de C no ecossistema.

Possivelmente, a maior contribuição do C do sistema radicular das plantas para o C no solo no sistema de condução de rebrota (1 RB), e a maior deposição de matéria seca (resíduos

vegetais) no sistema de reforma para o clone mais produtivo, 2 RF, foram os principais fatores que incrementaram os estoques de C no ecossistema. Em estudo de simulação de sistema de semeadura direta, verificou-se que, após 360 dias de incubação, 66 % do ^{14}C contido no resíduo vegetal de plantas de aveia depositado na superfície foram respirados na forma de $^{14}\text{CO}_2$, 11 % permaneceram no resíduo na superfície do solo e 16 % foram incorporados ao solo. Em comparação, 56 % do ^{14}C contido nas raízes foram respirados na forma de $^{14}\text{CO}_2$ e 42 % permaneceu no solo. Isso ocorre porque os compostos orgânicos derivados do sistema radicular apresentaram maior interação com partículas do solo, aumentando sua estabilidade (Gale & Cambardella, 2000).

Diferentes mecanismos podem estar contribuindo para a retenção de C derivado das raízes no solo, entre eles, Puget & Drinkwater (2001) destacaram três principais: a) a maior recalcitrância bioquímica dos resíduos de raízes; b) o incremento da proteção física, devido a incorporação de C derivado de raízes no interior dos agregados, e, c) a deposição contínua de exsudatos radiculares e o turnover de raízes finas.

Estudos têm indicado que o C de raízes tem longo tempo de residência no solo, bem superior ao do C da parte aérea, ressaltando sua importância no sequestro e manutenção do C no solo. Estima-se que, em média, o tempo de residência do C derivado de raízes no solo é 2,4 vezes maior que o derivado da parte aérea, sugerindo que outros mecanismos, diferentes da recalcitrância química, contribuem para a proteção da MOS derivada das raízes: 1) proteção físico-química em macroagregados, especialmente em horizontes mais profundos; 2) proteção em microagregados conferida pelas micorrizas e a atividade de raízes finas, e, 3) a interação química com íons metálicos (Rasse et al., 2005).

Os compartimentos parte aérea da árvore e manta orgânica, de modo geral, apresentaram incrementos negativos de C para o ecossistema, principalmente a casca e a manta orgânica (Figura 6).

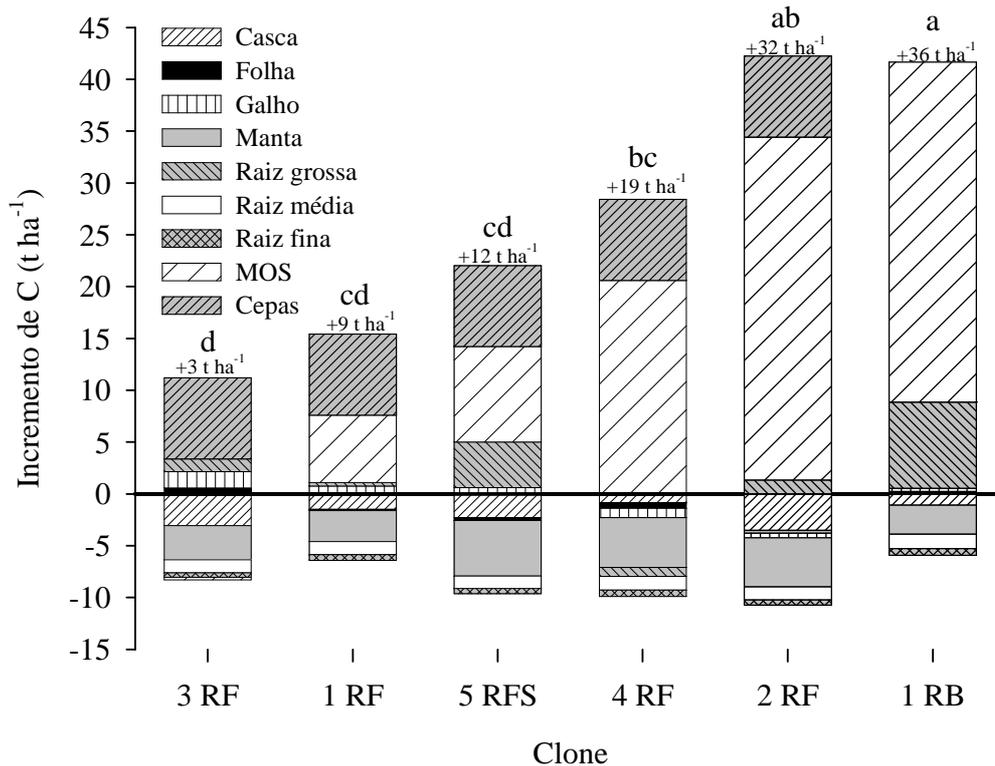


Figura 6. Incremento de C no ecossistema florestal (árvore – lenho + cepa + manta + solo) após sete anos de cultivo de cinco materiais genéticos de eucalipto em sistema de talhadia (1 RB), eucalipto reformado com mudas clonais (1 RF, 2 RF, 3 RF, 4 RF) e eucalipto reformado com mudas originárias de semente (5 RFS), na região litorânea do Estado do Espírito Santo. Médias seguidas pela mesma letra para o saldo (incremento positivo menos incremento negativo) de C no ecossistema não diferem significativamente pelo teste de LSD ($p < 0,05$).

1.6. CONCLUSÕES

Maiores incrementos de C no ecossistema são obtidos quando do cultivo do eucalipto no sistema de talhadia, enquanto os sistemas de reforma com mudas originadas de semente e reforma com mudas de microestaquia têm incrementos semelhantes nos estoques de C no ecossistema.

Há diferenças significativas entre clones quanto aos incrementos de C no ecossistema, que seguem a seguinte ordem: clone 1 RB, cultivado em sistema de talhadia, \geq 2 RF, cultivado em sistema de reforma com mudas clonais, \geq 4 RF, cultivado em sistema de reforma com mudas clonais, \geq 5 RFS, cultivado em sistema de reforma com mudas

originárias de semente, ≥ 1 RF, cultivado em sistema de reforma com mudas clonais e, > 3 RF cultivado em sistema de reforma com mudas clonais, que tem potencial de seqüestro de C de 5,1; 4,6; 2,7; 1,7; 1,3 e 0,4 t ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente.

O clone de eucalipto mais produtivo cultivado em sistema de talhadia (1 RB) tem estoque total de C no ecossistema, incluindo o lenho, de 192 t ha⁻¹ e com seqüestro anual de 12 t⁻¹ ha⁻¹ ano⁻¹.

Os maiores ganhos de C orgânico no sistema de talhadia ocorreram nos componentes raízes e matéria orgânica do solo.

1.7. LITERATURA CITADA

- BARROS, N.F. & COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Folha de Viçosa, 2002. v.2. p.487-592.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil Till. Res.* 86:237-245, 2006.
- BINKLEY, D. & RESH, S.C. Rapid changes in soils following eucalyptus afforestation in Hawaii. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:222-225, 1999.
- 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.
- BRUCE, J.P.; FROME, M.; HAITES, E.; JANZEN, H.; LAL, R. & PAUSTIAN, K. Carbon sequestration in soils. *J. Soil Water Cons.*, 54: 382-389, 1999.
- CERRI, C.E.P.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; COLEMAN, K.; BERNOUX, M.; FALLOON, P.; POWLSON, BATJES, D.S.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. Ecos. Environ.*, 122:46–57, 2007.
- CHEN, X.; HUTLEY, L.B.; & EAMUS, D. Carbon balance of a tropical savanna of Northern Australia. *Oecologia*, 137:405-416, 2003.
- CONTRERAS, C.E.C.M. Estudo silvicultural e econômico de povoamentos de eucalipto na região de Cerrado de Minas Gerais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 131p. (Tese de Mestrado em Ciência Florestal)
- CUNHA, G.M.; GAMA-RODRIGUES, A.C. & COSTA, G.S. Ciclagem de nutrientes em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no Norte Fluminense. *R. Árvore*, 29:353-363, 2005.
- CROMACK, K.; MILLER, R.E.; HELGERSON, O.T.; SMITH, R.B. & ANDERSON, H.W. Soil carbon and nutrients in a coastal Oregon Douglas-fir plantation with red alder. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:232-239, 1999.
- DANTAS, S.S.A. Crescimento, acúmulo de nutrientes e relações hídricas em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 83p. (Tese de Mestrado em Ciências Florestal)
- DEGRYZE, S.; SIX, J.; PAUSTIAN, K.; MORRIS, S.J.; PAUL, E.A. & MERCKX, R. Soil organic carbon pool changes following land-use conversions. *Global Change Biol.*, 10:1120-1132, 2004.
- DECKMYN, G.; MUYS, B.; QUIJANO, J.G. & CEULEMANS, R. Carbon sequestration following afforestation of agricultural soils: comparing oak/beech forest to short-rotation poplar coppice combining a process and a carbon accounting model. *Global Change Biol.*, 10:1482-1491, 2004.
- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. & KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen

- fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil Till. Res.*, 81:87–95, 2005.
- EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; DELEPORTE, P.; IFO, S.; KAZOTTI, G.; M'BOU, A.T.; MOUVONDY, W.; ANDRE, L.S.; ROUPSARD, O.; JOURDAN, C. & HAMEL, O. Soil carbon balance in a clonal Eucalyptus plantation in Congo: effects of logging on carbon inputs and soil CO₂ efflux. *Global Change Biol.*, 12, 1021-1031, 2006.
- FUNARBE. SAEG-Sistema para análises estatísticas. v. 9.0. Viçosa-MG, 2005.
- GALE, W.J. & CAMBARDELLA, C.A. Carbon dynamics of surface residue - and root - derived organic matter under simulated no-till. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:190-195, 2000.
- GAMA-RODRIGUES, A.C. & BARROS, N.F. Ciclagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. *R. Árvore*, 26:193-207, 2002.
- GATTO, A. Manejo do solo em áreas de reforma de florestas de eucalipto e seus reflexos na produtividade. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 59p. (Tese de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)
- GRESPLAN, S.L. Produção e eficiência nutricional de clones de eucalipto no Norte do Espírito Santo e suas relações com características do solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 81p. (Tese de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)
- JOHNSON, D.W. & CURTIS, P.S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *For. Ecol. Manag.*, 140:227-238, 2001.
- LADEIRA, B.C. Crescimento, produção de biomassa e eficiência nutricional de *Eucalyptus* spp, sob três espaçamentos, em uma seqüência de idades. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 148p. (Tese de Mestrado em Ciências Florestal)
- LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. *For. Ecol. Manag.*, 220:242-258, 2005.
- LIMA, A.M.N.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. BARROS, N.F.; MENDONÇA, E.S.; SMYTH, T.J.; MOREIRA, M.S. & LEITE, F.P. Soil organic

- carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. *For. Ecol. Manag.*, 235:219-231, 2006.
- LOUMETO, J.J.; BERNHARD, R.F. & BERNHARD, R.F. Soil fertility changes with eucalypt hybrids and plantation age: soil organic matter. In: F. BERNHARD R., ed. Effect of exotic tree plantations on plant diversity and biological soil fertility in the Congo-Savanna: with special reference to eucalyptus. Indonésia, Center for Internat. For. Res., 2001. 71p.
- MADEIRA, M.V.; FABIÃO, A.; PEREIRA, J.S.; ARAÚJO, M.C. & RIBEIRO, C. Changes in carbon stocks in *Eucalyptus globulus* Labill. plantations induced by different water and nutrient availability. *For. Ecol. Manag.*, 171:75-85, 2002.
- MALHI, Y.; BALDOCCHI, D.D. & JARVIS, P.G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forest. *Plant Cell Environ.*, 22:715-740, 1999.
- MARTINS, L.G.C. Contribuição nutricional do sistema radicular e do solo para o desenvolvimento e o crescimento de brotações de eucalipto. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 88 p. (Tese de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)
- MELLO, S.L.M.; GONÇALVES, J.L.M. & OLIVEIRA, L.E.G. Características do sistema radicular em povoamentos de eucaliptos propagados por sementes e estacas. *Scientia Florestalis*, 54:16-26, 1998.
- MENDHAM, D.S.; O'CONNELL, A.M. & GROVE, T.S. Organic matter characteristics under native forest, long-term pasture, and recent conversion to eucalyptus plantations in Western Australia: microbial biomass, soil respiration, and permanganate oxidation. *Aust. J. Soil Sci.*, 40:859-872, 2002.
- MENDHAM, D.S.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S. & RANCE, S.J. Residue management effects on soil carbon and nutrient contents and growth of second rotation eucalypts. *For. Ecol. Manag.*, 181:357-372, 2003.

- NEUFELDT, H.; RESCK, D.V.S. & AYARZA, M.A. Texture and land-use effects on soil organic matter in cerrado Oxisols, central Brazil. *Geoderma*, 107:151-164, 2002.
- NEVES, J.C.L. Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo. Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2000. 191p. (Tese de Doutorado)
- PUGET, P. & DRINKWATER L.E. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:771-779, 2001.
- RASSE, D.P.; RUMPEL, C. & DIGNAC, M.F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant Soil*, 269: 341-356, 2005.
- SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & SILVA, E.F. Manejo de resíduos e matéria orgânica do solo em plantações de eucalipto: uma questão estratégica para a manutenção da sustentabilidade. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.29, 2004, p.10 - 20.
- SILVA, L.F. Necessidade de adubação pós-desbaste baseada no balanço nutricional de povoamentos de eucalipto. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 62p. (Tese de Mestrado em Ciências Florestal)
- SOARES, C.P.B. & OLIVEIRA, M.L.R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. *R. Árvore*, 26:533-539, 2002.
- SIMS, R.E.H.; MAIAVA, T.G. & BULLOCK, B.T. Short rotation coppice tree species selection for woody biomass production in New Zealand. *Biomass Bioen.*, 20:329-335, 2001.
- SIMS, R.E.H.; SENELWA, K.; MAIAVA, T.G. & BULLOCK, B.T. *Eucalyptus* species for biomass energy in New Zealand-Part II: Coppice performance. *Biomass Bioen.*, 17:333-343, 1999.

- SISTI, C.P.J.; DOS SANTOS, H.P.; KOHHANN, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. & BODDEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 76:39-58, 2004.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. & DICKEY, D.A. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. New York : McGraw-Hill, 1997. 666p.
- SWIFT, R.S. Sequestration of carbon by soil. *Soil Sci.*, 166:858-871, 2001.
- TURNER, J. & LAMBERT. M. Change in organic carbon in forest plantation soils in eastern Australia. *For. Ecol. Manag.*, 133:231-247, 2000.
- TEIXEIRA, P.C. Dinâmica de crescimento radicular e suprimento de nutrientes pelas raízes e pelo solo em brotações de *Eucalyptus urophylla*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 37p. (Tese de Mestrado em Fitotecnia)
- WHITTOCK, S.P.; GREAVES, B.L. & APIOLAZA, L.A. A cash flow model to compare coppice and genetically improved seedling options for *Eucalyptus globulus* pulpwood plantations. *For. Ecol. Manag.*, 191:267-274, 2004.
- WILTS, A.R.; REICOSKY, D.C.; ALLMARAS, R.R. & CLAPP, C.E. Long-term corn residue effects: harvest alternatives, soil carbon turnover, and root-derived carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1342-1351, 2004.
- WU, T.; SCHOENAU, J.J.; LI, F.; QIAN, P.; MALHI, S.S. & SHI, Y. Influence of tillage and rotation systems on distribution of organic carbon associated with particle-size fractions in Chernozemic soils of Saskatchewan, Canada. *Biol. Fertil. Soils*, 42:338-344, 2006.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Comm. Soil. Sci. Plant Anal.*, 13:1467-1476, 1988.
- ZINN, Y.L.; RESCK, D.V.S. & SILVA, J.E. Soil organic carbon as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the Cerrado region of Brazil. *For. Ecol. Manag.*, 166:285-294, 2002.

CAPÍTULO II

ABUNDÂNCIA DE FENÓIS DERIVADOS DA LIGNINA, CARBOIDRATOS E AMINOAÇÚCARES EM LITTER E SOLOS CULTIVADOS COM EUCALIPTO E PASTAGEM

2.1. RESUMO

O cultivo de espécies florestais como o eucalipto em solos ocupados por pastagens pode levar a alterações no processo de decomposição de resíduos vegetais e na formação da matéria orgânica do solo (MOS), principalmente por alterar a contribuição de diferentes compostos orgânicos e modificar a atividade e a diversidade microbiana. Neste sentido, o presente estudo teve o objetivo de avaliar alterações causadas pelo cultivo do eucalipto em compostos orgânicos, tais como: fenóis derivados de lignina, carboidratos e aminoaçúcares visando acessar o estágio de decomposição e a contribuição de compostos de origem microbiana para a MOS em solos do litoral Norte do Espírito do Santo em comparação àqueles de pastagem. Os resultados indicaram menor aporte de carboidratos e teor de lignina similar na serapilheira de eucalipto em comparação àqueles da pastagem. Os fenóis derivados de lignina que se caracterizaram pela presença de compostos do grupo cinamil (ácidos ferúlico e *p*-coumárico) em maior abundância, refletindo em maior acúmulo destes compostos e carboidratos totais no solo de pastagem, embora os teores totais de lignina, C, N e aminoaçúcares tenham sido semelhantes àqueles do solo cultivado com eucalipto. Nos solos cultivados com eucalipto obteve-se maior contribuição de componentes de origem vegetal (menor relação Hexoses/Pentoses) para a MOS que aqueles de origem microbiana em comparação aos solos sob pastagem. A abundância de determinados aminoaçúcares nos solos indicou que os fungos são mais abundantes que bactérias e actinomicetos, especialmente no solo de pastagem.

ABUNDANCE OF LIGNIN-DERIVED PHENOLS, CARBOHYDRATES AND AMINO SUGARS IN LITTER AND SOILS UNDER EUCALYPTUS AND PASTURE

2.2. ABSTRACT

The cultivation of forest species such as eucalyptus in pasture soils can lead to changes in the decomposition of plant residues and in the formation of soil organic matter (SOM), mainly by changing the contribution of distinct organic compounds and modify the microbial activity and diversity. Therefore, the aim of the present study was to evaluate changes caused by the cultivation of eucalyptus in organic compounds such as phenols derived from lignin, carbohydrates and amino sugars. It was also seeking accessed the stage of decomposition and the contribution of compounds of microbial origin for the SOM in coastal plain soils in northern Espírito Santo State in soil under eucalyptus compared with that under pasture. The results indicated lower content of carbohydrates, and a similar content of lignin-derived phenols in the eucalyptus litter as compared to that of pasture. Lignin derivatives characterized by the presence of the cinnamyl phenols (ferulic acid and *p*-coumaric acid) were more abundant in the litter, reflecting in greater accumulation of these compounds and total carbohydrates in the soil under pasture. However, the total content of lignin, C, N, and amino sugars did not differ between the pasture and eucalyptus soils. In the soil under eucalyptus there was a larger contribution of compounds of plant origin (lower relationship Hexose/Pentose ratio) to the SOM than those of microbial origin in comparison to the soils under pasture. The abundance of some amino sugars in the soils indicated that fungi are more abundant than bacteria and actinomicetes, especially in the soil under pasture.

2.3. INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo (MOS) é composta de resíduos de plantas, animais e microrganismos em vários estádios de decomposição, e a maior parte encontra-se intimamente associada à fase mineral do solo (Möller et al., 2002; Silva & Mendonça, 2007). Mudanças no uso e em práticas de manejo de ambientes naturais, como os de pastagem ou florestas naturais, devido ao plantio de culturas agrícolas ou florestais influenciam a composição química e biológica da MOS (Guggenberger et al., 1995; Glaser et al., 2000), por alterar a qualidade e disponibilidade de substrato e nutrientes à comunidade microbiana do solo, principal responsável pela ciclagem do C e do N no solo.

A maior entrada de C em solos de florestas advém da celulose e da hemicelulose, compostos orgânicos predominantes nas plantas (Kaiser & Benner, 2000; Möller et al., 2002; Martens & Loeffelmann, 2002). Açúcares derivados de plantas, especialmente polímeros de pentoses (ex: arabinose (ara); xilose (xil)), servem como fonte de energia para os microrganismos do solo que, por sua vez, sintetizam e aumentam a abundância de polímeros de hexoses (ex: galactose (gal); manose (man)) no solo (Oades, 1984; Amelung et al., 1999). Assim, com base na abundância desses açúcares torna-se possível identificar a contribuição relativa de plantas e microrganismos para a formação da MOS. Porém, não é possível identificar a origem microbiana do substrato, uma vez que distintas comunidades microbianas produzem diferentes açúcares. No entanto, fungos decompositores produzem tipicamente o aminoaçúcar glucosamina, enquanto o ácido murâmico é produzido apenas por bactérias (Zhang et al., 1998; Solomon et al., 2002; Möller et al., 2002; Simpson et al., 2004). A galactosamina é outro aminoaçúcar abundante nos solos, mas atualmente, não há consenso sobre a sua origem, sendo que alguns autores a consideram de origem fúngica e bacteriana (Sowden & Ivarson, 1974; Coelho et al., 1997), enquanto outros a sugerem como sendo exclusivamente de origem bacteriana (Solomon et al., 2002). Apesar de tal limitação, baseado nos teores dos aminoaçúcares é possível estabelecer relações (ex. glucosamina : ácido

murâmico) que podem servir como indicadores da contribuição fúngica e bacteriana para a MOS (Zhang et al., 1998; Amelung et al., 1999; Liang et al., 2007).

A lignina é o principal componente da parede celular de plantas lenhosas, e o segundo biopolímero mais abundante em plantas, contribuindo, significativamente, para o conteúdo de C terrestre (Kögel-Knabner, 2002; Suhas & Carrott, 2007). Sua decomposição no solo é limitada a poucos microrganismos, destacando-se os fungos e actinomicetos como os principais agentes degradadores. Dentre os componentes do litter, a lignina é o que decompõe mais lentamente devido a maior complexidade estrutural (Heim & Schmidt, 2007), contribuindo substancialmente para o compartimento de C estável no solo (Stevenson, 1994; Rasse et al., 2006). Durante o processo de decomposição da lignina, ligações intramoleculares entre componentes de fenilpropanóides são clivados e oxidados, contribuindo com derivados de compostos fenólicos no solo (Möller et al., 2002). Diferentes estádios de decomposição ou humificação destes fenólicos derivados da lignina podem ser identificados pela abundância de grupamentos ácidos e aldeídos no solo (relação Ac/Al), sendo o grau de humificação proporcional ao valor obtido para a relação Ac/Al (Otto & Simpson, 2006).

Como os fungos são principais organismos responsáveis pela decomposição da lignina no solo, pode-se hipotetizar que o cultivo contínuo do eucalipto em determinado solo favorece a população fúngica e contribui para aumentar a MOS, pois em florestas temperadas o maior teor de MOS é favorecido pelo aporte de resíduos mais lignificados (Berg, 2000; Dijkstra et al., 2004).

O presente estudo teve o objetivo de avaliar as alterações causadas pelo cultivo do eucalipto nos teores de fenóis derivados de lignina, carboidratos e aminoaçúcares, estágio de decomposição da MOS, e na contribuição de compostos de origem microbiana em solos do litoral Norte do Espírito do Santo, cultivados em comparação àquele de pastagem.

2.4. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido com amostras de solo do município de Aracruz-ES, localizadas a 19° 48' S e 40° 17' W, onde foram selecionadas cultivos de eucalipto e pastagem adjacentes. Os tratamentos consistiram de:

- P: Pastagem de *Brachiaria brizantha*;
- E_L: Eucalipto, com amostras de solo coletadas na linha de plantio atual (entre-linhas da rotação anterior);
- E_{EL}: Eucalipto, com amostras de solo coletadas nas entre-linhas de plantio atual (linha da rotação anterior);

Até a época da coleta das amostras de solo as áreas (talhões) de eucalipto selecionadas já tinham sido cultivadas por 28 anos (quatro rotações) com esta cultura (Quadros 1 e 2). O clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen (Ometto, 1981), com temperatura e precipitação pluvial média anual de 23 °C e 1.400 mm ano⁻¹, respectivamente. O local representa uma microbacia típica da região dos Tabuleiros Costeiros. O solo foi caracterizado como Argissolo Amarelo fase floresta tropical subprenifólia textura média sobre argilosa, derivado do grupo Barreiras.

Previamente ao último plantio de eucalipto, o solo foi preparado mediante gradagem (“bedding”), em que os resíduos da colheita são enterrados no solo na direção da linha de cepas (tocos) do cultivo anterior (Figura 1) e, em seguida, coveado, plantado e fertilizado manualmente com 100 g cova⁻¹ de adubo formulado NPK 6-30-6. Devido a esse preparo localizado, foram coletadas amostras de solo, tanto na direção das linhas (L), quanto das entre-linhas (EL) de eucalipto.

Quadro 1. Histórico de uso da área experimental cultivada com pastagem (P) e eucalipto (E).

Uso	Anos						
	até 1950	1951-1965	1966-1973	1974-1981	1982-1989	1990-1997	1998-2004
P	Mata nativa			Pastagem			
E	Mata nativa	Pastagem		Eucalipto	Eucalipto	Eucalipto	Eucalipto

Quadro 2. Características da área experimental cultivada com pastagem (P) e eucalipto (E_L e E_{EL}).

Tratamentos	Idade ¹	Coleta	Área	Topografia	Produtividade
	ano		ha		m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹
P	-	-	-	Plana	-
E _L	6,0	Linha	25,1	Plana	33,5
E _{EL}	6,0	Entre-linhas	25,1	Plana	33,5

¹, idade das plantas no momento da coleta das amostras de solo.

O último plantio de eucalipto foi realizado em 1998 (Quadro 1), com plantas provenientes de híbridos clonais de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, cultivados em sistema de reforma, e espaçamento entre plantas de 3 x 3 m. Após 90 dias do plantio, as plantas receberam 350 kg ha⁻¹ de fosfato natural e, no final do primeiro ano, mais 160 kg ha⁻¹ de NPK 6-30-6.

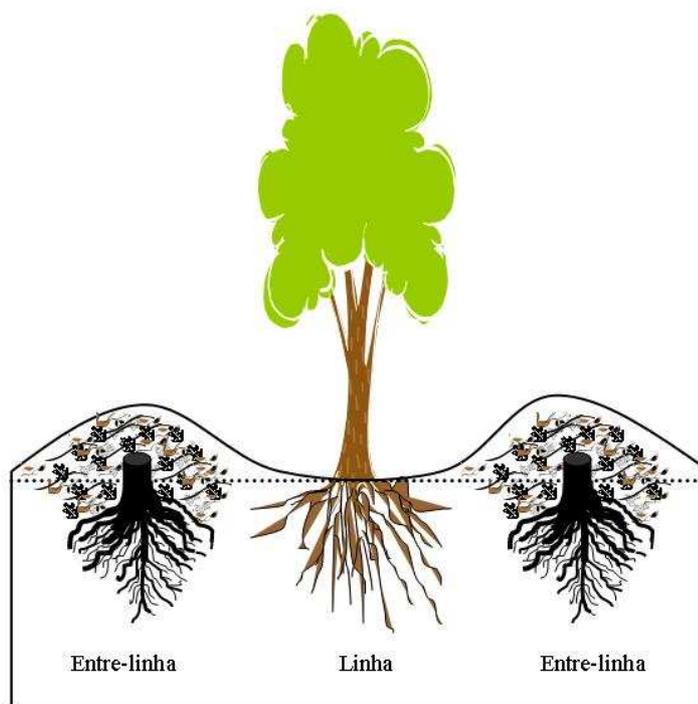


Figura 1. Ilustração do efeito da gradagem tipo “bedding” e das regiões do solo onde foram realizadas as amostragens na linha e entre-linhas do cultivo de eucalipto.

Nessas áreas com diferentes tipos de uso (Quadro 1), foram selecionados talhões, e coletadas amostras de solo, na linha e entre-linhas do eucalipto e área total para pastagem. Foram coletadas três amostras compostas de solo (quatro sub-amostras) nas seguintes profundidades: 0-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-100 cm. Em cada talhão foram abertas trincheiras com 1,3 m de profundidade e, então, foram coletadas amostras indeformadas com anéis volumétricos em cada uma dessas cinco profundidades para se estimar a densidade aparente do solo.

As amostras de solo foram coletadas na época chuvosa (janeiro/fevereiro) e os povoamentos de eucalipto estavam no final da rotação (seis anos). A pastagem (*Braquiária* spp) foi introduzida há, aproximadamente, 20 anos em local que havia sido desmatado (Mata Atlântica) na década de 50 para exploração extensiva da pecuária de corte (nunca se aplicou corretivos ou fertilizantes), sendo o pasto nessa época constituído principalmente por *Panicum* spp. Depois de coletadas, as amostras de solo foram imediatamente secadas ao ar,

destorroadas, passadas em peneira com malha de 2 mm, homogeneizadas e sub-amostras foram retiradas para caracterização física e química (Quadro 3).

Quadro 3. Características químicas e físicas dos solos cultivados com pastagem (P) e eucalipto na linha e entre-linhas (E_L e E_{EL}).

Cultura	¹ pH	² Ca ²⁺	² Mg ²⁺	³ H+Al	⁴ P	⁴ K	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Dens.
	-----cmol _c dm ⁻³ -----				---mg dm ⁻³ ---		-----%-----			kg dm ⁻³	
P	5,7	1,4	0,4	2,2	1,1	13	62	14	4	21	1,5
E _L	5,7	0,9	0,4	4,5	1,4	32	37	15	5	44	1,5
E _{EL}	5,0	2,2	0,5	4,0	8,8	35	43	17	5	36	1,4

¹, pH em H₂O, ², Extrator: KCl – 1 mol L⁻¹, ³, Extrator: Acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ – pH 7,0; ⁴, Extrator: Mehlich 1.

A serapilheira na superfície do solo foi amostrada por ocasião da coleta das amostras de solo da seguinte forma: dentro de cada aérea dos tratamentos selecionados foram identificados quatro pontos, alocados aleatoriamente, onde lançou-se um gabarito com 0,25 m² de área (0,5 x 0,5 m). A serapilheira do eucalipto era composta por galhos, cascas e folhas, enquanto que aquela de pastagem era constituída, principalmente por folhas e coletor senescente. Após a coleta, as amostras de serapilheira foram secadas em estufa (65 °C por 72 h) para posterior determinação da matéria seca.

Nas amostras de solo e serapilheira efetuaram-se análises de C orgânico total (COT), N total (NT), teores de fenóis derivados de lignina (VSC) e carboidratos, além de aminoácidos derivados da atividade microbiana no solo.

2.4.1. Determinação do carbono orgânico total e nitrogênio total do solo

Sub-amostras de solo (TFSA) foram trituradas e passadas em peneira de 100 mesh (0,149 mm) para determinação do COT pelo método de oxidação via úmida, com aquecimento externo (Yeomans & Bremner, 1988). O NT foi determinado por destilação após digestão sulfúrica (Bataglia et al., 1983).

2.4.2. Oxidação da lignina com CuO e análise dos derivados por cromatografia líquida

A degradação termo-química da lignina contida nas frações da MOS foi realizada pelo método de oxidação com CuO em microondas (Goñi & Montgomery, 2000).

O O₂ das soluções de trabalho contendo NaOH 2 mol L⁻¹ foi eliminado por meio de injeção de N₂ por borbulhamento durante 12 h. Amostras de solo e planta (passados na peneira de 60 mesh) foram acondicionadas em tubos de teflon contendo de 2-5 mg de C orgânico, juntamente com 500 mg de CuO, 50 mg de sulfato ferroso amoniacal e 15 mL de NaOH 2 mol L⁻¹. A mistura foi aquecida em microondas, em ambiente de N₂, com pressão de trabalho entre 60-70 psi durante 90 min. A esta pressão atingiu-se temperatura de 150 °C. Após a mistura ter esfriado, esta foi transferida para tubos de centrífuga de 50 mL e centrifugada a 1844 xg por 10 min. Esta etapa foi repetida por mais duas vezes, adicionando-se 5 mL de NaOH 1 mol L⁻¹ por repetição. O sobrenadante alcalino foi acidificado para pH 1 com adição de, aproximadamente, 4 mL de HCl concentrado. Para capturar os monômeros de lignina, misturaram-se 6 mL de acetado de etila com o sobrenadante em erlenmeyer de vidro. A fase orgânica foi transferida para tubos de vidro, repetindo-se a etapa por mais duas vezes. Possíveis resquícios de água foram removidos com adição de Na₂SO₄. Então, solidificou-se a amostra em concentrador a vácuo (45 °C). As amostras foram redissolvidas em 5 mL de água ultra-pura com o auxílio de sonda de ultra-som para facilitar a solubilização dos compostos em água. Depois de ser passada em filtro de nylon de 0,45 µm, pipetou-se 0,5 mL desta solução aquosa para frascos do amostrador automático e, então, se fazer a identificação e quantificação dos derivados de lignina por cromatografia iônica.

O volume de amostra injetada no cromatógrafo iônico (DX 600 - Dionex, Sunnyvale, CA, EUA) correspondeu a 120 µL, utilizando-se amostrador automático. Como fase estacionária utilizou-se a coluna analítica OmniPac PAX-100 (250 x 4 mm, Dionex) com coluna guarda OmniPac PAX-100 (50 x 4 mm, Dionex). Os monômeros de lignina foram eluídos com fase móvel composta de: (a) água ultra-pura, (b) NaCl 1 mol L⁻¹ + NaOH 4 mmol

L⁻¹ e, (c) acetonitrila (80 % v/v). Os eluentes foram mantidos fechados sob pressão constante de N₂ para evitar flutuações na linha de base. O fluxo de eluição foi de 1,0 mL min⁻¹. Os compostos foram detectados em detector de arranjo de diodos com monitoramento contínuo de quatro comprimentos de onda (220, 254, 290 e 465 nm). A identificação dos compostos foi feita comparando-se o tempo de retenção de cada composto com o de amostras-padrão já conhecidas. Em alguns casos a identidade dos compostos foi confirmada com base no espectro 3D no UV-Vis. Todo o sistema cromatográfico era controlado por meio do software Chromeleon (Dionex).

Os fenóis derivados desta oxidação quantificados foram os monômeros do grupo vanilil (V), siringil (S) e cinamil (C). Os monômeros dos grupos V e S foram calculados de correspondentes aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos: V= vanilin + acetovanilona + ácido vanílico; S= siringaldeído + acetosiringona + ácido siríngico. Os monômeros do grupo C foram derivados do somatório de ácido *p*-coumárico e ácido ferúlico. Considerou-se o VSC (mg kg⁻¹ de solo) como o somatório destes três grupos, os quais corresponderam ao teor de lignina oxidada com CuO em microondas. Usando as relações de massa entre ácidos carboxílicos (Ac) e aldeídos (Al) nos grupos vanilil (V) e siringil (S), expressos como (Ac/Al)_V e (Ac/Al)_S, respectivamente, estimou-se o grau de decomposição (oxidação) da lignina (Hedges & Ertel, 1982; Kögel, 1986; Kögel-Knabner, 2000; Otto & Simpson, 2006).

2.4.3. Separação e quantificação de carboidratos

Sub-amostras de solo (100 mg) ou serapilheira (20 mg) foram moídas em moinho de bola, peneiradas (60 mesh), pesadas e acondicionadas em tubos de ensaio; adicionaram-se 800 µL de H₂SO₄ 6 mol L⁻¹ e, então, as amostras foram homogeneizadas por meio de agitação manual. Esperaram-se 30 min e procedeu-se diluição das amostras por meio de adição de 4,2 mL de água ultra-pura com o intuito de atingir uma concentração final de 1 mol L⁻¹ de H₂SO₄. As amostras foram tampadas com papel laminado e vedadas com cordão de borracha e

aquecidas em autoclave por 30 min a temperatura de 121 °C (104 kPa). Esperou-se que as amostras esfriassem à temperatura ambiente para prosseguir com a centrifugação (1844 xg) por 10 min, separando-se o sobrenadante do resíduo. Este procedimento foi repetido por mais duas vezes com a adição de 1 mL de água ultra pura, objetivando a máxima recuperação do conteúdo de compostos orgânicos solúveis do resíduo. Segundo Martens & Loeffelmann (2002), este procedimento não consegue extrair totalmente os monômeros de celulose e hemicelulose dos resíduos vegetais. Portanto, conforme sugerido por esses autores, para melhorar essa taxa de recuperação levaram-se os resíduos da primeira extração a estufa (60 °C) até a secagem da amostra. Após, adicionaram-se 300 µL de H₂SO₄ 18 mol L⁻¹ e esperaram-se 30 min para, novamente, realizar a diluição da solução com 3,6 mL de água ultra-pura, atingindo a concentração final de 1 mol L⁻¹ de H₂SO₄. O frasco foi vedado e autoclavado por 30 min à temperatura de 121 °C (104 kPa). Quando a solução retornou a temperatura ambiente ela foi centrifugada (1.844 xg) por 10 min e, então, retirou-se o sobrenadante. Este passo foi repetido por mais duas vezes, adicionando-se 1 mL de água ultra-pura antes de cada centrifugação. O sobrenadante da primeira fase foi misturado com o da segunda em tubos de 20 mL e diluído 100 vezes. As amostras foram passadas em filtro de nylon de 0,45 µm e, então, pipetou-se 0,5 mL para identificação e quantificação dos monômeros de carboidratos por cromatografia iônica.

O volume de amostra injetado no cromatógrafo iônico foi de 120 µL, utilizando-se amostrador automático. Como fase estacionária utilizou-se a coluna de troca aniônica CarboPac PA-10 (250 x 4 mm, Dionex). Os carboidratos foram eluidos com uma fase móvel composta de: (a) água ultrapura, (b) NaOH 10 mmol L⁻¹ e (c) NaOH 100 mmol L⁻¹. Os eluentes foram mantidos fechados sob pressão constante de N₂ para evitar flutuações na linha de base. O fluxo de eluição foi de 0,8 mL min⁻¹. Os carboidratos foram detectados por amperometria pulsada utilizando-se eletrodo de Au e eletrodo de referência de AgCl. A identificação dos compostos foi feita comparando-se o tempo de retenção de cada composto

com o de amostras-padrão. Todo o sistema cromatográfico foi controlado por meio do software Chromeleon (Dionex).

2.4.4. Separação e quantificação de aminoaçúcares

Os aminoaçúcares glucosamina (Glc) e galactosamina (Gal), e o ácido murâmico (Mur) foram extraídos do solo conforme Zhang & Amelung (1996). Sub-amostras contendo, aproximadamente, 0,3 mg de N, juntamente com um padrão interno (myo-inositol), foram acondicionadas em tubos de vidro com tampa de teflon e hidrolisadas com HCl 6 mol L⁻¹ a 105 °C por 8 h em ambiente de N₂. O hidrolisado foi centrifugado (1.844 xg) por 10 min (4 °C). O sobrenadante foi transferido para tubos de vidro e concentrado sob vácuo a 40 °C. A amostra foi redissolvida em 20 mL de água ultra-pura e ajustou-se o pH da solução para 6,6-6,8 com KOH 0,4 mol L⁻¹. Após neutralizar a solução com KOH para precipitar o Fe, a mistura foi centrifugada, novamente, durante 15 min a 1.884 x g (4 °C) em tubos de centrífuga de 50 mL. O sobrenadante foi concentrado e rediluído em 1 mL de água. As frações de aminoaçúcares do sobrenadante foram rapidamente congeladas. Após filtragem por membranas de nylon de 0,45 µm, utilizou-se 0,5 mL da solução para identificação e quantificação dos aminoaçúcares por cromatografia iônica. O volume de amostra injetada no cromatógrafo iônico foi de 120 µL, utilizando-se amostrador automático. Como fase estacionária, utilizou-se a coluna CarboPac PA-10 (250 x 4 mm, Dionex). Os aminoaçúcares foram eluídos com uma fase móvel composta de: (a) água ultra-pura, (b) NaOH 100 mmol L⁻¹ e (c) NaOH 200 mmol L⁻¹. Os eluentes foram mantidos fechados sob pressão constante de N₂ para evitar flutuações na linha de base. O fluxo de eluição foi de 0,8 mL min⁻¹. Os aminoaçúcares foram detectados por meio de amperometria pulsada com eletrodo de Au. A identificação dos compostos foi feita comparando-se o tempo de retenção de cada composto com o de amostras-padrão. Todo o sistema cromatográfico era controlado por meio do software Chromeleon (Dionex).

Os resultados foram analisados no programa estatístico SAEG 9.0 (FUNARBE, 2005). As médias dos tratamentos foram comparadas por meio do teste de LSD de Fisher ($p < 5\%$) protegido (Steel et al., 1997), ou seja, foram realizadas comparações múltiplas apenas quando o teste de F da análise de variância foi significativo ($p < 5\%$).

2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1. Teores de fenóis derivados de lignina (VSC) e carboidratos na serapilheira

Os resíduos depositados na forma de serapilheira apresentaram teor semelhante de lignina (VSC) nas áreas de eucalipto e de pastagem (pastagem: $109,4 \text{ g kg}^{-1}$ de C e eucalipto: $93,9 \text{ g kg}^{-1}$ de C). Estes resultados foram superiores aos obtidos por Sjöberg et al. (2004a) que obtiveram teores médios de 54 a 58 g kg^{-1} de C no litter de *Picea abies* (L.) Karst. e aos obtidos por Otto & Simpson (2006) com teores médios de VSC entre 45 e 56 g kg^{-1} de C no litter de solos litorâneos, cultivados com gramíneas (pastagem) no Canadá, e aos resultados encontrados por Zinn et al. (2002), que verificaram teores de VSC iguais a 30, 44 e 19 g kg^{-1} de C no litter em cultivos de *Eucalyptus camaldulensis*, cerrado nativo e cultivo de *Pinus caribaea*, respectivamente, no Estado de Minas Gerais.

Embora, neste estudo, os teores de VSC na serapilheira tenham sido similares entre os cultivos, foi evidente a maior presença de galhos grossos ricos em lignina na serapilheira do povoamento de eucalipto (Quadro 4), o que poderia retardar o processo de decomposição microbiana (Mendham et al., 2004). O teor de N total foi menor na serapilheira de eucalipto, o que lhe conferiu maior relação VSC:N (87,4) e C:N (93,04) em comparação àquela da pastagem (VSC:N-61,7 e C:N-56,4), indicando menor labilidade da serapilheira de eucalipto. Esta informação pode ser complementada pela menor relação ácidos/aldeídos nos grupamentos siringil (Ac/Al)s da lignina da serapilheira de eucalipto (0,20) em comparação àquela de pastagem (0,43), sugerindo maior grau de decomposição deste grupamento da lignina na serapilheira de pastagem (Quadro 4).

Quadro 4. Matéria seca total (MS), percentagem de resíduos grossos-RG (galhos grossos) e resíduos finos-RF (folhas+galhos finos+casca), teores médios de fenóis derivados de lignina (VSC), carboidratos totais, relação de grupamentos vanilil ácidos por aldeídos (Ac/Al)v, siringil (Ac/Al)s, relação hexoses para pentoses (H/P), C/N, VSC/N e VSC/Carboidratos na serapilheira de pastagem e de eucalipto nos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo

Características	Pastagem	Eucalipto
MS (t ha ⁻¹)	-	10,53
RG (%)	-	45,00
RF (%)	-	55,00
C (g kg ⁻¹)	405,90b	502,40a
N (g kg ⁻¹)	7,20a	5,40b
C/N	56,37b	93,04a
Carboidratos (g kg ⁻¹)	573,94a	518,26b
VSC (g kg ⁻¹)	44,40a	47,20a
VSC/Carboidratos	0,08a	0,09a
VSC/N	6,16b	8,74a
Carboidratos (g kg ⁻¹ de C)	1414,00a	1031,60b
VSC (g kg ⁻¹ de C)	109,40a	93,90a
(Ac/Al)v	0,25a	0,30a
(Ac/Al)s	0,44a	0,20b
H/P	0,20a	0,23a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si a 5 % pelo teste LSD de Fisher protegido.

A taxa de decomposição de resíduos vegetais está relacionada diretamente com o decréscimo na sua relação VSC/N (Möller et al., 2002), assim como na relação C/N. Em geral, se o teor de lignina estiver abaixo de 20 %, a maior parte do litter compreende polissacarídeos estruturais, prontamente degradados por microrganismos decompositores, e a taxa de decomposição pode ser predita pela relação inicial C/N ou, simplesmente, pelo teor de

N. Maiores teores de lignina (>20 %) crescentemente dominam o processo de decomposição do litter e, a perda de massa pode ser predita pelo teor inicial de lignina, pela relação lignina:N, pelo teor de lignocelulose e pela taxa de polissacarídeos estruturais:lignina (Sariyildiz & Anderson, 2003). Observações dessa ordem foram verificadas por Mendham et al. (2004) quando compararam cultivos de florestas de *E. globulus* e pastagens. Em ambas, a relação C/N foi semelhante, mas o teor de N no solo foi reduzido na plantação de eucalipto, assim como sua taxa de mineralização. Dessa forma, não houve alteração no teor total de C em ambos os sistemas, mas o teor de C da fração particulada foi maior no solo sob eucalipto. Os autores atribuíram esses resultados à natureza física e química do litter depositado pelo eucalipto, em que materiais mais grosseiros e mais lignificados são depositados em maior quantidade do que no solo de pastagens, ou seja, são resíduos que apresentam maior conteúdo de lignina e tanino, estando menos suscetíveis à decomposição microbiana que o litter das pastagens.

O teor médio de carboidratos totais foi menor na serapilheira de eucalipto (518 g kg^{-1}) em comparação àquela de pastagem (574 g kg^{-1}), indicando, novamente, a possível redução na labilidade da serapilheira de eucalipto. Estudo realizado no Estado do Arizona-USA, indicou maior teor médio de carboidratos em resíduos de plantas de pastagem com gramíneas perenes, com $528 \pm 28,2 \text{ g kg}^{-1}$, em comparação a serapilheira de culturas florestais (acácia), com $266 \pm 49,8 \text{ g kg}^{-1}$ (Martens & McLain, 2005), sugerindo a menor labilidade desse último resíduo. Nesse contexto, em solos tropicais cultivados com eucalipto têm-se apontado dificuldades em converter a grande quantidade de resíduos em MOS, principalmente em cultivos de eucalipto onde a relação C/N é bastante larga, e a labilidade dos resíduos é baixa (Silva et al., 2004).

Nos resíduos da serapilheira de eucalipto, observou-se a predominância de grupamentos de aldeídos, como siringaldeído (45 %), acetosiringona (14 %) e vanilina (12 %) em detrimento de grupamentos ácidos, como o siríngico (10 %), vanílico (3 %) e ferúlico (5 %), indicando menor grau de decomposição destes (Quadro 5). De modo concordante, as

relações Ac/Al dos grupamentos vanilil e siringil, e a relação hexoses:pentoses (H:P) de carboidratos da serapilheira foram inferiores àquelas obtidas no solo. E, entre as serapilheiras, o resíduo grosso de eucalipto teve menor relação $(Ac/Al)_V$ ($\approx 0,20$) que nos resíduos de pastagem ($\approx 0,45$). Estes resultados corroboram com aqueles de Otto & Simpson (2006), que descreveram que nos resíduos vegetais não decompostos ou pouco decompostos estas relações variam entre 0,1 e 0,2 em angiospermas florestais e valores maiores (0,2 a 1,6) para gramíneas, como pastagens.

Quadro 5. Teores médios de fenóis derivados de lignina nos compartimentos da serapilheira cultivados com eucalipto e outros usos alternativos na região dos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo.

Serap.	AG	AL	SG	VL	AS	AV	AF	AC	VSC
	-----g kg ⁻¹ -----								
P	7,2a	1,3a	7,7b	7,8a	3,4b	1,9a	5,6a	9,4a	44,4b
RG	9,6a	1,8a	50,6a	5,5b	9,1a	1,7a	0,6b	0,8b	79,8a
RF	2,8a	1,1a	6,9b	3,5b	2,2c	1,0b	1,5b	1,1b	20,1c
Média	6,5(14)	1,4(3)	21,7(45)	5,6(12)	4,9(10)	1,5(3)	2,6(5)	3,8(8)	48,1

AG: acetosiringona; AL: acetovanilona; SG: siringaldeido; VL: vanilina; AS: ácido siríngico; AV: ácido vanílico; AF: ácido ferúlico e AC: ácido *p*-coumárico. Dentro de cada coluna, médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si a 5 % pelo teste LSD de Fisher protegido. P: serapilheira de brachiária; RG: resíduos grossos de eucalipto; RF: resíduos finos de eucalipto. Valores entre parênteses indicam a porcentagem de fenóis derivados de lignina em relação ao total (VSC)

Os elevados teores de siringaldeido (50,6 g kg⁻¹) e ácido siríngico (9,1 g kg⁻¹) nos resíduos de galhos grossos da serapilheira de eucalipto (RG) (Quadro 5) propiciaram a obtenção dos maiores teores de grupamentos siringil (Figura 2), enquanto os maiores teores dos ácidos ferúlico e *p*-coumárico nos resíduos de pastagem (Quadro 5) contribuíram para maiores teores de lignina do grupamento cinamil (Figura 1). Sanger et al. (1997) também descreveram maior abundância destes compostos no litter de pastagem, e indicaram este

resultado como característico da espécie. Mesmo assim, no presente trabalho verificou-se maior teor de VSC (somatório) nos galhos da serapilheira de eucalipto, seguido pela serapilheira da pastagem e daquela dos resíduos mais finos de eucalipto (galhos finos, folhas e casca). Resultado semelhante foi obtido para o teor de carboidratos nestes compartimentos da serapilheira (Figura 2). Hedjes & Ertel (1982) relataram que espécies arbóreas, como o eucalipto (angiospermas), têm apresentado predominância de compostos fenólicos dos grupos siringil e vanilil, e as pastagens, compostos do grupo cinamil, o que poderia justificar a maior presença dos fenóis, ácidos ferúlico e *p*-coumárico, na serapilheira da pastagem (Quadro 5).

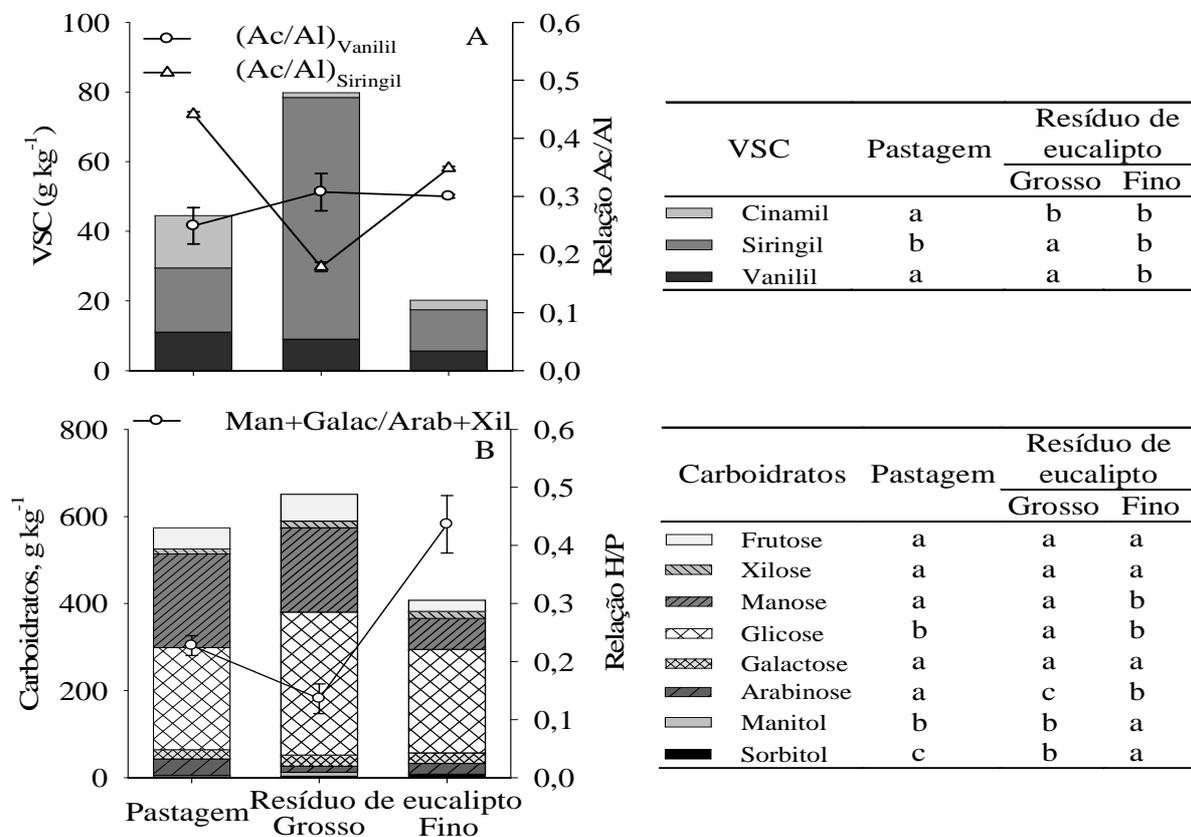


Figura 2. Teores de fenóis derivados de lignina (VSC: Vanilil, Siringil e Cinamil) e carboidratos nos compartimentos da serapilheira de Pastagem (P) e de eucalipto (RG: resíduos grossos de eucalipto e RF: resíduos finos de eucalipto). **A:** relação ácidos/aldeídos nos derivados vanilil e siringil; **B:** relação de Hexoses (manose+galactose) para pentoses (glicose+xilose). Quadros a direita dos gráficos com letras minúsculas iguais dentro de cada linha não diferem entre si a 5 % pelo teste LSD de Fisher ($p > 0,05$), protegido. Linha vertical indica erro padrão da média ($n=3$).

O maior diâmetro dos componentes e abundância de celulose, hemicelulose e lignina nos resíduos lenhosos de eucalipto (galhos grossos) podem ter propiciado a permanência/preservação de maior teor de monômeros de glicose, principal monossacarídeo neste componente da serapilheira ($\approx 50\%$), e mantido relação H/P semelhante àquela dos resíduos de pastagem, mas inferiores àquela dos resíduos finos de eucalipto (Figura 2). Sanger et al. (1997) também verificaram resultado similar, em que a relação H/P foi menor que 0,2 no litter de pastagem e próximas a 0,8 no de plantas florestais de *Picea Abies*, com resíduos mais lenhosos. Possivelmente, a maior labilidade e superfície de contato dos resíduos finos com enzimas decompositoras de celulose e hemicelulose tenham contribuído para tal resultado.

Resíduos de eucalipto têm apresentado maior abundância de compostos ricos em celulose e hemicelulose, baixa disponibilidade de N, e alterações na atividade e, ou, comunidade microbiana decompositora, interferindo na estabilização de compostos orgânicos na MOS. Já, no cultivo de pastagem foi observado maior disponibilidade de N no litter, o que pode estimular a atividade microbiana decompositora, aumentando a contribuição de carboidratos e aminoácidos mais estáveis no solo e, possivelmente aumentar o tempo de residência do C na MOS. Pode, ainda, favorecer a estabilização estrutural de substâncias húmicas devido à reação do N com resíduos de lignina e compostos fenólicos, seguida pela formação de compostos recalcitrantes, como um complexo tanino-proteína (Berg & Matzner, 1997). A maior abundância de N no ecossistema pode reduzir a ação (Berg & Matzner, 1997; Michel & Matzner, 2003) e a produção de enzimas lignolíticas (peroxidases, fenol oxidases) no litter (Carreiro et al., 2000) e no solo (Sjöberg et al., 2004b; Dijkstra et al., 2004), ao passo que pode estimular a produção de outras enzimas, como a celulase (Carreiro et al., 2000).

2.5.2. Teores totais de fenóis derivados de lignina (VSC), carboidratos e aminoaçúcares no solo

O solo cultivado com eucalipto não diferiu ($p > 0,5$) do solo cultivado com pastagem de braquiária quanto aos teores médios de C ($14,10 \text{ g kg}^{-1}$), N ($1,16 \text{ g kg}^{-1}$), VSC ($129,10 \text{ mg kg}^{-1}$) e aminoaçúcares ($361,26 \text{ mg kg}^{-1}$) (Quadro 6).

Resultados similares foram obtidos para as relações C/N e VSC/N, com valores médios próximos a 12,40 e 0,12, respectivamente. O teor de carboidratos totais foi menor no solo da linha ($4.549,4 \text{ mg kg}^{-1}$) e na entre-linhas ($4.201,5 \text{ mg kg}^{-1}$) do que naquele de pastagem ($5.927,7 \text{ mg kg}^{-1}$). Estes resultados estiveram associados ao maior teor de carboidratos aportados via resíduos vegetais ao solo da pastagem (Quadro 4).

Quadro 6. Teores de C orgânico, N total, fenóis derivados de lignina (VSC), carboidratos, aminoaçúcares, relação VSC/N e C/N em solos (camada de 0-10 cm) de pastagem (P), da linha (E_L) e da entre-linhas do eucalipto (E_{EL}) na região dos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo.

Característica	P	E_L	E_{EL}
C (g kg^{-1})	12,00a	13,50a	16,80a
N (g kg^{-1})	1,20a	1,20a	1,10a
C/N	10,00b	11,25b	15,27a
VSC (mg kg^{-1})	140,10a	124,10a	123,10a
VSC/N	11,68a	10,34a	11,19a
Carboidratos (mg kg^{-1})	5927,70a	4549,40b	4201,50b
VSC/Carboidratos	0,02a	0,03a	0,03a
Aminoaçúcares (mg kg^{-1})	431,30a	374,10a	278,30a
VSC (g kg^{-1} de C)	11,80a	9,60b	7,40c
Carboidratos (g kg^{-1} de C)	499,00a	348,80b	250,80c
Aminoaçúcares (g kg^{-1} de C)	36,50a	27,90b	16,70c

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si a 5 % pelo teste LSD de Fisher protegido ($p > 0,05$).

A maioria dos teores dos fenóis derivados de lignina foi similar no solo de ecossistemas florestal e pastoril; somente naquele de pastagem encontrou-se maior teor de acetosiringona e de ácido ferúlico (Quadro 7). Os monômeros mais abundantes no solo foram o ácido vanílico (22 %) > ácido siríngico (16 %) > siringaldeído (13 %) = acetovanilona (13 %) > ácido ferúlico (10 %) > ácido p-coumárico (9 %) = acetosiringona (9 %) > vanilina (8 %). Com isso, as relações entre grupamentos ácidos:aldeídos (Ac/Al) e hexoses:pentoses (H:P) foram maiores que 1, indicando maior estado de oxidação da lignina no solo, e predominância de carboidratos de origem microbiana (relação hexoses:pentoses > 1) em comparação ao que foi obtido na serapilheira.

Quando expressos com base no teor de C dos solos (g kg de C), os teores de VSC, carboidratos e aminoaçúcares foram sempre superiores no solo da pastagem do que naqueles de eucalipto, independentemente da localização (linha ou entre-linhas) (Quadro 6).

Quadro 7. Teores médios de fenóis derivados de lignina nos solos de pastagem (P) e eucalipto amostrados na linha (E_L) e entre-linhas (E_{EL}) de plantio dos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo.

Cultivo	AG	AL	SG	VL	AS	AV	AF	AC	VSC
	-----mg kg ⁻¹ -----								
P	15,5a	14,1a	18,9a	11,2a	20,9a	28,3a	18,8a	12,7a	140,1
E _L	11,0ab	19,2a	15,3a	7,9a	20,8a	26,2a	12,2ab	11,5a	124,1
E _{EL}	9,4b	16,8a	15,5a	8,9a	20,4a	32,2a	9,9b	10,1a	123,1
CV (%)	13,5	21,2	18,8	12,2	12,9	16,7	16,2	23,4	8,9
Média	12,0(9)	16,7(13)	16,6(13)	9,3(7)	20,7(16)	28,9(22)	13,5(11)	11,4(9)	129,1

AG: acetosiringona; AL: acetovanilona; SG: siringaldeído; VL: vanilina; AS: ácido siríngico; AV: ácido vanílico; AF: ácido ferúlico e AC: ácido p-coumárico. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si a 5 % pelo teste LSD de Fisher protegido. CV: coeficiente de variação. Valores entre parênteses indicam a percentagem de fenóis derivados de lignina em relação ao total (VSC)

No solo das entre-linhas do eucalipto a relação Ac/Al de grupamentos vanillil (Ac/Al)_v foi maior (3,6) que no solo de pastagem (2,5), indicando maior abundância de grupamentos ácidos e, portanto, grau mais avançado de biodegradação da lignina no solo do primeiro. Já nos monômeros de Siringil (Ac/Al)_s, a relação não diferiu ($p > 0,05$) para ambos os solos dos ecossistemas, com valores entre 1,0 e 1,5 (Figura 3) e, sempre superiores aos valores obtidos para os componentes da serapilheira, que variaram de 0,1 a 0,5 (Figura 2). O processo de degradação da lignina eleva a relação Ac/Al dos compostos fenólicos dela derivados (Hedges et al., 1988).

A menor labilidade do litter de eucalipto, observada nesse estudo, pode ter levado os microrganismos decompositores a re-mobilizarem a MOS pela ação de enzimas não seletivas originadas de fungos lignolíticos, aumentando o grau de oxidação da lignina no solo (Hamer & Marschner, 2005) e, pode ter propiciado a menor abundância de derivados do que em outros cultivos, como obtido no solo de pastagem, identificado pelo maior teor de carboidratos e relação H/P, além do maior teor de aminoaçúcares de origem microbiana (Figura 3).

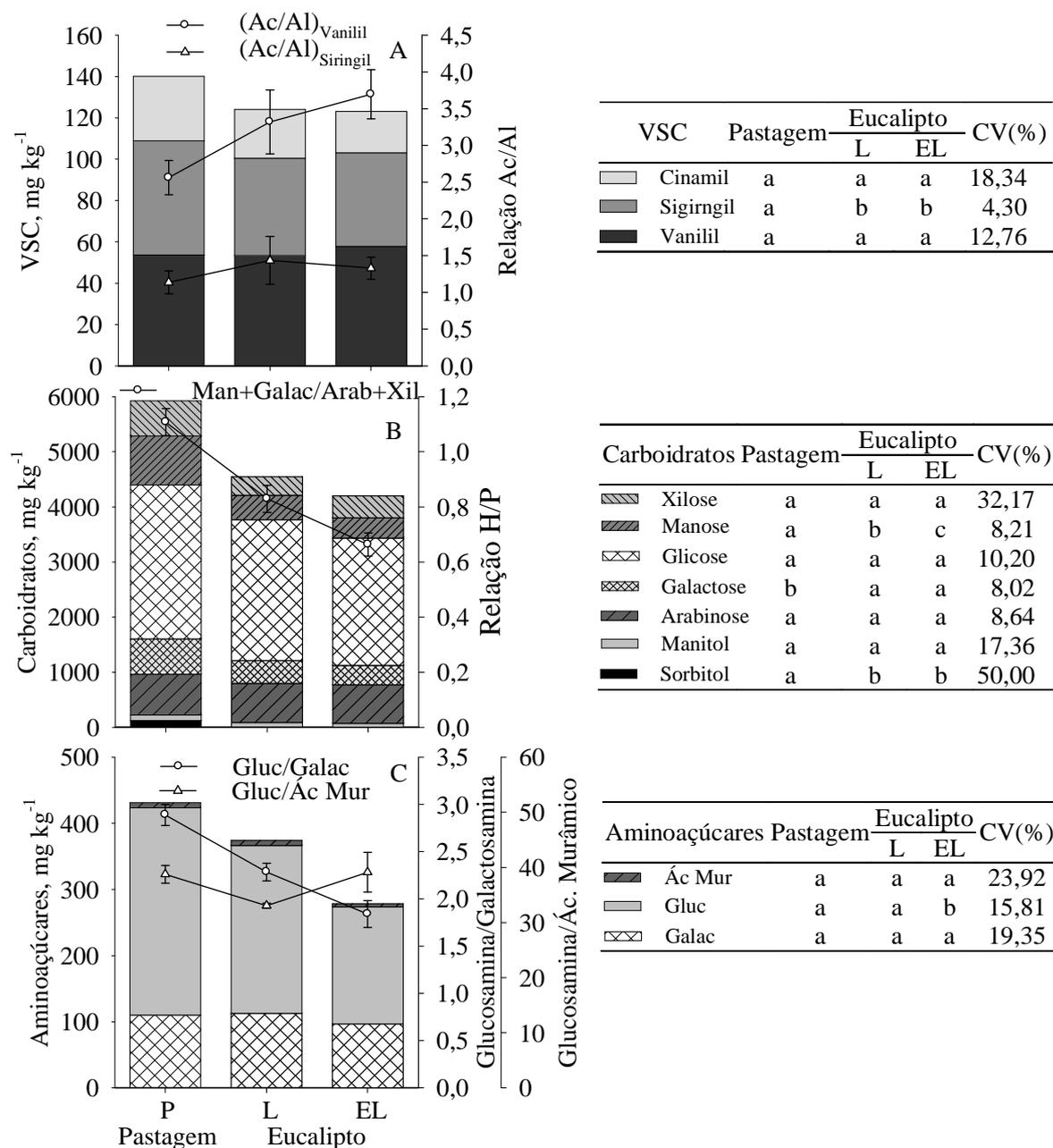


Figura 3. Teores de fenóis derivados de lignina (VSC: Vanilil, Siringil e Cinamil), carboidratos e aminoaçúcares em amostras de solo (camada de 0-10 cm) coletadas em pastagem de braquiária (P), na linha (L) e entre-linhas (EL) de cultivo de eucalipto. **A:** relação de formas ácidas para aldeídos (Ac/AI) nos derivados Vanilil e Siringil; **B:** relação de Hexoses (manose + galactose) para pentoses (glucose + xilose) e, **C:** aminoaçúcares derivados da atividade fúngica (glucosamina) em relação à bacteriana (ácido murâmico). Quadros distribuídos à direita dos gráficos com letras minúsculas iguais na linha indicam não haver diferença significativa ($p > 0,05$) entre cultivos pelo teste de LSD de Fisher protegido. CV (%): coeficiente de variação. Linha vertical indica erro padrão da média ($n=3$).

O maior teor de carboidratos totais obtidos no solo de pastagem (Quadro 6) ocorreu, principalmente, como reflexo do maior teor de manose e de sorbitol (Figura 3), este último presente somente no solo de pastagem. Obteve-se, assim, maior relação entre hexoses/pentoses (H/P) neste solo (Figura 3). Carboidratos derivados de plantas, em especial os polímeros de pentoses (arabinose (ara) e xilose (xil)) são fonte primordial de energia e C para os microrganismos do solo que, por sua vez, sintetizam primariamente polímeros de hexoses (ex.: galactose (gal), manose (man), frutose (frut) e ramnose (ram)) que podem ter seus teores incrementados no solo (Oades, 1984; Solomon et al., 2002). Relações H/P (gal+man/ara+xil) menores que 0,5 são observadas para plantas, e maiores que 2 para microrganismos (Amelung et al., 1999). Desta forma, quanto maior for esta relação maior será a contribuição microbiana na formação da MOS (síntese microbiana). Inversamente, baixas relações sugerem maior contribuição por herança, ou seja, parte dos compostos orgânicos que compõem a MOS podem ter sido originados diretamente de resíduos vegetais não alterados ou parcialmente decompostos pela comunidade microbiana (Solomon et al., 2002).

A maior relação H/P foi obtida no solo de pastagem, e esta decresceu no solo das entre-linhas de eucalipto (E_{EL}) e foi menor ainda para o solo da linha (E_L) (Figura 4), demonstrando a maior ocorrência de carboidratos de origem microbiana na MOS da pastagem e menor naquela do E_{EL} . Possivelmente, este resultado possa ser justificado pela maior labilidade dos resíduos aportados ou presentes no solo de pastagem (Figura 3).

Os teores de aminoaçúcares (glucosamina e galactosamina) e ácido murâmico no solo da linha e (E_L) e entre-linhas (E_{EL}) de eucalipto foram 13 e 36 % inferiores ao solo de pastagem, que teve a maior abundância de compostos de origem microbiana (maior relação H/P).

A abundância dos aminoaçúcares no solo dos cultivos foi maior para a glucosamina seguido da galactosamina e por último o ácido murâmico. Desses a glucosamina apresentou menor contribuição no solo das entre-linhas do eucalipto (Figura 3), propiciando a ocorrência

de menor relação glucosamina/galactosamina (Gluc/Galac), o que pode indicar maior presença de aminoaçúcares originados da atividade bacteriana no solo do cultivo de eucalipto em comparação ao solo de pastagem.

No solo de pastagem a maior presença de carboidratos, de hexoses e glucosamina podem ter sido associadas a maior atividade fúngica e, em menor proporção, bacteriana e de actinomicetos, uma vez que as maiores relações glucosamina/galactosamina e glucosamina/ácido murâmico são bioindicadores da ocorrência principalmente de fungos, enquanto a presença de galactosamina e de ácido murâmico, principalmente de bactérias (Solomon et al., 2002), com pequenas contribuições fúngicas e de actinomicetos na produção de galactosamina e ácido murâmico, respectivamente (Sowden & Ivarson, 1974; Glaser et al., 2004).

2.6. CONCLUSÕES

O teor de carboidratos, o teor de N a relação entre lignina (VSC)/N, C/N e ácido/aldeído (Ac/Al)s de fenóis derivados de grupamentos siringil da lignina, na serapilheira de eucalipto cultivado em rotação curta são menores que daquela de pastagem, mas não observase diferença entre as serapilheiras, quanto ao teor de lignina, já o teor de carbono orgânico é maior na serapilheira do cultivo de eucalipto.

No solo de eucalipto obtem-se menor presença de carboidratos, relação hexoses/pentoses (H/P), teores de aminoaçúcares (glucosamina e galactosamina) e ácido murâmico, e relação glucosamina/galactosamina em comparação àquele de pastagem.

Nos solos cultivados com eucalipto há maior contribuição direta de componentes de origem vegetal para a matéria orgânica que aqueles de origem microbiana em comparação aos solos de pastagem.

2.7. LITERATURA CITADA

- AMELUNG, W.; FLACH, K.W. & ZECH, W. Neutral and acidic sugars in particle-size fractions as influenced by climate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:865-873, 1999.
- BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R. & GALLO, J.R. Métodos de análise química de plantas. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 48P. (Boletim Técnico, 78)
- BERG, B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *For. Ecol. Manage.*, 133:13-22, 2000.
- CARREIRO, M.M.; SINSABAUGH, R.L.; REPERT, D.A. & PARKHURST, D.F. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology*, 81:2359-2365, 2000.
- COELHO, R.R.R.; SACRAMENTO, D.R. & LINHARES, L.F. Amino sugars in fungal melanins and soil humic acids. *Eur. J. Soil Sci.*, 48:425-529, 1997.
- DIJKSTRA, F.A.; HOBBIE, S.E.; KNOPS, J.M.H. & REICH, P.B. Nitrogen deposition and plant species interact to influence soil carbon stabilization. *Ecol. Letters*, 7:1192-1198, 2004.
- FUNARBE. SAEG-Sistema para análises estatísticas. v. 9.0. Viçosa-MG, 2005.
- GLASER, B.; TURRIÓN, M.B. & ALEF., K. Amino sugars and muramic acid-biomarkers for soil microbial community structure analysis. *Soil Biol. Biochem.*, 36:399-407, 2004.
- GLASER, B.; TURRIÓN, M.B.; SOLOMON, D.; NI, A. & ZECH, W. Soil organic matter quantity and quality in mountain soils of the Alay Range, Kyrgyzia, affected by land use change. *Biol. Fertil. Soils*, 31:407-413, 2000.
- GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. & THOMAS, R.J. Lignin and carbohydrate alteration in particle-size separates of an Oxisol under tropical pastures following native savanna. *Soil Biol. Biochem.*, 27:1629-1638, 1995.

- GOÑI, M.A. & MONTGOMERY, S. Alkaline CuO oxidation with a microwave digestion system: lignin analyses of geochemical samples. *Anal. Chem.*, 72:3116-3121, 2000.
- HAMER, U. & MARSCHNER, B. Priming effects in different soil types induced by fructose, alanine, oxalic acid and catechol additions. *Soil Biol. Biochem.*, 37:445-454, 2005.
- HEDGES, J.I.; BLANCHETTE, R.A.; WELIKY, K. & DEVOL, A.H. Effects of fungal degradation on the CuO oxidation products of lignin: a controlled laboratory study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52: 2717-2726, 1988.
- HEDGES, J.I. & ERTEL, J.R. Characterization of lignin by gas capillary chromatography of cupric oxide products. *Anal. Chem.*, 54:174-178, 1982.
- HEIM, A. & SCHMIDT, M.W.I. Lignin turnover in arable soil and grassland analysed with two different labelling approaches. *Europ. J. Soil Sci.*, 58:599-608, 2007.
- KAISER, K. & BENNER, R. Determination of amino sugars in environmental samples with high salt content by high-performance anion-exchange chromatography and pulsed amperometric detection. *Anal. Chem.*, 72:2566-2572, 2000.
- KÖGEL-KNABNER, I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.*, 34: 139-162, 2002.
- KÖGEL-KNABNER, I. Analytical approaches for characterizing soil organic matter. *Organic Geochem.*, 31:609-625, 2000.
- KÖGEL, I. Estimation and decomposition pattern of the lignin component in forest humus layers. *Soil Biol. Biochem.*, 18:589-594, 1986.
- LIANG, C.; ZHANG, X.; RUBERT IV, K.F. & BALSER, T.C. Effect of plant materials on microbial transformation of amino sugars in three soil microcosms. *Biol. Fertil. Soils*, 43:631-639, 2007.
- MARTENS, D.A. & LOEFFELMANN, K.L. Improved accounting of carbohydrate carbon from plants and soils. *Soil Biol. Biochem.*, 34:1393-1399, 2002.

- MARTENS, D.A. & MCLAIN, J.E.T. Climate mitigation potential of the San Pedro River riparian zone. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-36. 2005. Disponível em: www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p036/rmrs_p036_491_495.pdf. Acesso: 05/10/2007.
- MENDHAM, D.S.; HEAGNEY, E.C.; CORBEELS, M.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S. & MCMURTRIE R.E. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globules*. *Soil Biol. Biochem.*, 36:1067-1074, 2004.
- MICHEL, K. & MATZNER, E. Response of enzyme activities to nitrogen addition in forest floors of different C-to-N ratios. *Biol. Fertil. Soils*, 38:102-109, 2003.
- MÖLLER, A.; KAISER, K. & ZECH, W. Lignin, carbohydrate, and amino sugar distribution and transformation in the tropical highland soils of northern Thailand under cabbage cultivation, *Pinus* reforestation, secondary forest, and primary forest. *Austr. J. Soil Res.*, 40:977-998, 2002.
- OADES, J.M. The retention of organic matter in soils. *Biogeochem.*, 5:35-70, 1984.
- OMETTO, J.C. *Bioclimatologia vegetal*. São Paulo, Ceres, 1981. 425p.
- OTTO, A. & SIMPSON, M.J. Evaluation of CuO oxidation parameters for determining the source and stage of lignin degradation in soil. *Biogeochemistry*, 80:121-142, 2006.
- RASSE, D.P.; DIGNAC, M.F.; BAHRI, H.; RUMPEL, C.; MARIOTTI, A. & CHENU, C. Lignin turnover in an agricultural field: from plant residues to soil-protected fractions. *Europ. J. Soil Sci.*, 57:530-538, 2006.
- SANGER, L.J.; ANDERSON, J.M.; LITTLE, D. & BOLGER, T. Phenolic and carbohydrate signatures of organic matter in soils developed under grass and forest plantations following changes in land use. *Europ. J. Soil Sci.*, 48:311-317, 1997.
- SARIYILDIZ, T. & ANDERSON, J.M. Decomposition of sun and shade leaves from three deciduous tree species, as affected by their chemical composition. *Biol. Fertil. Soils*, 37:137-146, 2003.

- SILVA, I.R. & MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L. Fertilidade do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa. 2007, 276-374p.
- SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & SILVA, E.F. Manejo de resíduos e matéria orgânica do solo em plantações de eucalipto: uma questão estratégica para a manutenção da sustentabilidade. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.29, 2004, p.10 - 20.
- SIMPSON, R.T.; FREY, S.D.; JOHAN SIX, J. & THIET, R.K. Preferential accumulation of microbial carbon in aggregate structures of no-tillage soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 68:1249-1255, 2004.
- SJÖBERG, G.; KNICKER, H.; NILSSON, S.I. & BERGGREN, D. Impact of long-term N fertilization on the structural composition of spruce litter and mor humus. Soil Biol. Biochem., 36:609-618, 2004a.
- SJÖBERG, G.; NILSSON, S.I.; PERSSON, T. & KARLSSON, P. Degradation of hemicellulose, cellulose and lignin in decomposing spruce needle litter in relation to N. Soil Biol. Biochem., 36 1761-1768, 2004b.
- SOLOMON, D.; FRITZSCHE, F.; TEKALIGN, M.; LEHMANN, J. & ZECH, W. Soil organic matter composition in the subhumid Ethiopian highlands as influenced by deforestation and agricultural management. Soil Sci. Soc. Am. J., 66:68-82, 2002.
- SOWDEN, F.J. & IVARSON, K.C. Effects of temperature on changes in the nitrogen constituents of mixed forest litters during decomposition after inoculation with various microbial cultures. Can. J. Soil Sci., 54:387-394, 1974.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. & DICKEY, D.A. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. New York: McGraw-Hill, 1997. 666p.
- STEVENSON, F.J. Humus Chemistry: Genesis, Composition and Reactions. 2.ed. New York, Willey & Sons Inc., 1994. 496p.

- SUHAS, P.J.M.C. & CARROTT, M.M.L.R. Lignin - from natural adsorbent to activated carbon: A review. *Biores. Technol.*, 98:2301-2312, 2007.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Comm. Soil. Sci. Plant Anal.*, 13:1467-1476, 1988.
- ZINN, Y.L.; RESCK, D.V.S. & SILVA, J.E. Soil organic carbon as affected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. *For. Ecol. Manag.*, 166:285-294, 2002.
- ZHANG, X.; AMELUNG, W.; YUAN, Y. & ZECH, W. Amino sugar signatures of particle size fractions in soils of the native prairie as affected by climate. *Soil Sci.*, 163:220-229, 1998.
- ZHANG, X & AMELUNG, W. Gas chromatographic determination of muramic acid, glucosamine, mannosamine, and galactosamine in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 28:1201-1206, 1996.

CAPÍTULO III

CARBOIDRATOS, AMINOAÇÚCARES E COMPOSTOS FENÓLICOS DERIVADOS DA LIGNINA NA SERAPILHEIRA E EM SOLO CULTIVADO COM EUCALIPTO DE CURTA-ROTAÇÃO NO SISTEMA CONVENCIONAL E FERTIRRIGADO

3.1. RESUMO

O aumento da produtividade de cultivos de eucalipto pela maior disponibilidade de fertilizantes e água, pode levar a alterações na formação da matéria orgânica do solo (MOS), por alterar a estrutura de componentes celulares da serapilheira, a atividade e a diversidade microbiana do solo. Neste sentido, o presente estudo teve o objetivo de avaliar alterações causadas pelo cultivo do eucalipto sob sistemas convencional e fertirrigado em biomarcadores, tais como: fenóis derivados de lignina, carboidratos e aminoácidos visando acessar o estágio de decomposição e a contribuição de compostos de origem microbiana para a MOS em Argissolo do litoral Norte do Espírito do Santo. Os resultados indicaram que o cultivo de eucalipto fertirrigado aportou maior quantidade de resíduo, reduziu o teor de carboidratos e manteve o teor de lignina na serapilheira, em comparação ao cultivo convencional. A fertirrigação aumentou os teores de lignina (VSC) nos galhos grossos e acelerou a alteração da lignina nos resíduos mais finos da serapilheira (> relação Ac/Al). No solo, com a maior adição de água e nutrientes (sistema fertirrigado), o ganho em produtividade (22 %) incrementou a presença de carboidratos totais, lignina e aminoácidos, principalmente nas entre-linhas de cultivo. Também ocorreu aumento na relação hexoses/pentoses (H/P), indicando aumento da presença de compostos originários da comunidade microbiana. Adicionalmente, ficou atestada a maior relação glucosamina/ácido murâmico no solo cultivado no sistema fertirrigado a valores próximos a 48, bem superiores aos obtidos no solo da linha do eucalipto cultivado no sistema convencional, igual a 20,

indicando, possivelmente contribuição dos microrganismos produtores de glucosamina (fungos > bactérias > actinomicetos) para a formação da MOS do cultivo fertirrigado.

**CARBOHYDRATES, AMINO SUGARS AND LIGNIN-DERIVED PHENOLS IN
LITTER AND IN SOIL UNDER CONVENTIONAL AND FERTIRRIGATED SHORT-
ROTATION EUCALYPTUS**

3.2. ABSTRACT

The increase in productivity of short-rotation eucalyptus plantations by improving water and nutrients availability through fertirrigation, can lead to changes in the formation of soil organic matter (SOM), by modifying the structure of cellular components of the litter, and the activity and diversity of soil microorganisms. Therefore, the aim of the present study was to evaluate the changes caused by the cultivation of eucalyptus under conventional and fertirrigated system on biomarkers, such as phenols derived from lignin, carbohydrates and amino sugars, as an attempt to the stage of decomposition and the relative contribution of plant-and microbial-derived compounds to the SOM in a Coastal Plain Argisol in northern Espírito Santo State. The results showed that the fertirrigated eucalyptus contributed more litter, reduced the carbohydrate content and maintained the content of lignin in the litter in comparison to system conventional. Fertirrigation led to an increase in lignin (VSC) content of coarse litter components, and more rapid decomposition fo lignin in fine litter components (> Ac/Al ratio). In the soil, the addition of water and nutrients (fertirrigated system), which increased the productivity by 22%, caused an increased in contents of carbohydrates, lignin and amino sugars, mainly in the between-lines position. Also, it occurred on widening in the hexoses/pentoses (H/P) ratio, indicating increased presence of compounds of microbial origin. Additionally it was found a greater glucosamine/muramic acid ratio in the soil under fertirrigated system, with present values close to 48, well above the soil obtained in the line of

eucalyptus plants grown under conventional system, with a ratio equal to 20. These findings are indicative of a greater contribution of microorganisms producers of glucosamine (fungi> bacteria> actinomycetes) for the SOM under fertirrigated cultivation.

3.3. INTRODUÇÃO

Cultivos intensivos de espécies florestais, com maior disponibilidade de fertilizantes e, ou, água, podem levar ao aumento da produtividade (Stape et al., 2004) e aporte de resíduos ao solo (Leggett & Kelting, 2006), alterando a estrutura de componentes celulares (do litter) e a atividade microbiana do solo (Neff et al., 2002; Sjöberg et al., 2004). Essa técnica de cultivo tem demonstrado maior eficácia em aumentar C e N no solo (Madeira et al., 2002; Li et al. 2006), possivelmente por estreitar a relação C:N e lignina:N, aumentar a labilidade do litter e favorecer a estabilização da matéria orgânica do solo (MOS) nativa (Forrester et al., 2006).

O aumento do teor de carboidratos, provenientes da celulose e da hemicelulose no tecido dos resíduos vegetais de eucalipto irrigado e fertilizado têm aumentado a contribuição de compostos orgânicos derivados da atividade microbiana do solo na formação da MOS (Madeira et al., 2002). Essa contribuição pode ser mensurada pela relação obtida entre açúcares derivados da atividade microbiana (hexoses) e açúcares derivados de plantas (pentoses) (Möller et al., 2002).

Além dos carboidratos, os resíduos de eucalipto apresentam teores consideráveis de lignina, biopolímero considerado de limitada decomposição pelos microrganismos, devido a sua maior complexidade estrutural (Heim & Schmidt, 2007). No entanto, pode-se hipotetizar que resíduos vegetais produzidos em cultivos fertirrigados são mais abundantes e de maior labilidade para os microrganismos. Com isso, ter-se-ia um processo mais acelerado de decomposição de restos culturais no solo (Conti et al., 1997; Leite et al., 2003), aumentando o estado de oxidação de compostos fenólicos (lignina) (Sjöberg et al. (2004), o que interfere na estabilização do C na MOS. Os diferentes estádios de decomposição ou humificação destes

compostos podem ser identificados pela abundância de grupamentos ácidos e aldeídos da lignina no solo (relação Ac/Al), sendo o grau de humificação proporcional ao valor obtido para a relação Ac/Al (Otto & Simpson, 2006).

Indicadores da contribuição da comunidade microbiana para a formação e estabilização da MOS podem ser obtidos indiretamente pela quantificação de aminoaçúcares, tais como, glucosamina e galactosamina, e ácido murâmico, remanescentes da atividade microbiana no solo. Comunidades fúngica originam predominantemente a glucosamina, e as bactérias o ácido murâmico e a galactosamina (Zhang et al., 1998; Solomon et al., 2002; Glaser et al., 2004), já os actinomicetos são menos específicos e podem produzir a glucosamina e menores quantidades de ácido murâmico (Glaser et al., 2004). Com isso, as relações entre os aminoaçúcares (glucosamina/ácido murâmico e glucosamina/galactosamina) podem servir como bio-indicadores da contribuição fúngica e bacteriana para a MOS (Zhang et al., 1998; Amelung et al., 1999; Glaser et al., 2004; Liang et al., 2007). Em solos de eucalipto, no entanto, existem poucos estudos que relatem as alterações provocadas pela intensificação do uso da água e nutrientes na qualidade dos resíduos vegetais produzidos e na contribuição da comunidade microbiana para a MOS.

O presente estudo teve o objetivo de avaliar as alterações causadas pelo cultivo do eucalipto nos teores de fenóis derivados de lignina, carboidratos, aminoaçúcares, estágio de decomposição da MOS; bem como estabelecer a contribuição relativa de compostos de origem vegetal e microbiana para a MOS sob sistemas convencional e fertirrigado.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido com amostras de solo do município de Aracruz-ES, localizadas a 19° 48' S e 40° 17' W. Em um experimento em que se avaliava a suplementação de água e nutrientes, entre outros fatores silviculturais, foram selecionadas para a amostragem

os tratamentos onde se cultivava o eucalipto em sistema convencional e fertirrigado, que foram:

- EC_L: Eucalipto cultivado em sistema convencional, com amostras de solo coletadas na linha do plantio atual (entre-linhas da rotação anterior);
- EC_{EL}: Eucalipto cultivado em sistema convencional, com amostras de solo coletadas nas entre-linhas do plantio atual (linha da rotação anterior);
- EF_{EL}: Eucalipto cultivado em sistema fertirrigado, com amostras de solo coletadas na linha do plantio atual;
- EF_L: Eucalipto cultivado em sistema fertirrigado, com amostras de solo coletadas nas entre-linhas do plantio atual.

Até a época da coleta das amostras de solo as áreas (talhões) de eucalipto selecionadas já tinham sido cultivadas por 28 anos (quatro ciclos) com esta cultura (Quadros 1 e 2). O clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen (Ometto, 1981), com temperatura e precipitação pluvial média anual de 23 °C e 1.400 mm ano⁻¹ respectivamente. O local representa uma microbacia típica da região dos Tabuleiros Costeiros. O solo foi caracterizado como Argissolo Amarelo fase floresta tropical subprenifólia textura média sobre argilosa, derivado do grupo Barreiras.

Previamente ao último plantio de eucalipto, o solo foi preparado mediante gradagem (“bedding”), em que os resíduos da colheita são enterrados no solo na direção da linha de cepas (tocos) do cultivo anterior (Figura 1) e, em seguida, coveado, plantado e fertilizado manualmente com 100 g cova⁻¹ de adubo formulado NPK 6-30-6. Devido a esse preparo localizado, foram coletadas amostras de solo, tanto na direção das linhas (L), quanto das entre-linhas (EL) de eucalipto.

Quadro 1. Histórico de uso da área experimental cultivada com eucalipto convencional (EC) e fertirrigado (EF).

Uso	Anos						
	até 1950	1951-1965	1966-1973	1974-1981	1982-1989	1990-1997	1998-2004
EC	Mata nativa	Pastagem		Eucalipto	Eucalipto	Eucalipto	Eucalipto Convencional
EF	Mata nativa	Pastagem		Eucalipto	Eucalipto	Eucalipto	Eucalipto Fertirrigado

Quadro 2. Características da área experimental cultivada com eucalipto convencional (EC_L e EC_{EL}) e fertirrigado (EF_L e EF_{EL}).

Tratamentos	Idade ¹	Coleta	Área	Topografia	Produtividade
	ano		ha		m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹
EC _L	6,0	Linha	32,1	Plana	39,2
EC _{EL}	6,0	Entre-linhas	32,1	Plana	39,2
EL _L	6,0	Linha	33,6	Plana	47,7
EL _{EL}	6,0	Entre-linhas	33,6	Plana	47,7

¹, idade das plantas no momento da coleta das amostras de solo.

O último plantio de eucalipto foi realizado em 1998 (Quadro 1), com plantas provenientes de híbridos clonais de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, cultivados em sistema de reforma e, espaçamento entre plantas de 3 x 3 m. Após 90 dias do plantio, as plantas do tratamento convencional receberam 350 kg ha⁻¹ de fosfato natural e, no final do primeiro ano, mais 160 kg ha⁻¹ de NPK 6-30-6. As plantas cultivadas no sistema fertirrigado, que visou ao suprimento maximizado de água e nutrientes, foram adubadas com 600 kg ha⁻¹ de Ca e 300 kg ha⁻¹ de Mg (como calcário dolomítico); 4 kg ha⁻¹ de B, 2 de Cu e 2 de Zn, seguido por fertilizações trimestrais com 126 kg ha⁻¹ de N (como sulfato de amônio), 21 kg ha⁻¹ de P (como superfosfato simples) and 79 kg ha⁻¹ de K (como cloreto de potássio). A adição de água via irrigação foi por gotejamento, com adição de 35 mm por semana, baseada no balanço hídrico da região que mostrou um potencial médio de evapotranspiração de 28 ± 2 mm por semana (Stape et al., 1997). Um pluviômetro foi instalado na área e o volume de água para a

aplicação durante uma semana foi baseado na precipitação pluvial das semanas anteriores (se a precipitação foi mais que 35 mm na semana anterior, não era realizada irrigação na semana seguinte). A taxa de irrigação do sistema foi checada mensalmente (Stape et al., 2004).

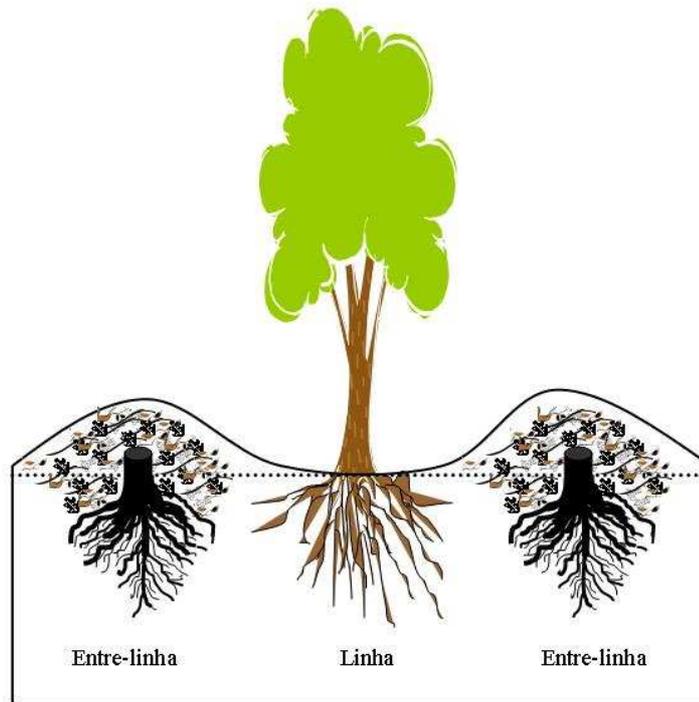


Figura 1. Ilustração do efeito da gradagem tipo “bedding” e das regiões do solo onde foram realizadas as amostragens na linha e entre-linhas do cultivo de eucalipto.

Nessas áreas cultivadas com eucalipto (Quadro 1), foram coletadas amostras de solo, na linha e entre-linhas de plantio. Foram coletadas três amostras compostas de solo (quatro sub-amostras) na profundidade de 0-10 cm. Em cada talhão, também foram coletadas amostras de solo indeformadas com anéis volumétricos para se estimar a densidade aparente do solo.

As amostras de solo foram coletadas na época chuvosa (janeiro/fevereiro) e os povoamentos de eucalipto estavam no final da rotação (seis anos). Depois de coletadas, as amostras de solo foram imediatamente secadas ao ar, destorroadas, passadas em peneira com malha de 2 mm, homogeneizadas e sub-amostras foram retiradas para caracterização física e química (Quadro 3).

Quadro 3. Características químicas e físicas dos solos cultivados com eucalipto em sistema convencional (EC_L e EC_{EL}) e fertirrigado (EF_L e EF_{EL}).

Cultura	¹ pH	² Ca ²⁺	² Mg ²⁺	³ H+Al	⁴ P	⁴ K	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Dens.
	-----cmol _c dm ⁻³ -----				---mg dm ⁻³ ---		-----%-----				kg dm ⁻³
EC _L	5,3	1,2	0,3	1,4	5,8	16	70	15	2	13	1,5
EC _{EL}	4,9	0,5	0,2	1,6	4,3	10	74	12	2	13	1,4
EF _L	5,1	1,6	0,4	3,7	7,3	37	47	17	5	33	1,4
EF _{EL}	5,1	2,1	0,4	3,5	39,4	40	51	15	5	30	1,4

¹, pH em H₂O, ², Extrator: KCl – 1 mol L⁻¹, ³, Extrator: Acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ – pH 7,0; ⁴, Extrator: Mehlich 1. L – amostras coletadas nas linhas de plátios e EL – amostras coletadas as entre-linhas de plantios.

A serapilheira na superfície do solo foi amostrada no momento da coleta das amostras de solo da seguinte forma: dentro de cada aérea dos tratamentos selecionados foram identificados quatro pontos aleatoriamente, lançando-se um gabarito com 0,25 m² de área (0,5 x 0,5 m). A serapilheira coletada era composta por galhos, cascas e folhas do eucalipto. Após a coleta, as amostras de serapilheira foram secadas em estufa (65 °C por 72 h) para determinação da matéria seca e teores de lignina e carboidratos.

Nas amostras de solo e serapilheira efetuaram-se análises de C orgânico total (COT), N total (NT), teores de fenóis derivados de lignina (VSC) e carboidratos, além de aminoácidos derivados da atividade microbiana no solo. Os métodos utilizados nessas análises foram descritos no capítulo II, itens 2.4.1 a 2.4.4.

Os resultados foram analisados no programa estatístico SAEG 9.0 (FUNARBE, 2005). As médias dos tratamentos foram comparadas por meio do teste de LSD de Fisher (p < 5 %) protegido (Steel et al., 1997), ou seja, foram realizadas comparações múltiplas apenas quando o teste de F da análise de variância foi significativo (p < 5 %).

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1. Teores totais de fenóis derivados de lignina (VSC) totais e carboidratos totais na serapilheira

O cultivo do eucalipto no sistema fertirrigado aumentou a produtividade e favoreceu o acúmulo de serapilheira, especialmente de resíduos finos ($p < 5\%$) (Quadro 4). O aumento da produção e a maior deposição da matéria seca na superfície e no interior do solo são considerados importantes fontes de incremento do estoque de C e N no solo (Madeira et al., 2002; Neff et al., 2002; Leggett & Kelting, 2006; Li et al. 2006). O cultivo do eucalipto no sistema fertirrigado não alterou os teores totais de lignina, C e N, e reduziu o teor total de carboidratos na serapilheira, em comparação àquela de eucalipto cultivado no sistema convencional (Quadro 4). Ainda, destacou-se no cultivo fertirrigado o aumento da relação hexoses/pentoses (H/P) (EF: 0,28 e EC: 0,22), o que pode indicar maior presença de carboidratos de origem microbiana na serapilheira, provavelmente, em decorrência da maior participação de resíduos finos, menos lenhosos (EF: 60 e EC: 40 %) e de melhor qualidade nutricional dos resíduos, além da maior disponibilidade hídrica, que combinados pode ter favorecido a colonização pelos microrganismos do solo.

A redução no teor de carboidratos totais na serapilheira do eucalipto fertirrigado pode ser justificada pela maior intensidade de utilização dos carboidratos de origem vegetal (pentoses) por parte dos microrganismos do solo, que por sua vez aumentaram aqueles de origem microbiana (hexoses) na serapilheira em comparação ao do cultivo convencional (Quadro 4). A maior disponibilidade de água e nutrientes, especialmente o N, no solo e, ou, no litter do sistema fertirrigado, podem ter estimulado a produção de enzimas responsáveis pela degradação da celulose (celulase) e, aumentar a relação H/P no solo (Carreiro et al., 2000).

Quadro 4. Matéria seca total e percentagem de resíduos grossos (galhos grossos) e resíduos finos (folhas+galhos finos+casca), teores médios de carboidratos totais, fenóis derivados de lignina (VSC), relação ácidos/aldeídos de grupamentos vanilil (Ac/Al)v e siringil (Ac/Al)s, e relação hexoses/pentoses (H/P) na serapilheira de povoamentos de eucalipto convencional (EC) e fertirrigado (EF) nos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo.

Características	EC	EF
Matéria seca total (t ha ⁻¹)	14,15b	23,09a
Resíduos grossos (%)	58,00a	40,00b
Resíduos finos (%)	42,00b	60,00a
C (g kg ⁻¹)	500,20a	504,20a
N (g kg ⁻¹)	5,30a	04,80a
C/N	94,38a	105,04a
VSC (g kg ⁻¹)	60,00a	56,60a
VSC/N	11,32a	11,79a
Carboidratos (g kg ⁻¹)	591,38a	408,67b
VSC/Carboidratos	0,10b	0,14a
Carboidratos (g kg ⁻¹ de C)	1182,30a	810,50b
VSC (g kg ⁻¹ de C)	119,95a	112,26a
(Ac/Al)v	0,30a	0,25a
(Ac/Al)s	0,19a	0,17a
H/P	0,22b	0,28a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si a 5 % pelo teste LSD de Fisher protegido.

Os compostos fenólicos que mais contribuíram para a lignina (VSC) da serapilheira foram, em média, o siringaldeído (59 %), a acetosiringona (12 %) e o ácido siríngico (11 %). Estes compostos foram encontrados principalmente nos resíduos grossos (RG), cujos teores foram superiores aos obtidos no compartimento mais fino (RF), composto por folhas, galhos finos e cascas (Quadro 5), levando a maior contribuição do grupamento siringil para a VSC (Figura 2). Também obteve-se maior acúmulo de compostos do grupamento siringil nos

resíduos grossos, principalmente do siringaldeído, em comparação aos resíduos finos (Figura 2). A maior participação de tecidos de sustentação nos resíduos grossos pode ter favorecido a alocação de lignina nesse compartimento. A lignina é importante componente das células da parede celular de plantas vasculares e, junto com a hemicelulose, constitui a parede primária, secundária e a lamela média dos espaços entre microfibrilas de celulose, atuando como uma conexão entre células, além de servir como reforço da parede celular do tecido xilemático (Kögel-Knabner, 2002). Na lignina do litter de eucalipto verificou-se maior relação de compostos fenólicos do grupamento siringil em relação àqueles do grupamento vanilil (2,67), indicando maior presença de siringaldeído, acetosiringona e ácido sirínico (Zinn et al., 2002).

No sistema de manejo mais intensivo (fertirrigado) obteve-se maior teor de VSC (93,4 g kg⁻¹) nos resíduos grossos da serapilheira em comparação àquele do sistema convencional (84,0 g kg⁻¹) (Quadro 5), mas a maior produção de resíduos grossos (58 %) verificada no cultivo convencional em comparação aos resíduos finos, que teve menor teor de lignina, contrabalançou os teores médios de VSC na serapilheira dos cultivos (Quadro 4). Os teores médios de VSC na serapilheira variaram de 112 a 120 g kg⁻¹ de C, no cultivo fertirrigado e convencional, respectivamente (Quadro 4). Comparativamente, esses teores foram superiores aos obtidos por Möller et al. (2002), que variaram de 52,5 a 25,4 g kg⁻¹ de C no litter (camada orgânica) de espécies arbóreas (20 anos de *Pinus Kesiya*) e florestas primária, respectivamente, na região Nordeste da Tailândia e, aos teores observados por Sjöberg et al. (2004), com VSC igual a 58,8 g kg⁻¹ de C no litter de *Picea abies* (L.) Karst.

Quadro 5. Teores médios de fenóis derivados de lignina nos compartimentos da serapilheira (resíduos grossos e resíduos finos) nos povoamentos de eucalipto em sistema convencional (EC) e fertirrigado (EF). Valores entre parênteses indicam a percentagem de fenóis derivados de lignina em relação ao total (VSC).

Cultivo	AG	AL	SG	VL	AS	AV	AF	AC	VSC
-----Resíduos grossos (g kg ⁻¹)-----									
EC	10,3a	1,8a	53,2b	7,0a	8,6a	1,8a	0,6a	0,7a	84,0b
EF	11,2a	2,0a	62,0a	6,9a	9,7a	1,9a	0,4b	0,2b	94,3a
-----Resíduos finos (g kg ⁻¹)-----									
EC	3,2a	1,3a	10,8a	3,8a	3,8a	1,5a	1,3a	1,4a	27,1a
EF	4,3a	1,4a	14,1a	5,1a	3,2a	1,2a	1,5a	1,2a	32,0a
Média	7,2(12)	1,6(3)	35,0(59)	5,7(9)	6,3(11)	1,6(3)	1,0(2)	0,9(1)	59,4

AG: acetosiringona; AL: acetovanilona; SG: siringaldeído; VL: vanilina; AS: ácido siríngico; AV: ácido vanílico; AF: ácido ferúlico e AC: ácido p-coumárico. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e tipo de resíduo, não diferem entre si a 5 % pelo teste LSD de Fisher protegido.

Os resíduos menos lenhosos da serapilheira de eucalipto convencional (EC) apresentaram maior relação Ac/Al nos grupamentos vanilil e siringil (Figura 2), indicando estágio mais avançado de oxidação (decomposição) da lignina dos resíduos nesse sistema de manejo. A menor ciclagem (deposição) de resíduos vegetais novos decorrentes da menor produtividade no sistema convencional pode ter contribuído para maior utilização da lignina de resíduos finos da serapilheira por fungos decompositores. Adicionalmente, a menor susceptibilidade de resíduos mais lenhosos à degradação enzimática pode justificar a menor relação Ac/Al nos resíduos grossos, em comparação aos resíduos finos.

A adubação e o fornecimento de água ao povoamento fertirrigado reduziram o teor de frutose, xilose e manose na fração mais lenhosa e do sorbitol na menos lenhosa da serapilheira, diminuindo o teor de carboidratos totais nos dois compartimentos – resíduos grossos e resíduos finos, em comparação ao cultivo convencional e, aumentaram a relação de hexoses/pentoses (H/P) no cultivo fertirrigado (Figura 2), indicando maior presença de carboidratos de origem microbiana, provavelmente em decorrência da maior atividade da

comunidade decompositora, acelerando o processo de formação de hexoses em detrimento às pentoses.

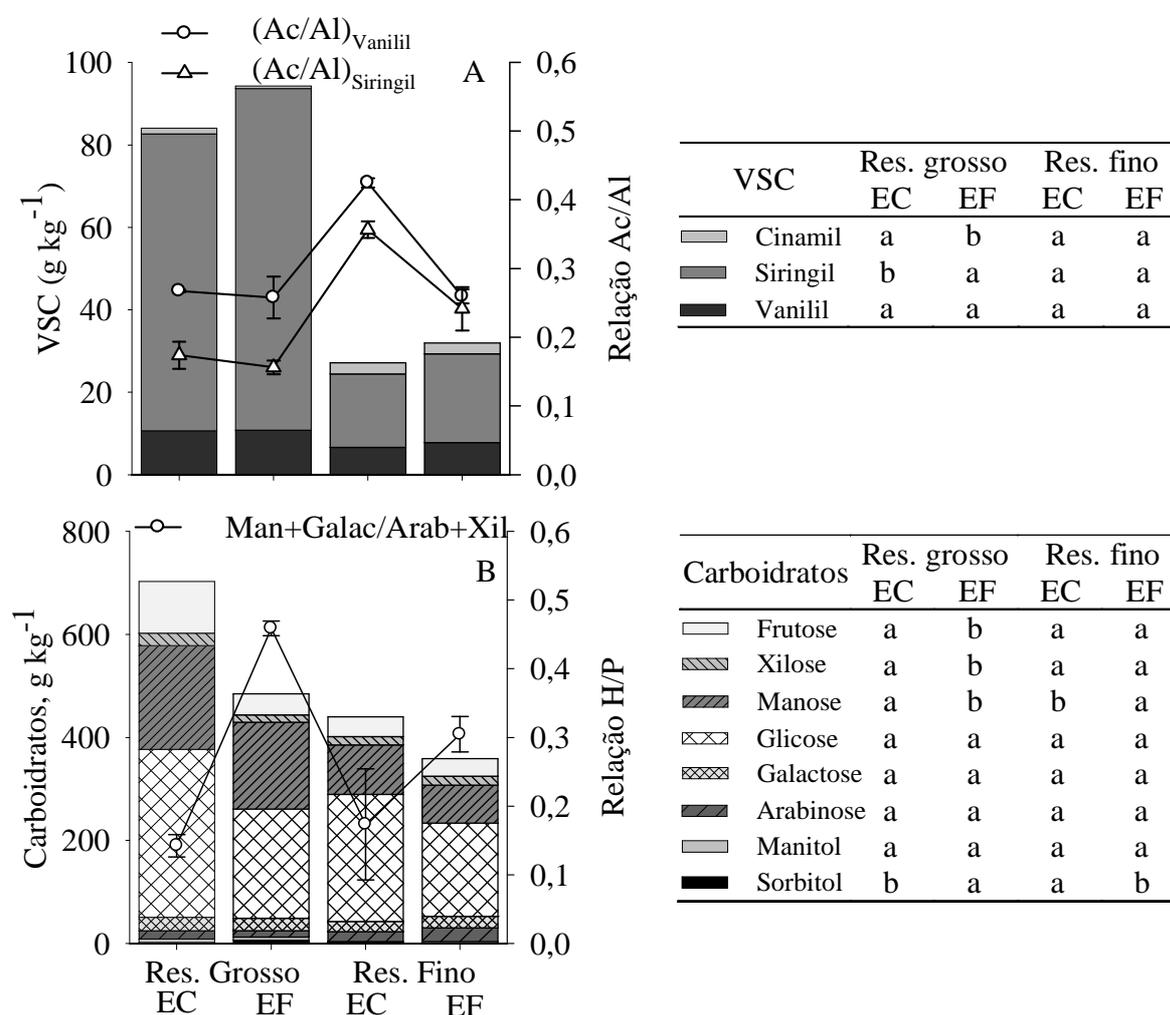


Figura 2. Teores de fenóis derivados de lignina (VSC: Vanilil, Siringil e Cinamil) e carboidratos na serapilheira (resíduos grosso - Res. grosso, e resíduos fino - Res. fino) de eucalipto convencional (EC) e fertirrigado (EF). **A:** relação de formas ácido/aldeído nos derivados vanilil e siringil; **B:** relação de Hexoses (manose+galactose)/pentoses (glucose+xilose). Nos quadros distribuídos a direita dos gráficos, letras minúsculas iguais na linha para cada resíduo, indicam não haver diferença significativa ($p > 0,05$) entre cultivos pelo teste de LSD de Fisher protegido. Linha vertical indica erro padrão da média ($n=3$).

3.5.2. Teor de fenóis derivados de lignina (VSC), carboidratos e aminoácúcares no solo

O teor médio de lignina (VSC) no solo de eucalipto foi de 11 g kg^{-1} de C (105 mg kg^{-1}). Este resultado foi similar ao obtido por Lobe et al. (2002) que encontraram

teores médios de $10,4 \text{ g kg}^{-1}$ de C (132 mg kg^{-1}) em solos arenosos de pastagem nativa na África, e inferiores ao obtido por Spielvogel et al. (2007) que obtiveram teores médios de lignina de, aproximadamente, 30 g kg^{-1} de C em horizonte superficial (Ah) de solos com 25 anos de floresta de *Picea abies* L. [Karst.]. Esses autores também obtiveram teores médios de carboidratos de 145 g kg^{-1} de C, no mesmo local. No presente estudo, os teores médios de carboidratos nos solos cultivados com eucalipto no sistema convencional e fertirrigado, com cerca de 337 g kg^{-1} de C, foram bem superiores àqueles de lignina, bem como, aos teores de carboidratos obtidos por Spielvogel et al. (2007). Possivelmente, tais diferenças resultaram do maior aporte de resíduos pelo eucalipto, uma espécie de rápido crescimento quando comparado com espécies de florestas temperadas.

A adoção da fertirrigação no solo cultivado com eucalipto causou aumento significativo ($p < 5 \%$) nos teores totais de lignina (VSC) e carboidratos e, levou a incrementos nos teores de C e N, principalmente no solo das entre-linhas de cultivo (Quadro 6), onde o aporte de resíduos do cultivo anterior foi maior. Certamente, a adição de água e nutrientes, também, parece ter induzido maior teor de lignina e carboidratos no solo das entre-linhas quando comparado àqueles do solo do cultivo convencional. Três fatores principais podem ter contribuído para ocorrência de tais resultados: o primeiro seria o maior aporte de serapilheira pelo cultivo do eucalipto fertirrigado; o segundo seria a predominância de resíduos finos (EF: 60 e EC: 40 %) (Quadro 4), que juntamente com a maior disponibilidade de água e nutrientes no solo, parecem ter favorecido o aumento da atividade decompositora de resíduos mais lábeis e a preservação dos mais lignificados. Um terceiro fator poderia ser a proliferação de raízes finas nas entre-linhas devido à maior disponibilidade de nutrientes reciclados. Combinados eles favorecem o incremento do C e N na MOS. Entretanto, no solo do eucalipto fertirrigado obteve-se menor teor de lignina (VSC) por unidade de C acumulado no solo, possivelmente, como resultado do maior aporte de resíduos menos lignificados (resíduos finos). Isso indica possível redução na recalcitrância da MOS

neste sistema, embora os teores totais de lignina tenham sido maiores. Portanto, outras formas de C que não as derivadas de lignina estão acumulando em maior proporção no solo do eucalipto fertirrigado.

Quadro 6. Teores totais de C orgânico, N, fenóis derivados de lignina (VSC), carboidratos, aminoaçúcares, relação VSC/N e C/N em solos (camada de 0-10 cm) amostrados na linha (EC_L) e entre-linhas do eucalipto convencional (EC_{EL}) e linha (EF_L) e entre-linhas do eucalipto fertirrigado (EF_{EL}) nos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo.

	EC _L	EC _{EL}	EF _L	EF _{EL}
C (g kg ⁻¹)	9,60c	6,20d	11,20b	12,80a
N (g kg ⁻¹)	0,74c	0,53c	1,04b	1,34a
C/N	12,97a	11,70ab	10,77b	9,55b
VSC (mg kg ⁻¹)	124,10a	78,40b	100,80ab	116,00a
VSC/N	0,17a	0,15a	0,10b	0,09b
Carboidratos (mg kg ⁻¹)	3120,20c	2063,00d	3847,50b	4292,50a
VSC/Carboidratos	0,04a	0,04a	0,03a	0,03a
Aminoaçúcares (mg kg ⁻¹)	307,00a	281,00a	366,10a	395,30a
VSC (g kg ⁻¹ de C)	13,10a	12,80a	9,00b	9,10b
Carboidratos (g kg ⁻¹ de C)	329,50a	337,80a	343,40a	336,60a
Aminoaçúcares (g kg ⁻¹ de C)	31,90b	45,90a	32,70b	31,10b

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si a 5 % pelo teste LSD de Fisher protegido.

O aumento da disponibilidade de água e nutrientes acelerou o crescimento do eucalipto, incrementando a deposição de matéria vegetal via serapilheira, implicando maior aporte de compostos orgânicos no solo, como os carboidratos, e reduzindo a relação VSC/N da MOS (Quadro 6), ou seja, o teor de C foi incrementado no solo do sistema fertirrigado em comparação àquele do sistema convencional, possivelmente influenciado de maneira intensa pela atividade microbiana (detalhado posteriormente). Alterações na qualidade da MOS

podem ocasionar intensificação no processo de decomposição de compostos orgânicos primários (resíduos vegetais), causando efeito “priming” positivo na MOS do solo (Fontaine et al., 2003; Fontaine et al., 2004).

Os compostos derivados da lignina apresentaram caráter mais ácido no solo do que nos resíduos de serapilheira, com predomínio dos fenóis ácidos vanílico (22 %) e siríngico (18 %). Estes grupamentos ácidos foram ligeiramente superiores no solo da entre-linhas do cultivo fertirrigado (Quadro 7), fazendo com que a relação Ac/Al nos grupamentos vanilil e siringil também fosse maior, e indicando estágio mais avançado de oxidação da lignina no sistema fertirrigado, possivelmente, em decorrência da maior atividade microbiana neste sistema.

Outros estudos também têm mostrado efeito substancial da irrigação e, ou, da fertilização nos compostos fenólicos do solo, com reflexo no teor de MOS. O acúmulo de C de grupamentos carbonil e alquil e a perda de grupamentos metoxil e O-alquil no solo, três anos após a incubação de litter de *Pinus*, identificados por meio de CPMAS ¹³C-NMR, foram maiores no sistema fertilizado e, ou, irrigado, evidenciando o incremento de 100 % na decomposição do litter no tratamento fertilizado e 62 % no irrigado, em comparação ao tratamento testemunha (sem irrigação e fertilização) Sanchez (2004). O mesmo autor relatou menor variação entre tratamentos para C de grupamentos aromáticos e fenólicos, que incluem compostos lignificados mais resistentes à decomposição, o que sugere maior estabilidade destes compostos no solo. Sjöberg et al. (2004), ao avaliarem, por 559 dias, os estádios de decomposição do litter de *Picea abies* (L.) Karst. com adição anual de 100 kg ha⁻¹ de N ((NH₄)₂SO₄) por nove anos, observaram a rápida decomposição da celulose no litter que recebeu adubação nitrogenada em comparação ao tratamento sem adição de N, mas não verificaram claramente maior estabilização da lignina no solo e recalcitrância da MOS determinadas pelos métodos de oxidação alcalina (CuO), Klason e por espectroscopia (CPMAS ¹³C-NMR). E, em cultivos anuais manejados em rotação (soja-trigo), a adição de

fertilizantes (NPK mais esterco de curral e NPK mais calagem) contribuiu substancialmente para o aumento da atividade microbiana do solo, refletindo em incremento no teor de C e de N da biomassa microbiana, e carboidratos hidrolisáveis em H₂SO₄ 1,5 mol L⁻¹ (Manna et al., 2007).

Quadro 7. Teores médios de fenóis derivados de lignina nos solo cultivados com eucalipto na linha (EC_L) e entre-linhas do sistema convencional (EC_{EL}) e linha (EF_L) e entre-linhas do sistema fertirrigado (EF_{EL}). Valores entre parênteses indicam a percentagem de fenóis derivados de lignina em relação ao total (VSC).

Cultivo	AG	AL	SG	VL	AS	AV	AF	AC	VSC
	-----mg kg ⁻¹ -----								
EC _L	9,9a	19,4a	17,7a	9,4a	21,8ab	23,8ab	13,1a	8,9a	124,1
EC _{EL}	7,5b	13,0b	12,7a	6,2a	15,3bc	13,9b	4,9b	4,9b	78,4
EF _L	6,4b	13,1b	12,8a	7,1a	14,6c	23,1ab	13,3a	10,3a	100,8
EF _{EL}	10,6a	12,8b	13,6a	7,5a	22,12a	29,9a	12,4a	7,1ab	116,0
CV (%)	9,7	12,9	16,4	21,8	12,9	18,2	12,8	15,4	8,1
Média	8,6(8)	14,6(14)	14,2(14)	7,6(7)	18,5(18)	22,7(22)	10,9(10)	7,8(7)	104,8

AG: acetosiringona; AL: acetovanilona; SG: siringaldeido; VL: vanilina; AS: ácido siríngico; AV: ácido vanílico; AF: ácido ferúlico e AC: ácido p-coumárico. Médias seguidas da mesma letra minúscula, nas colunas não diferem entre si a 5 % pelo teste LSD de Fisher protegido. CV: coeficiente de variação.

Um forte indicativo do aumento da atividade microbiana no solo é o incremento dos carboidratos de origem microbiana (manose e galactose) em relação àqueles de origem vegetal (arabinose e xilose, entre outros). Neste sentido, obtiveram-se maiores teores de manose e galactose no solo das entre-linhas do eucalipto fertirrigado e, conseqüentemente, a relação de hexoses/pentoses (H/P) também foi maior neste solo em comparação ao solo da linha do cultivo fertirrigado e daquele das entre-linhas do cultivo convencional (Figura 3). O diferencial para essa condição parece ter sido a maior oferta de substrato nas entre-linhas,

aliada à adição de água e fertilizantes, incrementando, ao longo do tempo, a atividade microbiana e a presença de carboidratos dela derivados.

O teor médio de aminoaçúcares no solo de eucalipto convencional e fertirrigado foi de 35 mg kg⁻¹ de C. Comparativamente a outros estudos, o teor de aminoaçúcares foi ligeiramente inferior ao obtido na camada de 0-10 cm de solos de florestas primárias, secundárias, reflorestamentos (20 anos de *Pinus kesiya*) e 15 anos de cultivos de hortaliças, que variaram de 40 a 80 mg kg⁻¹ de C (Möller et al., 2002). Estes teores no solo podem sofrer modificações de acordo com o tipo de vegetação predominante no ecossistema. Em solos cultivados por três e quinze anos com milho e feijão, obtiveram-se menores teores de aminoaçúcares, com 40 e 36 mg kg⁻¹ de C, respectivamente, do que solos de florestas nativas (71 mg kg⁻¹ de C) e de florestas degradadas (53 mg kg⁻¹ de C) pelo cultivo de acácia para produção de carvão (Solomon et al., 2001). Já a relação glucosamina/ácido murâmico foi aumentada de 14 no solo de floresta nativa para 26 no solo cultivado, indicando aumento da atividade fúngica comparado com a bacteriana (Solomon et al., 2001).

O teor de aminoaçúcares totais no solo não diferiu entre tratamentos ($p > 0,05$), mas o solo da linha de eucalipto fertirrigado foi 19 % superior ao da linha do eucalipto convencional, e o das entre-linhas do solo fertirrigado foi 40 % superior ao teor de aminoaçúcares obtido naquela do cultivo convencional. Entre os compostos originados da atividade microbiana, destacou-se apenas o maior teor de ácido murâmico no solo da linha do povoamento de eucalipto com manejo convencional (Figura 3).

Juntamente com o incremento dos carboidratos de origem microbiana das entre-linhas no solo do eucalipto fertirrigado, obteve-se aumento da relação glucosamina/ácido murâmico (Gluc/Ac. Mur) no solo fertirrigado a valores próximos a 48, bem superiores aos obtidos no solo da linha do eucalipto cultivado no sistema convencional, igual a 20 (Figura 3). Tais resultados podem indicar maior contribuição da comunidade fúngica na produção de aminoaçúcares. Mas cabe salientar que a presença de actinomicetos e bactérias podem ter

auxiliado, em menor proporção, para tal resultado, já que estudo realizado por Glaser et al. (2004) também indicou a presença de glucosamina em isolados de origem bacteriana e de actinomicetos no solo, diferentemente, do ácido murâmico que foi encontrado somente em isolados de bactérias. Como o teor de glucosamina foi similar entre os cultivos, a relação glucosamina/ácido murâmico mais estreita no solo do sistema convencional (20) indica a maior contribuição bacteriana no processo de decomposição e formação da MOS do que no solo do sistema fertirrigado. A glucosamina foi o aminoaçúcar mais abundante para ambos os solos sob eucalipto, possivelmente devido a ampla origem entre grupos de microrganismos, ou maior atividade fúngica.

A faixa de valores médios da relação glucosamina/galactosamina (gluc/galac) nos solos de eucalipto (fertirrigado e convencional) foi bem inferior (1,7-2,5) àquela obtida entre glucosamina/ácido murâmico (20-48). Além disso, não se encontraram resultados concordantes com a relação de glucosamina/ácido murâmico. O estreitamento da relação glucosamina/galactosamina em comparação a de glucosamina/ácido murâmico pode ser indicativo da menor estabilidade do ácido murâmico no solo, em comparação a galactosamina. Além disso, o maior teor de galactosamina no solo pode ser justificado pela sua estabilização preferencial, ou ainda pelo aumento do tipo de microrganismos produtores, uma vez que não somente as bactérias podem dar origem a galactosamina (Zhang et al., 1998; Amelung et al., 1999), e uma fração minoritária pode ser produzida por fungos (Solomon et al., 2002). Cabe destacar que as duas relações podem ser adotadas como indicativos da produção de aminoaçúcares pela comunidade microbiana no solo devido aos diferentes resultados que estas imprimem numa condição semelhante de ambiente (Solomon et al. 2002; Liang et al., 2007).

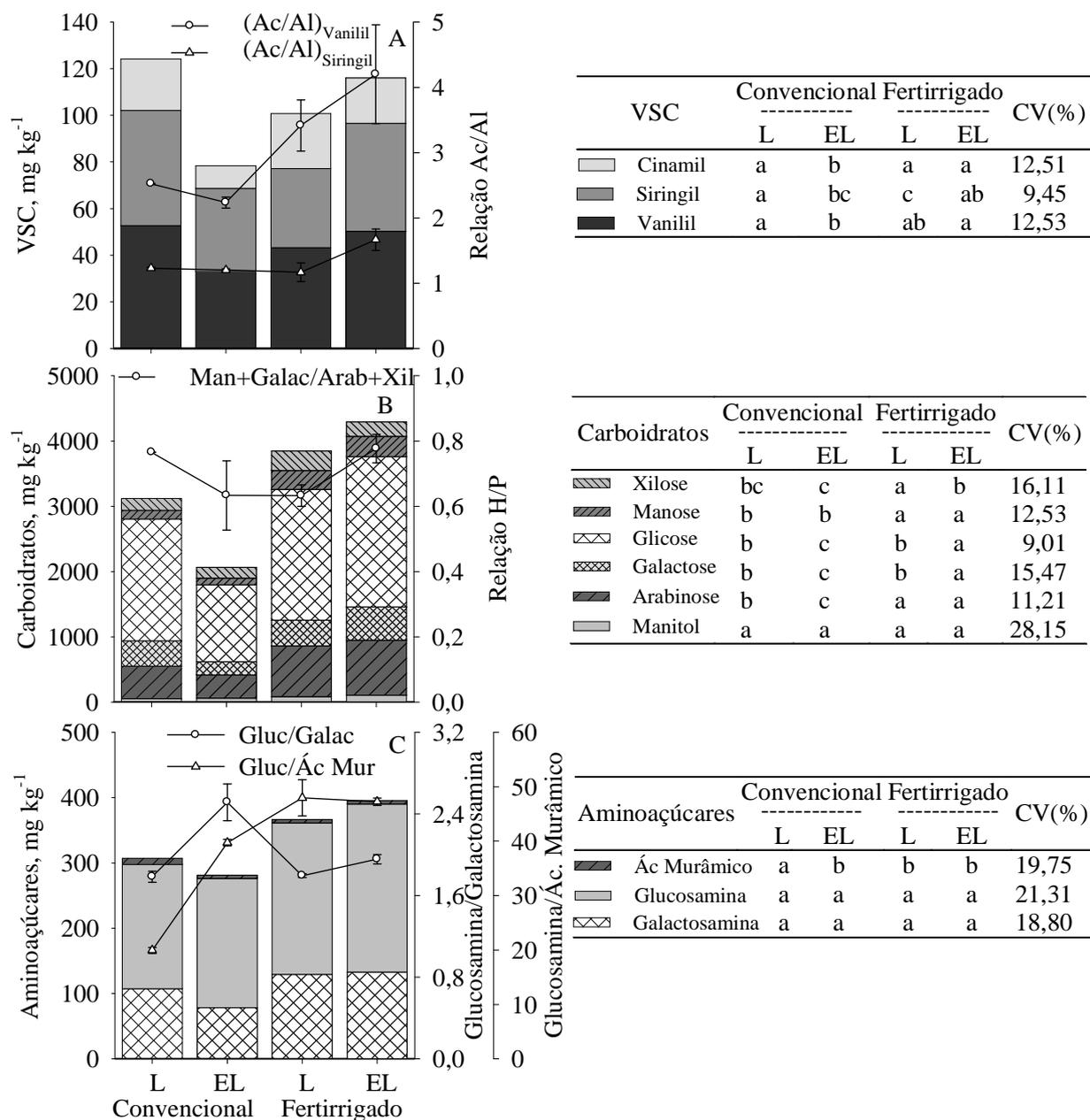


Figura 3. Teores de fenóis derivados de lignina (VSC: Vanilil, Siringil e Cinamil), carboidratos e aminoaçúcares em amostras de solo (camada de 0-10 cm) coletadas na linha (L) e entre-linhas (EL) do eucalipto convencional ou eucalipto fertirrigado. **A:** relação ácido/aldeído nos derivados de vanilil e siringil; **B:** relação Hexoses (manose+galactose)/pentoses (glucose+xilose) (H/P) e, **C:** aminoaçúcares derivados da atividade fúngica (glucosamina e galactosamina) em relação a bacteriana (ácido murâmico). Nos quadros distribuídos a direita dos gráficos com letras minúsculas iguais na linha indicam não haver diferença significativa ($p > 0,05$) entre cultivos pelo teste de LSD de Fisher protegido. CV (%): coeficiente de variação. Linha vertical indica erro padrão da média ($n=3$).

Essas alterações na comunidade microbiana do solo têm implicações diretas no processo de humificação da MOS e na agregação do solo. Acredita-se que a maior atividade fúngica, por meio de extensa rede de hifas, possa favorecer a agregação de partículas de solo com compostos orgânicos, além de apresentarem biomassa com parede celular rica em melanina e quitina, polímeros muito mais resistente à degradação do que fosfolipídeos (ricos em energia), principais constituintes da biomassa bacteriana (Bailey et al., 2002). Esta estocagem resulta em compostos mais resistentes à decomposição realizada por fungos e mais lábeis quando realizada em maior proporção por bactérias (Bailey et al., 2002).

3.6. CONCLUSÕES

O cultivo de eucalipto fertirrigado aporta maior matéria seca na serapilheira, mantém o teor de lignina e reduz o de carboidratos em comparação a serapilheira do cultivo convencional.

A maior adição de água e nutrientes (sistema fertirrigado) incrementa a presença de carboidratos totais, lignina e aminoaçúcares, principalmente nas entre-linhas de cultivo, além de aumentar a relação Ac/Al nos grupamentos vanilil e siringil, indicando estágio mais avançado de oxidação da lignina no sistema fertirrigado, e aumento da presença de compostos originários da atividade microbiana no solo.

O solo cultivado do sistema fertirrigado tem maior relação glucosamina/ácido murâmico, o que indica maior contribuição de aminoaçúcares originados da atividade fúngica em relação à bacteriana, quando comparado com àquele do sistema convencional.

3.7 LITERATURA CITADA

- AMELUNG, W.; FLACH, K.W. & ZECH, W. Neutral and acidic sugars in particle-size fractions as influenced by climate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:865-873, 1999.
- BAILEY, V.L.; SMITH, J.L. & BOLTON, H.J. Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration. *Soil Biol. Biochem.*, 34:997-1007, 2002.

- CARREIRO, M.M.; SINSABAUGH, R.L.; REPERT, D.A. & PARKHURST, D.F. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology*, 81:2359-2365, 2000.
- CONTI, M.E.; ARRIGO, N.M. & MARELLI, H.J. Relationship of soil carbon light fraction, microbial activity, humic acid production and nitrogen fertilization in the decaying process of corn stubble. *Biol. Fert. Soils*, 25:75-78, 1997.
- FONTAINE, S.; BARDOUX, G.; ABBADIE, L. & MARIOTTI, A. Carbon input to soil may decrease soil carbon content. *Ecol. Letters*, 7: 314-320, 2004.
- FONTAINE, S.; MARIOTTI, A. & ABBADIE, L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biol. Biochem.*, 35:837-843, 2003.
- FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J. & COWIE, A.L. Carbon allocation in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. *For. Ecol. Manag.* 233:275-284, 2006.
- FUNARBE. SAEG-Sistema para análises estatísticas. v. 9.0. Viçosa-MG, 2005.
- GLASER, B.; TURRIÓN, M. & ALEF., K. Amino sugars and muramic acid-biomarkers for soil microbial community structure analysis. *Soil Biol. Biochem.*, 36:399-407, 2004.
- HEIM, A. & SCHMIDT, M.W.I. Lignin turnover in arable soil and grassland analysed with two different labelling approaches. *Europ. J. Soil Sci.*, 58:599-608, 2007.
- KÖGEL-KNABNER, I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.*, 34: 139-162, 2002.
- LEGGET, Z.H. & KELING, D.L. Fertilization effects on carbon pools in loblolly pine plantations on two upland sites. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:279-286, 2006.
- 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.

- LI, Y.; XU, M. & ZOU, X. Effects of nutrient additions on ecosystem carbon cycle in a Puerto Rican tropical wet forest. *Global Change Biol.*, 12:284-293, 2006.
- LIANG, C.; ZHANG, X.; RUBERT IV, K.F. & BALSER, T.C. Effect of plant materials on microbial transformation of amino sugars in three soil microcosms. *Biol. Fertil. Soils*, 43:631-639, 2007.
- LOBE, I.; DU PREEZ, C.C. & AMELUNG, W. Influence of prolonged arable cropping on lignin compounds in sandy soils of the South African Highveld. *Europ. J. Soil Sci.*, 53:553-562, 2002.
- MADEIRA, M.V.; FABIÃO, A.; PEREIRA, J.S.; ARAÚJO, M.C. & RIBEIRO, C. Changes in carbon stocks in *Eucalyptus globulus* Labill. plantations induced by different water and nutrient availability. *For. Ecol. Manag.*, 171:75-85, 2002.
- MANNA, M.C.; SWARUP, A.; WANJARI, R.H.; MISHRA, B. & SHAHI, D.K. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil Till. Res.*, 94:397-409, 2007.
- MÖLLER, A.; KAISER, K. & ZECH, W. Lignin, carbohydrate, and amino sugar distribution and transformation in the tropical highland soils of northern Thailand under cabbage cultivation, *Pinus* reforestation, secondary forest, and primary forest. *Austr. J. Soil Res.*, 40:977-998, 2002.
- NEFF, J.C.; TOWNSEND, A.R.; GLEIXNER, G.; LEHMAN, S.J.; TURNBULL, J. & BOWMAN, W.D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature*, 419:915-917, 2002.
- OMETTO, J.C. *Bioclimatologia vegetal*. São Paulo, Ceres, 1981. 425p.
- OTTO, A. & SIMPSON, M.J. Evaluation of CuO oxidation parameters for determining the source and stage of lignin degradation in soil. *Biogeochemistry*, 80:121-142, 2006.
- SANCHEZ, F.G. Irrigation, fertilization and initial substrate quality effects on decomposing Loblolly pine litter chemistry. *Plant Soil*, 270:113-122, 2004.

- SJÖBERG, G.; NILSSON, S.I.; PERSSON, T. & KARLSSON, P. Degradation of hemicellulose, cellulose and lignin in decomposing spruce needle litter in relation to N. *Soil Biol. Biochem.*, 36:1761-1768, 2004.
- SOLOMON, D.; FRITZSCHE, F.; TEKALIGN, M.; LEHMANN, J. & ZECH, W. Soil Organic Matter Composition in the Subhumid Ethiopian Highlands as Influenced by Deforestation and Agricultural Management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66:68-82, 2002.
- SOLOMON, D.; LEHMANN, J. & ZECH, W. Land use effects on amino sugar signature of chromic Luvisol in the semi-arid part of northern Tanzania. *Biol. Fertil. Soils*, 33:33-40, 2001.
- SPIELVOGEL, S.; PRIETZEL, J. & KÖGEL-KNABNER, I. Changes of lignin phenols and neutral sugars in different soil types of a high-elevation forest ecosystem 25 years after forest dieback. *Soil Biol. Biochem.*, 39:655-668, 2007.
- STAPE, J.L.; RYAN, M. & BINKLEY, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. *For. Ecol. Manage.*, 193:219-234, 2004.
- STAPE, J.L.; GOMES, A.N. & ASSIS, T.F., Estimativa da produtividade de povoamentos monoclonais de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* no Nordeste do Estado da Bahia-Brasil em função das variabilidades pluviométrica e edáfica. In: Proceedings of the IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalypts. EMBRAPA/CNPF, Salvador, 1997, pp. 192–198.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. & DICKEY, D.A. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. New York: McGraw-Hill, 1997. 666p.
- ZHANG, X.; AMELUNG, W.; YUAN, Y. & ZECH, W. Amino sugar signatures of particle size fractions in soils of the native prairie as affected by climate. *Soil Sci.*, 163:220-229, 1998.

ZINN, Y.L.; RESCK, D.V.S. & SILVA, J.E. Soil organic carbon as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the Cerrado region of Brazil. For. Ecol. Manag., 166:285-294, 2002.

CAPÍTULO IV

BIOMARCADORES DERIVADOS DE PLANTA E DE MICRORGANISMOS EM SOLOS DE TABULEIROS COSTEIROS SOB USOS FLORESTAIS DISTINTOS

4.1. RESUMO

O tipo de cultivos florestais, como o eucalipto e a acácia, e a duração da rotação podem levar a alterações na deposição de resíduos no seu processo de decomposição, e na formação da matéria orgânica do solo (MOS), principalmente por alterar a qualidade dos compostos orgânicos e modificar a atividade e a diversidade microbiana. Neste sentido, o presente estudo teve o objetivo de avaliar as alterações causadas pelo cultivo do eucalipto de rotação curta (sete anos) em biomarcadores, tais como: fenóis derivados de lignina, carboidratos e aminoaçúcares visando acessar o estágio de decomposição e a contribuição de compostos de origem vegetal e microbiana para a MOS em solos do litoral norte do Espírito do Santo. Para efeito de comparação também foram coletados solos sob cultivo de acácia (*Acacia mangium*) cultivado em rotação com eucalipto, eucalipto de rotação longa (24 anos), mata nativa (Mata Atlântica). Os resultados indicaram que o manejo do cultivo florestal com rotação de cultura eucalipto-acácia e o aumento do tempo de rotação (24 anos) favoreceram o estreitamento das relações lignina/N e C/N e contribuíram para a melhoria das características bioquímicas do solo (> teor de carboidratos e aminoaçúcares) em comparação ao monocultivo de eucalipto de rotação curta (sete anos). Nos solos cultivados com eucalipto a maior relação hexoses/pentoses (H/P) indicou maior contribuição de componentes de origem vegetal para a MOS que aqueles de origem microbiana em comparação aos solos sob mata nativa e acácia. A menor relação ácidos/aldeídos (Ac/Al) dos fenóis derivados de lignina no solo cultivado com eucalipto (de curta e longa rotação) indica que a MOS encontra-se em estágio menos avançado de decomposição do que no solo cultivado com acácia, e naquele de mata nativa. Nos solos de mata nativa e de acácia a menor relação glucosamina/ácido murâmico sugere

maior participação de bactérias na comunidade microbiana, enquanto nas áreas de eucalipto houve mais abundância de compostos derivados de fungos.

PLANT-AND MICROBIAL-DERIVED BIOMARKERS IN COASTAL PLAIN SOILS UNDER DISTINCT FOREST USER

4.2. ABSTRACT

The type of forest species such as eucalyptus and acacia, and the rotation length can lead to changes in the deposition and decomposition rates of plant residues, as well as the formation of soil organic matter (SOM), especially by changing the quality of organic compounds and modifying microbial activity and diversity. Therefore, the present study was carried out to evaluate the changes caused by the cultivation of short-rotation eucalyptus (7 years) in biomarkers, such as lignin-derived phenols, carbohydrates and amino sugars as an attempt access the stage of decomposition and the contribution of plant and microbial compounds of microbial origin for SOM in Coastal Plain soils with those purchased. For comparison purposes it was also evaluated soils under cultivation of acacia (*Acacia mangium*), long-rotation eucalyptus and native vegetation (Atlantic Forest). The results indicated that planting acacia (in rotation with eucalypt), increasing the eucalyptus rotation length (24 years) favored the narrowing of lignin / N and C / N ratios, and contributed to the improvement of the biochemical characteristics of the soil in comparison the short-rotation eucalyptus monoculture. Therefore, the soil continuously grown with short-rotation eucalyptus showed a greater contribution of components of plant origin than those of microbial origin as compared to the soils under native forest and acacia. The smallest Ac / Al ratio of phenol derived from lignin in soils cultivated with eucalyptus (in long and short-rotation) indicates that the SOM is in a less advanced stage of decomposition (oxidation) than in the soil cultivated with acacia, and that under native forest. In the soils under native

vegetation and acacia the smaller glucosamine/muramic acid ratio suggested a greater contribution of bacteria in SOM cycling, whereas in the eucalyptus soils there was greater abundance of fungi-derived compounds.

4.3. INTRODUÇÃO

A manutenção do estoque de C no solo de cultivos florestais tem sido preocupação constante de empresas, produtores e pesquisadores brasileiros, especialmente em cultivos extensivos de eucalipto, devido à menor qualidade dos resíduos da colheita depositos no solo, a intensificação das práticas culturais e o encurtamento do tempo das rotações. Técnicas silviculturais, como o cultivo de acácia (*Acacia mearnsii*), uma leguminosa que fixa N₂ atmosférico, em consórcio com o eucalipto têm demonstrado maior eficácia em aumentar C e N no solo, possivelmente por estreitar a relação C:N e lignina:N, aumentar a labilidade do litter e favorecer a estabilização da MOS nativa (Forrester et al., 2006).

Tipos distintos de resíduos vegetais depositado no solo alteram a quantidade e a qualidade de compostos orgânicos derivados de plantas e microrganismos no solo (Möller et al., 2002). Estima-se que o incremento de compostos orgânicos derivados da atividade microbiana no solo favoreça a formação de complexos organo-minerais, a agregação do solo e o aumento do tempo de residência do C na MOS (Simpson et al., 2004; Bailey et al., 2002). Indicadores da contribuição vegetal e microbiana para a origem da MOS podem ser estimados pela presença de açúcares derivados de plantas, especialmente polímeros de pentoses (arabinose (ara) + xilose (xil)) e, pelos polímeros de hexoses (galactose (gal) + manose (man)), sintetizados pelos microrganismos do solo (Oades, 1984; Amelung et al., 1999). Ainda, pode-se identificar a origem microbiana do substrato pela presença dos aminoaçúcares glucosamina, derivados tipicamente da atividade fúngica, do ácido murâmico e da galactosamina, derivados da atividade bacteriana (Zhang et al., 1998; Solomon et al., 2002; Möller et al., 2002; Simpson et al., 2004; Glaser et al., 2004). Assim, é possível se estabelecer

relações (ex. glucosamina : ácido murâmico) que podem servir como indicadores da contribuição relativa fúngica e bacteriana para a MOS (Zhang et al., 1998; Amelung et al., 1999; Liang et al., 2007).

Resíduos de plantas florestais têm consideráveis teores de lignina na parede celular (Kögel-Knabner, 2002; Suhas & Carrott, 2007). A lignina é considerada o componente do litter com menor taxa de decomposição devido a maior complexidade estrutural (Heim & Schmidt, 2007), e apresenta significativa contribuição para o compartimento de C estável no solo (Stevenson, 1994; Berg, 2000; Rasse et al., 2006). Um dos nutrientes que mais interfere no processo de estabilização do C em formas aromáticas/lignina no solo é o N. O cultivo de espécies florestais fixadoras de N₂, como a acácia, em consórcio com o eucalipto contribui para o incremento de N no solo (Garay et al., 2004), o que pode reduzir a habilidade competitiva de fungos que são responsáveis pela decomposição da lignina (Fog, 1998), suprimir a formação de enzimas que fazem sua quebra (Carreiro et al., 2000) e, reagir com resíduos de lignina (e outros compostos fenólicos) formando complexos de alta resistência à degradação microbiana (Stevenson, 1994). Conseqüentemente, resíduos de planta (litter) com alto teor de lignina podem aumentar a formação e estabilização de C em formas mais recalcitrantes no solo em resposta à maior presença de N. Isso têm implicações importantes, pois aumenta o seqüestro de C, mas pode reduzir a disponibilidade de N (Olk et al., 2004). O grau de oxidação/alteração da lignina, e, conseqüentemente, sua estabilização podem ser identificados pela abundância de grupamentos ácidos e aldeídos no solo (relação Ac/Al), sendo o estado de degradação/oxidação proporcional ao valor obtido para a relação Ac/Al dos grupamentos siringil e vanilil (Otto & Simpson, 2006).

O presente estudo teve o objetivo de avaliar as alterações causadas pelo cultivo do eucalipto de rotação curta (sete anos): nos teores de fenóis derivados de lignina, carboidratos e aminoaçúcares, estágio de decomposição da MOS; e na contribuição de compostos de origem microbiana para o conteúdo de MOS em solos do litoral norte do Espírito do Santo. Para

efeito de comparação também foram avaliados solos sob cultivo de acácia em rotação com eucalipto, vegetação nativa (Mata Atlântica) e eucalipto de rotação longa (24 anos).

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido com amostras de solo do município de Aracruz-ES, localizadas a 19° 48' S e 40° 17' W, onde foram selecionadas condições onde se cultivava o eucalipto e, ao lado, existiam manejos e usos alternativos do solo, que foram:

- Floresta nativa (Mata Atlântica);
- Eucalipto de rotação longa (24 anos);
- Acácia (*Acacia mangium*, 14 anos);
- Eucalipto de rotação curta (sete anos).

Até a época da coleta das amostras de solo as áreas (talhões) de eucalipto de rotação curta (E7) selecionadas já tinham sido cultivadas por 28 anos (quatro rotações) com esta cultura (Quadros 1 e 2). O clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen (Ometto, 1981), com temperatura e precipitação pluvial média anual de 23 °C e 1.400 mm ano⁻¹, respectivamente. O local representa uma microbacia típica da região dos Tabuleiros Costeiros. O solo foi caracterizado como Argissolo Amarelo fase floresta tropical subperenifólia textura média sobre argilosa, derivado do grupo Barreiras.

Previamente ao último plantio de eucalipto, o solo foi preparado mediante gradagem (“bedding”), em que os resíduos da colheita são enterrados no solo na direção da linha de cepas (tocos) do cultivo anterior (Figura 1) e, em seguida, foi coveado, plantado e fertilizado manualmente com 100 g cova⁻¹ de adubo formulado NPK 6-30-6.

Quadro 1. Histórico de uso da área experimental de mata nativa (MN), povoamento de eucalipto com 24 anos (E24), acácia em rotação com eucalipto (A) e monocultivo de eucalipto (E7).

Uso	Anos						
	até 1950	1951-1963	1964-1971	1972-1979	1980-1987	1988-1995	1996-2004
MN				Mata nativa			
E24	Mata nativa	Pastagem		Eucalipto		Eucalipto 24 anos	
A	Mata nativa	Pastagem		Eucalipto	Eucalipto		Acácia
E7	Mata nativa	Pastagem		Eucalipto	Eucalipto	Eucalipto	Eucalipto

Quadro 2. Características da área experimental de mata nativa (MN), povoamento de eucalipto de rotação longa com 24 anos (E24), acácia em rotação com eucalipto (A) e monocultivo de eucalipto de curta rotação (E7).

Tratamentos	Idade ¹	Coleta	Área	Topografia	Produtividade
	ano		ha		m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹
MN	-	Área total	-	Plana	-
E24	24,0	Entre-linhas	38,9	Plana	38,0
A	14,0	Entre-linhas	22,2	Plana	31,4
E7	7,6	Entre-linhas	22,2	Plana	32,2

¹, idade das plantas no momento da coleta das amostras de solo.

O último plantio de eucalipto de rotação curta foi realizado em 1998 (Quadro 1), com plantas provenientes de híbridos clonais de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, cultivados em sistema de reforma e, espaçamento entre plantas de 3 x 3 m. Após 90 dias do plantio, as plantas do tratamento convencional receberam 350 kg ha⁻¹ de fosfato natural e, no final do primeiro ano, mais 160 kg ha⁻¹ de NPK 6-30-6.

O talhão de E24 foi desbastado ao longo dos anos até chegar ao espaçamento atual de 9 x 9 m. Nesse povoamento, há um sub-bosque que é controlado, freqüentemente, por meio de roçada manual. O plantio das mudas de *Acacia mangium* em rotação com eucalipto foi realizado após o corte do eucalipto no ano de 1987, em área já cultivada com eucalipto por

duas rotações, com manejo de adubação semelhante ao adotado para o monocultivo de eucalipto de rotação curta.

Nessas áreas com diferentes tipos de uso (Quadro 1), foram selecionados talhões, e coletadas amostras, na linha de plantio, no solo de E24, E7 e acácia e, em área total na mata nativa. Foram coletadas três amostras compostas de solo (quatro sub-amostras) na profundidade de 0-10 cm. Em cada talhão, também foram coletadas amostras indeformadas com anéis volumétricos para se estimar a densidade aparente do solo.

As amostras de solo foram coletadas na época chuvosa (janeiro/fevereiro) e os povoamentos de eucalipto (exceto o eucalipto em rotação longa - E24) estavam no final da rotação (seis a sete anos). A acácia com 14 anos. Depois de coletadas, as amostras de solo foram imediatamente secadas ao ar, destorroadas, passadas em peneira com malha de 2 mm, homogêneas e sub-amostras foram retiradas para caracterização física e química (Quadro 3).

Quadro 3. Características químicas e físicas dos solos de mata nativa (MN), povoamento de eucalipto de rotação longa com - 24 anos (E24), acácia em rotação com eucalipto (A) e monocultivo de eucalipto de rotação curta (E7).

Cultura	¹ pH	² Ca ²⁺	² Mg ²⁺	³ H+Al	⁴ P	⁴ K	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Dens.
		-----cmol _c dm ⁻³ -----			---mg dm ⁻³ ---		-----%-----				kg dm ⁻³
MN	4,4	0,52	0,31	0,89	3,4	32	57	15	5	23	1,4
E24	4,8	0,84	0,36	0,68	2,3	21	53	16	4	27	1,4
A	4,5	1,07	0,29	0,58	5,7	35	51	16	5	28	1,4
E7	4,7	0,98	0,19	2,90	4,2	19	53	19	3	25	1,5

¹, pH em H₂O, ², Extrator: KCl – 1 mol L⁻¹, ³, Extrator: Acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ – pH 7,0; ⁴, Extrator: Mehlich 1.

A serapilheira na superfície do solo foi amostrada no momento da coleta das amostras de solo da seguinte forma: dentro de cada área dos tratamentos selecionados foram identificados quatro pontos aleatoriamente, lançando-se um gabarito com 0,25 m² de área (0,5 x 0,5 m). A serapilheira coletada era composta por galhos, cascas e folhas do eucalipto. No

eucalipto de curta rotação e na acácia a coleta foi feita imediatamente após o corte das árvores, ao final da rotação. Após a coleta, as amostras de serapilheira foram secadas em estufa (65 °C por 72 h) para determinação da matéria seca e caracterização bioquímica.

Nas amostras de solo e serapilheira efetuaram-se análises de C orgânico total (COT), N total (NT), teores de fenóis derivados de lignina (VSC) e carboidratos, além de aminoácidos derivados da atividade microbiana no solo. Os métodos utilizados nessas análises foram descritos no capítulo II, itens 2.4.1 a 2.4.4.

Os resultados foram analisados no programa estatístico SAEG 9.0 (FUNARBE, 2005). As médias dos tratamentos foram comparadas por meio do teste de LSD de Fisher ($p < 5\%$) protegido (Steel et al., 1997), ou seja, foram realizadas comparações múltiplas apenas quando o teste de F da análise de variância foi significativo ($p < 5\%$).

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1. Teores de fenóis derivados de lignina (VSC) e carboidratos na serapilheira

Os estoques de matéria seca na serapilheira foram maiores no povoamento de eucalipto de rotação curta (sete anos) e no cultivo de acácia, principalmente pelo aporte de resíduos da colheita, que não foi realizada nos outros dois ecossistemas (mata nativa e eucalipto de rotação longa - 24 anos) (Quadro 4). Com a colheita das árvores maior proporção de resíduos grossos (RG) foi alocada na serapilheira no cultivo de eucalipto de rotação curta e da acácia (eucalipto: 71 % e acácia: 64 % de RG), resíduos ricos em celulose, hemicelulose e compostos lignificados (Fonte & Schowalter, 2004; Mendham et al., 2004; Lemma et al., 2007). Mas, somente a serapilheira de eucalipto de rotação curta teve maior teor de lignina (VSC) e carboidratos por unidade de C estocada e de lignina por unidade de massa de serapilheira, indicando maior recalcitrância desta serapilheira em comparação àquela de acácia, que teve os menores teores de lignina e carboidratos. A serapilheira da mata nativa e eucalipto de rotação longa apresentaram teores intermediários destes compostos.

As relações VSC/N e C/N podem caracterizar bem a qualidade de cada serapilheira; naquelas de eucalipto de rotação curta e longa obtiveram-se valores médios de 10,2 (VSC/N) e 81,2 (C/N), e na serapilheira de mata nativa e acácia estes valores foram mais estreitos e iguais a 3,8 (VSC/N) e 46,9 (C/N). A determinação da relação VSC/N e C/N em resíduos vegetais da serapilheira e na matéria orgânica no solo é importante para auxiliar na identificação da potencial taxa de ciclagem de C no solo, pois o decréscimo na relação VSC/N acelera o processo de decomposição de C nestes (Möller et al., 2002).

Quadro 4. Estoque de matéria seca total (MS) e percentagem de resíduos grossos-RG (galhos grossos) e resíduos finos-RF (folhas+galhos finos+casca), teores médios de carboidratos totais, fenóis derivados de lignina (VSC), relação ácido/aldeído de grupamentos vanilil (Ac/Al)_v e siringil (Ac/Al)_s, e relação hexoses para pentoses (H/P) na serapilheira de mata nativa (MN), eucalipto de rotação longa (E24), acácia (A) e eucalipto de rotação curta (E7) dos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo.

Característica	MN	E24	A ¹	E7 ¹
MS (t ha ⁻¹)	6,03d	12,37c	26,19b	66,86a
RG (%)	14,00c	32,00b	64,00a	71,00a
RF (%)	86,00a	68,00b	36,00c	29,00c
C (dag kg ⁻¹)	48,56a	48,85a	48,35a	46,91a
N (dag kg ⁻¹)	1,32a	0,58b	1,13a	0,60b
C/N	36,79b	84,22a	42,79b	78,18a
VSC (g kg ⁻¹)	51,60b	51,60b	42,30b	69,20a
VSC/N	3,90b	8,90a	3,74b	7,81a
Carboidratos (g kg ⁻¹)	520,50a	507,00a	399,24b	560,03a
VSC/Carboidratos	0,10a	0,10a	0,11a	0,12a
VSC (g kg ⁻¹ de C)	106,26b	105,63b	87,49b	132,59a
Carboidratos (g kg ⁻¹ de C)	1071,87a	1037,87a	825,73b	1193,83a
(Ac/Al) _v	0,29a	0,27a	0,31a	0,25a
(Ac/Al) _s	0,23a	0,20a	0,28a	0,18a
H/P	0,32a	0,28a	0,30a	0,16a

Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si a 5% pelo teste LSD de Fisher protegido. ¹ incluem resíduos da última colheita.

O litter de cultivos de *Eucalyptus urophylla* (quatro a cinco anos de idade) teve perda de matéria seca mais lenta no processo de decomposição testado em “litterbags” do que resíduos de florestas primárias (*Bertholettia excelsa*) e secundárias (*Bellucia* spp. and *Vismia* spp.) da Amazônia (Barlow et al., 2007). Possivelmente, a menor qualidade do litter de

eucalipto, definida pela maior relação C/N, lignina/N (Reversat & Schwartz, 1997; Rovira & Vallejo, 2002; Möller et al., 2002), lignina/carboidratos (Lemma et al., 2007) e menor teor de nutrientes (principalmente N) em comparação a cultivos de espécies fixadoras de N₂ (Forrester et al., 2006) e florestas nativas (Reversat & Schwartz, 1997; Lemma et al., 2007) tem limitado a ação enzimática a poucos microrganismos, como os fungos lignolíticos (Bailey et al., 2002). O retardamento do processo de decomposição do litter pode implicar acúmulos ou perdas de C e N no solo em virtude da qualidade dos seus resíduos. No monocultivo de eucalipto de rotação curta, em solos de clima tropical e, principalmente, nos primeiros anos de cultivo, têm se destacado perdas da MOS nativa (Lima et al., 2006), ou seja, devido à baixa qualidade do seu litter e lenta entrada de MOS “nova”, parte dos compostos orgânicos menos recalcitrantes da MOS “velha” podem ser consumidos pela microbiota (Binkley et al., 2004). Neste contexto, o solo atua como fonte de energia e nutrientes e pode ter a MOS reduzida ao longo dos anos, se mal manejado.

Resultados obtidos no presente estudo também indicaram redução da relação C/N e VSC/N no cultivo de acácia e na mata nativa em comparação aos cultivos de eucalipto (Quadro 4). A adoção de técnicas de manejo como a rotação de cultivos do eucalipto com espécies fixadoras de N₂, ou o cultivo consorciado com a acácia têm reduzido as relações C/N, lignina:N, lignina:carboidratos no litter, entre outras, podendo aumentar sua labilidade, e preservar a MOS do solo (Garay et al., 2004; Forrester et al., 2005; Forrester et al., 2006). O fluxo de C e nutrientes pode ocorrer para o solo, que atuaria como dreno de resíduos parcialmente decompostos (derivados de lignina, hemicelulose, etc.) e produtos da atividade microbiana (proteínas, aminoácidos, compostos orgânicos de baixo peso molecular, etc.), favorecendo a estocagem de C e N na MOS e a sustentabilidade.

O monômero de lignina mais abundante nos compartimentos da serapilheira, na média de todas as vegetações, foi o siringaldeído com 47 %, seguido pela vanilina, com 16 % e acetosiringona, com 14 % do VSC total (Quadro 4), evidenciando a predominância de

grupamentos siringil na serapilheira (Figura 1). Adicionalmente, o teor de VSC é maior nos resíduos grossos do que naqueles finos.

Os resíduos lenhosos de eucalipto (eucalipto de rotação longa e eucalipto de rotação curta) apresentaram maior teor de lignina (VSC) do que aqueles da serapilheira de mata nativa e acácia, em decorrência do maior no teor de acetosiringona, siringaldeido e ácido siríngico (Quadro 5) e de grupamentos siringil (Figura 1). Já os compartimentos da serapilheira de mata nativa e acácia apresentaram maior teor de grupamentos vanilil (principalmente ácido vanílico) que na serapilheira de eucalipto (curta e longa rotação) (Figura 1).

Quadro 5. Teores médios de fenóis derivados de lignina nos compartimentos da serapilheira (resíduos grossos e resíduos finos) da mata nativa (MN), cultivo de eucalipto de rotação longa (E24), acácia (A) e eucalipto de ciclo curto (E7). Valores entre parênteses indicam a percentagem de fenóis derivados de lignina em relação ao total (VSC).

Cultivo	AG	AL	SG	VL	AS	AV	AF	AC	VSC
-----Resíduos grossos (g kg ⁻¹)-----									
MN	5,1c	3,9a	20,8c	15,0a	4,7b	4,2a	1,0a	1,3a	56,1b
E24	12,8ab	2,0c	57,3a	8,4c	10,2a	2,2b	0,5b	0,4bc	93,8a
A	8,6bc	3,2b	25,1c	12,2b	6,1b	3,8a	0,9a	0,8b	60,9b
E7	14,5a	2,2c	48,8b	8,1c	9,0a	1,9b	0,5b	0,3c	85,3a
-----Resíduos finos (g kg ⁻¹)-----									
MN	5,1a	1,9a	6,0b	5,5bc	2,2a	2,5a	0,6d	1,4a	25,3a
E24	4,2b	1,9a	13,6a	5,4bc	3,2a	1,5b	0,9c	1,4a	32,2a
A	4,0b	1,9a	10,6ab	7,0ab	3,3a	2,2a	1,4a	1,7a	32,1a
E7	4,8ab	1,8a	12,5a	5,0c	2,5a	1,3b	1,1b	1,4a	30,3a
Média	7,4(14)	2,4(4)	24,3(47)	8,3(16)	5,1(10)	2,4(5)	0,9(2)	1,1(2)	52,0

AG: acetosiringona; AL: acetovanilona; SG: siringaldeido; VL: vanilina; AS: ácido siríngico; AV: ácido vanílico; AF: ácido ferúlico e AC: ácido p-coumárico. Médias seguidas da mesma letra minúscula, nas colunas não diferem entre si a 5 % pelo teste LSD de Fisher protegido. CV: coeficiente de variação.

A relação ácido/aldeído nos resíduos da serapilheira foi menor que 0,5 o que indica a predominância de aldeídos nos grupamentos siringil e vanilil, ou seja, a serapilheira esta num estado menos alterado se comparado à MOS. As menores relações Ac/Al desses dois grupamentos foram obtidas na serapilheira do cultivo de eucalipto em rotação curta (Figura 1), possivelmente propiciado pelo aporte de resíduos novos advindos do corte das árvores, imediatamente antes da amostragem da serapilheira, o que reduziu o tempo de contato entre os resíduos depositados na superfície do solo e os agentes decompositores, capazes de aumentar a presença de fenóis ácidos nos grupamentos siringil e vanilil.

Os carboidratos que predominaram nos compartimentos da serapilheira foram a glicose e a manose, principalmente em resíduos lenhosos (Figura 1). Dentre os resíduos, o teor total de carboidratos foi maior no mais lenhoso (resíduos grossos) da serapilheira e, dentre os cultivos, o teor de carboidratos foi maior nos resíduos de eucalipto (de rotação curta e de rotação longa). O maior aporte de celulose e hemicelulose, ricos em glicose, nos resíduos mais lenhosos, especialmente naqueles de eucalipto, podem justificar estes resultados.

A relação H/P (hexose/pentoses) menor que 0,5 indicou a predominância de polímeros de pentoses (Figura 1), Portanto, são compostos de origem predominantemente vegetal e pouco decompostos. Essa relação foi menor nos resíduos grossos do eucalipto de rotação longa e para os resíduos finos na serapilheira da mata nativa indicando a maior atividade microbiológica nesse material, mas não diferiu entre os resíduos grossos e finos (Figura 1), possivelmente, devido ao estágio menor avançado de degradação da serapilheira.

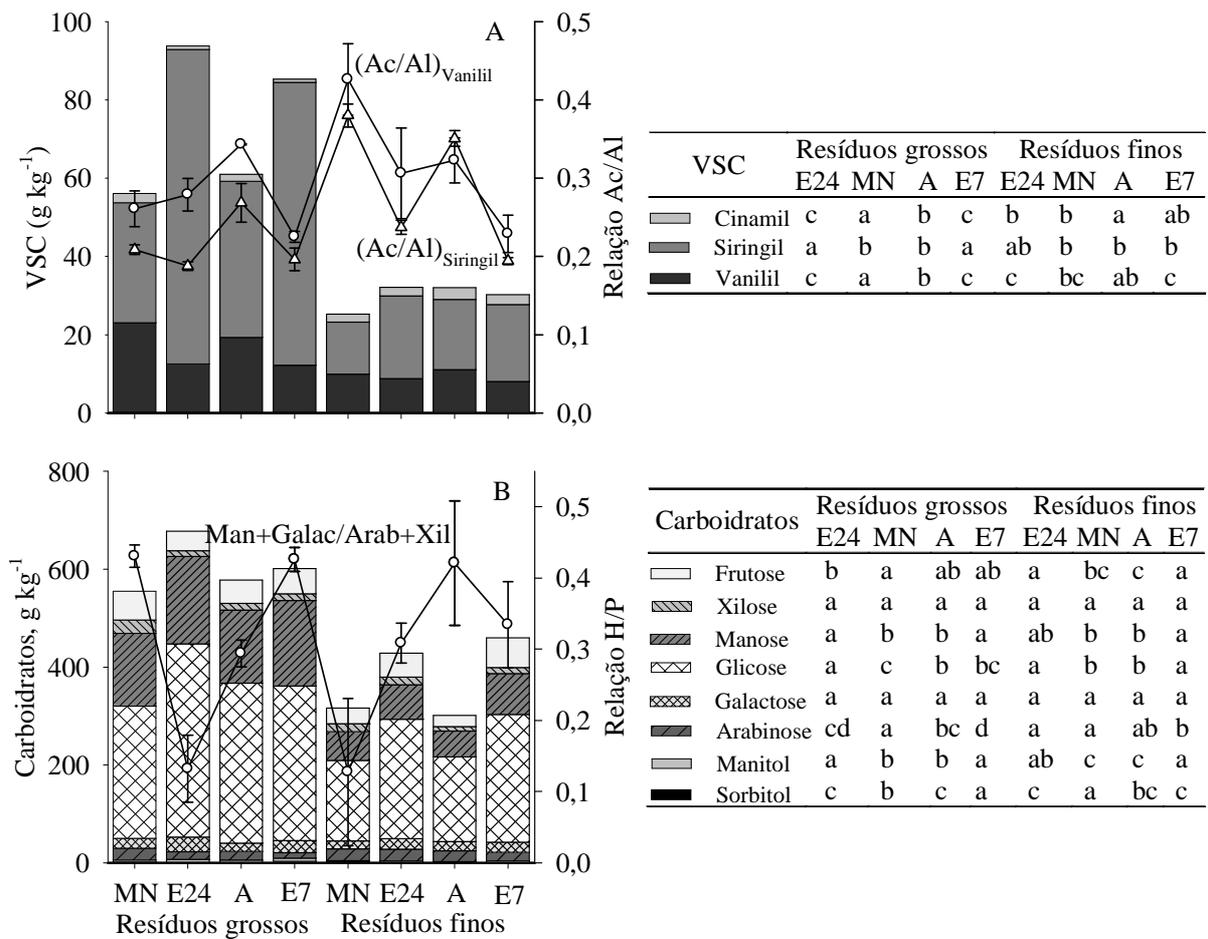


Figura 1. Teores de fenóis derivados de lignina (VSC: Vanilil, Siringil e Cinamil) e carboidratos nos resíduos grossos (G: galhos grossos) e resíduos finos (F: folhas, cascas, galhos finos) da serapilheira de mata nativa (MN), eucalipto em rotação longa (E24), acácia (A) e eucalipto (E7). Nos quadros distribuídos a direita dos gráficos letras minúsculas iguais na linha e, para cada resíduo, indicam não haver diferença significativa ($p > 0,05$) entre cultivos pelo teste de LSD de Fisher protegido. Linha vertical indica erro padrão da média ($n=3$).

4.5.2. Teores de fenóis derivados de lignina (VSC), carboidratos e aminoácúcares no solo

O cultivo de acácia por 14 anos após das rotações com eucalipto de rotação curta, melhorou a qualidade do solo; aumentou o teor de C ($13,43 \text{ g kg}^{-1}$) e N ($1,20 \text{ g kg}^{-1}$) e carboidratos ($4113,5 \text{ mg kg}^{-1}$) na camada de 0-10 cm de profundidade do solo em comparação a monocultura de eucalipto em rotação curta (C= $8,49 \text{ g kg}^{-1}$; N= $0,84 \text{ g kg}^{-1}$ e carboidratos= $3372,9 \text{ mg kg}^{-1}$), aproximando-se dos teores obtidos no solo na condição original (mata nativa) (Quadro 6).

O menor revolvimento do solo propiciado pelo aumento do tempo de cultivo do eucalipto (eucalipto com 24 anos - E24) foi outro fator preponderante para o incremento do teor de C no solo em comparação ao eucalipto de rotação curta (cortado a cada sete anos, em média - E7). Contudo, o teor de VSC no solo de eucalipto em rotação longa foi o menor dentre os ecossistemas estudados (Quadro 6), possivelmente, em consequência da ausência de deposição de resíduos lenhosos da parte aérea e da ciclagem das raízes provenientes das árvores colhidas via corte raso a cada sete anos, resíduos ricos em lignina (galhos, cascas e raízes). A colheita do eucalipto (E7), no entanto, foi realizada duas vezes previamente ao cultivo de acácia, e quatro vezes na área de eucalipto de rotação curta. Além disso, o último desbaste foi feito há cinco anos. Isso resultou em menor relação VSC/N no solo de eucalipto de rotação longa do que naqueles de mata nativa, acácia e eucalipto de ciclo curto, resultado distinto do que foi obtido na serapilheira, onde o cultivo de acácia e mata nativa tiveram menores relações VSC/N. Contudo, deve-se ressaltar que no solo cultivado com eucalipto de rotação longa o sistema radicular de muitas plantas permaneceu vivo, o que pode ter reduzido o aporte de lignina e a relação VSC/N após 24 anos de cultivo. Outro fator que pode ter contribuído para tal resultado foi a menor densidade de árvores do eucalipto de rotação longa devido aos desbastes (iniciou com 1.111 plantas ha⁻¹ e, atualmente, conta com aproximadamente 300 plantas ha⁻¹).

A relação C/N nos solos de eucalipto (rotação longa e curta) foi similar àqueles de mata nativa e acácia, o que demonstra a importância da determinação de outros biomarcadores que indiquem alterações na qualidade da MOS e no seu processo de formação e decomposição, tais como o teor de lignina (VSC), carboidratos e as relações VSC/N e VSC/Carboidratos. Reversat & Schwartz, (1997) obtiveram alta correlação negativa ($r = -0,94$, $p = 0,002$) da relação lignina:N com o coeficiente de decomposição (k) do litter jovem de eucalipto, e mata nativa semi-decídua de regiões tropicais do Congo, na África. Esta relação (lignina:N) foi maior no cultivo de eucalipto de rotação curta (37) do que no litter da mata

(25) e *A. mangium* (20), resultando em menor coeficiente de decomposição (k) no litter de eucalipto (0,24) em comparação ao litter da mata (1,85) e da acácia (0,76) (Reversat & Schwartz, 1997). Outro fator preponderante na redução do k do litter do eucalipto foi o maior teor de taninos (4 %) em comparação aos litters da mata (1,5 %) e da acácia (0,75 %). A atividade microbiana no solo pode ser diminuída pela ação anti-fúngica dos taninos, além da baixa disponibilidade de N no litter (Reversat & Schwartz, 1997), resultando em menor teor de N no solo.

Quadro 6. Teores totais de C orgânico, N, fenóis derivados de lignina (VSC), carboidratos, aminoaçúcares, relação VSC/N e C/N em solos (camada de 0-10 cm) de mata nativa (MN), eucalipto de rotação longa (E24), acácia (A) e eucalipto de rotação curta (E7) dos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo.

Característica	MN	E24	A	E7
C (g kg ⁻¹)	17,5a	11,9c	13,4b	8,5d
N (g kg ⁻¹)	1,3a	0,9b	1,2a	0,8b
C/N	13,46a	13,22a	11,67a	10,63a
VSC (mg kg ⁻¹)	141,4a	65,1b	141,0a	105,7ab
VSC/N	0,11a	0,07b	0,12a	0,13a
Carboidratos (mg kg ⁻¹)	5004,3a	3566,6bc	4113,5b	3372,9c
VSC/Carboidratos	0,03a	0,02a	0,03a	0,3a
Aminoaçúcares (mg kg ⁻¹)	480,9a	306,9c	406,5b	379,1b
VSC (g kg ⁻¹ de C)	8,1b	5,5c	10,5ab	12,7a
Carboidratos (g kg ⁻¹ de C)	289,7b	303,1b	312,8b	403,7a
Aminoaçúcares (g kg ⁻¹ de C)	27,7b	26,1b	30,7b	45,0a

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na linha não diferem ao nível de 5% pelo teste LSD de Fisher protegido ($p > 0,05$).

No solo, o estado mais avançado de decomposição dos compostos derivados da lignina em comparação à serapilheira resultou na maior abundância de monômeros com grupamentos

ácidos, como o ácido vanílico (25 %), ácido siríngico (12 %) e ácido ferúlico (10 %). Ao se compararem os teores de fenóis obtidos na serapilheira com aqueles do solo, verificou-se que a maior abundância nos compostos lenhosos da serapilheira não garantiu seu maior acúmulo no solo, pois maiores teores de siringaldeído e ácido siríngico foram obtidos no solo da mata nativa e naquele de acácia (Quadro 7). Esses resultados indicam menor labilidade e, ou, maior dificuldade na incorporação destes fenóis dos resíduos lenhosos de eucalipto em MOS, uma vez que o teor de VSC no solo de mata nativa e acácia foi superior. Possivelmente, isto pode ser resultado de alterações na qualidade de serapilheira (alto teor de lignina, relações largas de lignina:N e C:N). O aumento da deposição de resíduos lenhosos na serapilheira pode favorecer a produção de enzimas microbianas decompositoras de compostos orgânicos polimerizados e bioquimicamente complexas de forma não muito seletiva. Com isso, além dos resíduos vegetais, parte da MOS humificada pode ser utilizada como fonte de energia e nutrientes pelos microrganismos heterotróficos, causando efeito “priming” negativo à MOS (Fontaine et al., 2003, Fontaine et al., 2004; Hamer & Marschner, 2005) e a redução no teor de lignina no solo. Heim & Shimidt (2007) observaram que o tempo médio de residência de lignina no solo (5-26 anos para pastagens e < 9-38 anos para solos cultivados com *Miscanthus giganteus*) pode ser menor que aquele do C orgânico no solo (20-26 anos para pastagens e 51 anos para solos cultivados com *Miscanthus giganteus*, planta perene utilizada pela indústria como fonte de energia e celulose), indicando que a lignina no solo não será, necessariamente, preservada e pode ser utilizada como fonte de energia para microrganismos heterotróficos decompositores, principalmente quando o substrato (serapilheira) for de menor qualidade (menor teor de compostos orgânicos lábeis).

Quadro 7. Teores médios de fenóis derivados de lignina no solo de mata nativa (MN), eucalipto de rotação longa (E24), acácia (A) e eucalipto de rotação curta (E7). Valores entre parênteses indicam a percentagem de fenóis derivados de lignina em relação ao total (VSC)

Cultivo	AG	AL	SG	VL	AS	AV	AF	AC	VSC
	-----mg kg ⁻¹ -----								
MN	6,1a	20,3a	17,8a	11,3ab	17,2a	34,2ab	21,4a	13,1a	141,1
E24	6,0a	8,5b	9,4c	9,4b	8,5b	12,5c	6,0b	4,8b	65,1
A	12,4a	15,9a	16,4ab	15,3a	15,6a	44,6a	7,5b	13,3a	141,0
E7	10,1a	19,4a	10,7bc	10,7b	12,1ab	20,4bc	12,5ab	9,8ab	105,7
CV (%)	40,6	10,2	16,0	12,4b	17,3	20,5	35,7	26,8	13,9
Média	8,7(8)	16,0(14)	13,6(12)	11,7(10)	13,4(12)	28,0(25)	11,8(10)	10,3(9)	113,3

AG: acetosiringona; AL: acetovanilona; SG: siringaldeido; VL: vanilina; AS: ácido siríngico; AV: ácido vanílico; AF: ácido ferúlico e AC: ácido p-coumárico. Médias seguidas de letras minúsculas iguais entre os cultivos de cada região não diferem ao nível de 5 % pelo teste LSD de Fisher protegido ($p > 0,05$). CV: coeficiente de variação.

Os maiores teores de fenóis dos grupamentos vanilil, siringil e cinamil da lignina (VSC) foram observados no solo da mata nativa e acácia (Figura 2). A relação Ac/Al maior do que 2,5 no grupamento vanilil dos dois solos também indicou maior predominância de grupamentos ácidos e estágio mais avançado de degradação/oxidação da lignina. A mesma tendência foi observada para a relação H/P (man + galac/arab + xil) nos solos de mata nativa e acácia, onde maiores relações (>1,0) indicam predominância de carboidratos derivados da atividade microbiana em relação àqueles de origem vegetal. Esta afirmativa também é suportada pela maior produção de aminoaçúcares (galactosamina, glicosamina e ácido murâmico) de origem microbiana no solo cultivado com mata nativa e acácia (Quadro 6).

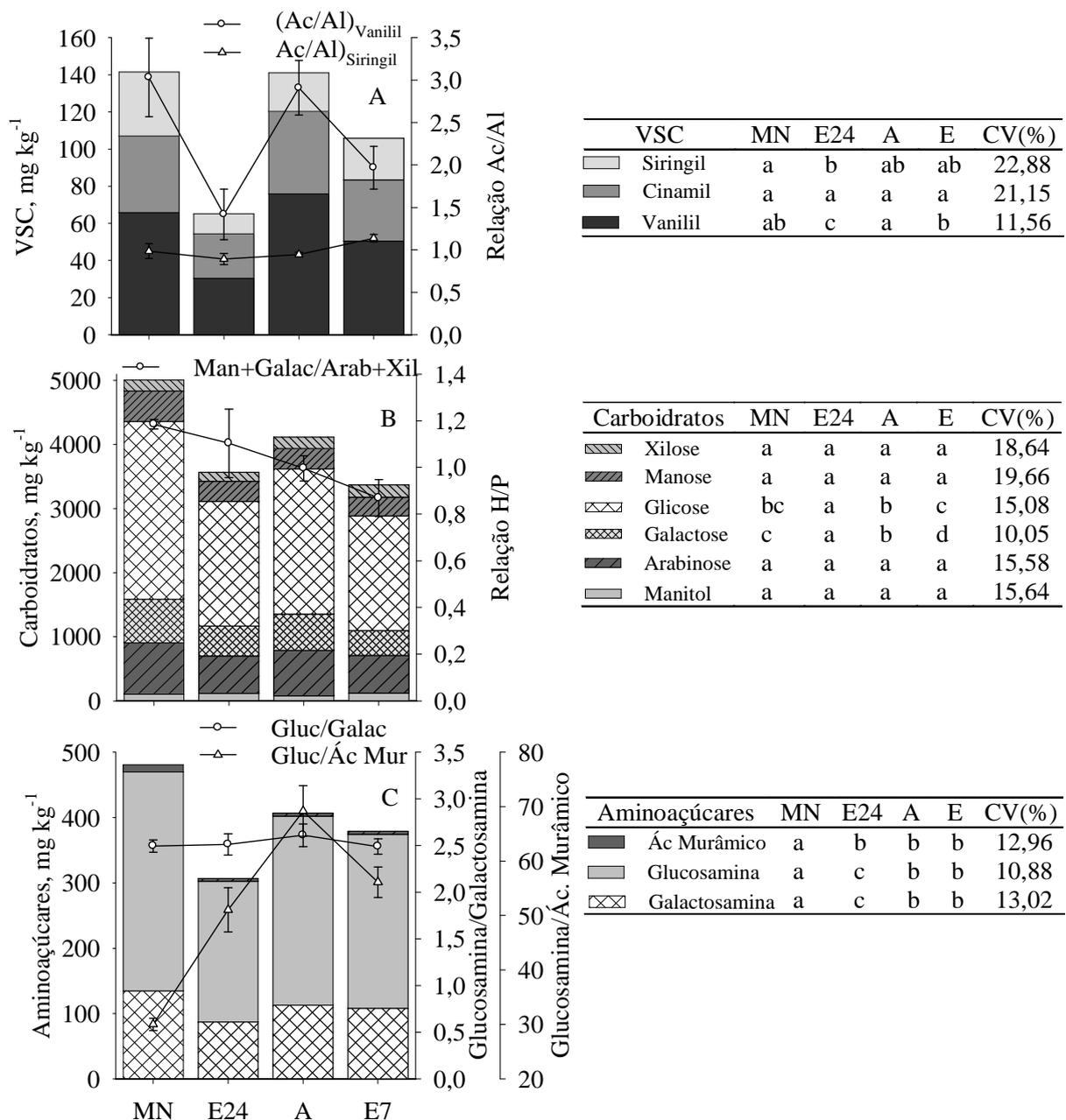


Figura 2. Teores de fenóis derivados de lignina (VSC: Vanilil, Siringil e Cinamil), carboidratos e aminoaçúcares em amostras de solo (camada de 0-10 cm) coletadas em eucalipto de longa rotação (E24), mata nativa (MN), acácia (A) e eucalipto de curta rotação (E7). **A:** relação ácido/aldeído (Ac/AI) nos derivados vanilil e siringil; **B:** relação H/P - relação entre Hexoses (manose+galactose) e pentoses (glucose+xilose) e **C:** aminoaçúcares derivados da comunidade fúngica (glucosamina) em relação a compostos bacterianos (ácido murâmico). Nos quadros distribuídos a direita dos gráficos letras minúsculas iguais na linha indicam ausência de diferença significativa ($p > 0,05$) cultivos pelo teste de LSD

de Fisher protegido. CV (%): coeficiente de variação. Linhas verticais indicam erro padrão da média (n=3).

Os solos de acácia e mata nativa foram os que apresentaram maiores teores de C e N, indicando que apesar do aumento da atividade microbiana decompositora, suportada pela maior abundância de seus produtos, obteve-se efeito “priming” positivo na MOS. Os produtos intermediários derivados de estruturas microbianas podem estar sendo estabilizados mais eficientemente nos solos de mata nativa e acácia devido à maior formação de complexos com a fração argila do solo (argilo-orgânicos), ricos em compostos alifáticos decorrentes da atividade microbiana. Produtos da atividade microbiana são estabilizados quimicamente no solo pela sua alta interação com partículas de argila e pela oclusão física causada pela formação de agregados (Giardina et al., 2001; Six et al., 2006). Quanto maior a presença destes compostos no solo, possivelmente, maior será a agregação e sua preservação, aumentando os estoques de C e N no solo.

Efeitos positivos da maior presença de N e, possivelmente, da diversidade ecológica e biológica no cultivo de acácia e na mata nativa também podem ser considerados fatores preponderantes para o aumento da estabilização e dos estoques de C nos solos. O efeito positivo do N no aumento da estabilização do C do solo em longo prazo está associado à sua incorporação à estrutura das substâncias húmicas, as quais são bastante recalcitrantes (Stevenson, 1994). A redução da relação C/N de resíduos vegetais de palha de arroz pela adubação com N mineral no solo favoreceu o acúmulo de C na fração húmica (compartimento das substâncias húmicas mais resistente à oxidação) e o aumento do teor da MOS (Moran et al., 2005). Sjöberg et al. (2004) destacam que a estabilização estrutural pode ocorrer devido à reação do N com resíduos de lignina e compostos fenólicos, seguido pela formação de compostos recalcitrantes, como um complexo tanino-proteína. Neste sentido, mesmo espécies com maior teor de lignina no litter proveniente de raízes somente aumentaram a estabilidade

de C refratário no solo em relação a espécies com baixo conteúdo de lignina no litter quando N inorgânico foi adicionado ($4 \text{ g m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$) na camada de 0-10 cm de profundidade do solo (Dijkstra et al., 2004).

A maior qualidade nutricional e energética dos resíduos aportados nos solos de mata nativa e acácia pode ter estimulado o desenvolvimento de organismos capazes de utilizar fontes mais lábeis de C e N dos resíduos vegetais, em detrimento de outras mais recalcitrantes, que podem ter sido acumuladas no solo, juntamente com as já existentes na MOS, enquanto que, nos solos de eucalipto (rotação longa e curta) a menor qualidade dos compostos orgânicos aportados ao solo pode ter estimulado a lenta produção de enzimas decompositoras de compostos polimerizados da MOS e da serapilheira, principalmente por fungos lignolíticos e actinomicetos, induzindo a perda de MOS nativa. Neste processo, parte do C e do N que já estava estabilizado no solo pode retornar à atmosfera na forma gasosa, reduzindo, indiretamente, a eficiência de manutenção do C e N da MOS nos solos de eucalipto.

Os teores de aminoácidos oriundos da atividade microbiana também foram maiores no solo de mata nativa e acácia, indicando maior contribuição microbiana para a formação da MOS nesses cultivos. Dentre os aminoácidos quantificados (glucosamina, galactosamina) e ácido murâmico, notou-se em todos os tratamentos que o teor de glucosamina no solo foi bem superior a dos outros compostos de origem microbiana (Figura 2). Esse resultado pode ser justificado pela maior síntese microbiana (fungos, bactérias e actinomicetos produzem esse composto em diferentes quantidades) e estabilidade da glucosamina no solo. A glucosamina pode ser originada de vários microorganismos no solo (Glaser et al., 2004), mas resultados observados em literatura caracterizam a glucosamina como aminoácido originado, principalmente, da atividade fúngica no solo (Zhang et al., 1998; Solomon et al., 2002). Acredita-se que os fungos são iniciadores do processo de decomposição do litter e os principais responsáveis pela decomposição de compostos mais recalcitrantes da MOS

(Fontaine et al., 2003). Deste modo, sua atividade e presença de seus derivados (aminoaçúcares, entre outros) no solo, tendem a ser maior do que aquela de bactérias (Liang et al., 2007).

Na comparação entre os usos florestais, o solo da mata nativa foi o que teve menor relação glucosamina/ácido murâmico (≈ 30), ou seja, juntamente com a comunidade fúngica identificou-se maior abundância de comunidades bacterianas decompositoras na formação da MOS do que nos outros ecossistemas. A maior estabilidade da glucosamina no solo é um fator que também pode ter contribuído para sua maior abundância. Solomon et al. (2002) observaram relações glucosamina/ácido murâmico decrescentes na seguinte ordem: floresta natural > plantações de chá > cultivos anuais (milho), indicando maior depleção da galactosamina e do ácido murâmico que da glucosamina em solos cultivados, como consequência da maior estabilidade da glucosamina no solo em relação aos outros dois aminoaçúcares. A explicação para maior estabilidade da glucosamina nestes solos em relação aos compostos produzidos pelas bactérias é que a glucosamina é constituinte da glomalina, uma glicoproteína recalcitrante produzida no solo por fungos micorrízicos arbusculares (Zhang et al., 1998). Além disso, outro motivo para tal fato poderia estar associado ao maior crescimento de fungos em solos cultivados com pH mais ácido que àquele do solo de mata nativa (cultivados: $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 5,7 e, mata nativa: $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 6,4) na região de Wushwash na Etiópia (Solomon et al., 2002).

Nos solos sob os diferentes usos florestais o pH era ácido e, ficou próximo a 4,6 (Quadro 3). Nestes solos a relação de aminoaçúcares de origem fúngica em comparação àqueles de origem bacteriana (glucosamina/ácido murâmico) foi maior (≈ 50) do que relações observadas na literatura para pH próximo da neutralidade (Solomon et al., 2002), possivelmente, por serem os fungos mais bem adaptados às condições de acidez do solo. Neste sentido, Turrión et al. (2002) também obtiveram relações glucosamina/ácido murâmico

menores (3,7) em solos de floresta com pH em água próximo da neutralidade (7,0 a 7,1) do que em solos de pastagem (14,2) com pH = 5,6, na camada de 0-10 cm de solo.

A degradação do solo pelo cultivo sucessivo também é outro fator capaz de alterar a relação de aminoácidos e carboidratos de origem microbiana. A intensificação do cultivo do solo, como no caso do eucalipto em rotação curta, pode ser o principal fator de aumento da relação de glucosamina/galactosamina e glucosamina/ácido murâmico, sugerindo redução na produção de aminoácidos de origem bacteriana em comparação àqueles derivados de fungos. Assim, o solo que não sofreu com a atividade antrópica (mata nativa) foi o que deteve menor relação de glucosamina/ácido murâmico. Exemplo de aumento da produção de aminoácidos derivados da atividade bacteriana, reportado em literatura, foi por meio da aplicação de esterco animal incrementando o teor de hexosaminas e ácido murâmico na MOS e, minimizando o efeito negativo do cultivo prolongado no teor de aminoácidos (Solomon et al., 2001).

Estudo realizado com sistemas conservacionistas verificou a maior presença de glucosamina em sistemas de semeadura direta em relação ao cultivo convencional. Maior atividade fúngica também pode significar maior grau de agregação interna entre micro e macroagregados do solo devido aos compostos orgânicos advindos da sua atividade (Simpson et al., 2004), resultando em maior conservação ou acúmulo de C nestes sistemas (Bailey et al., 2002). Estudos desta ordem podem melhorar o entendimento da formação da matéria orgânica em solos florestais tropicais, tornando possível a adoção de técnicas de manejo que contribuam para a manutenção da MOS. A recuperação na qualidade do solo cultivado anteriormente com eucalipto de rotação curta pelo cultivo da acácia também refletiu na abundância e distribuição desses biomarcadores, certamente é merecedora de estudos adicionais.

4.6. CONCLUSÕES

O cultivo da acácia após o cultivo do eucalipto em rotação curta e o aumento do tempo de rotação (24 anos) favorece o estreitamento das relações lignina/N e C/N e sua serapilheira tem menor teor de lignina e carboidratos do que aquela do cultivo de eucalipto de rotação curta. No solo, o cultivo de acácia, juntamente com o de eucalipto de rotação longa favorece a recuperação dos estoques de C e N, e alargam a relação ácido/aldeído do grupamento vanilil da lignina e a relação hexoses/pentose dos carboidratos.

Com base nos estado de oxidação dos fenóis derivados de lignina há indicação de que a serapilheira de eucalipto é mais resistente a decomposição e a matéria orgânica encontra-se em estágio menos avançado de decomposição no solo cultivado com eucalipto do que no cultivado com acácia e mata nativa.

Nos solos cultivados com eucalipto há maior contribuição direta de componentes de origem vegetal para a matéria orgânica que aqueles de origem microbiana em comparação aos solos sob mata nativa, acácia e pastagem.

4.7. LITERATURA CITADA

- AMELUNG, W.; FLACH, K.W. & ZECH, W. Neutral and acidic sugars in particle-size fractions as influenced by climate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:865-873, 1999.
- BAILEY, V.L.; SMITH, J.L. & BOLTON, H.J. Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration. *Soil Biol. Biochem.*, 34:997-1007, 2002.
- BARLOW, J.; GARDNER, T.A.; FERREIRA, L.V. & PERES, C.A. Litter fall and decomposition in primary, secondary and plantation forests in the Brazilian Amazon. *For. Ecol. Manag.*, 247:91-97, 2007.
- 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.

- CARREIRO, M.M.; SINSABAUGH, R.L.; REPERT, D.A. & PARKHURST, D.F. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology*, 81:2359-2365, 2000.
- DIJKSTRA, F.A.; HOBBIIE, S.E.; KNOPS, J.M.H. & REICH, P.B. Nitrogen deposition and plant species interact to influence soil carbon stabilization. *Ecol. Letters*, 7:1192-1198, 2004.
- FOG, K. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter. *Biol. Rev.*, 63:433-462, 1988.
- FONTAINE, S.; BARDOUX, G.; ABBADIE, L. & MARIOTTI, A. Carbon input to soil may decrease soil carbon content. *Ecol. Letters*, 7: 314-320, 2004.
- FONTAINE, S.; MARIOTTI, A. & ABBADIE, L. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biol. Biochem.*, 35:837-843, 2003.
- FONTE, S.J. & SCHOWALTER, T.D. Decomposition of greenfall vs. senescent foliage in a tropical forest ecosystem in Puerto Rico. *Biotropica*, 36:474-482, 2004.
- FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J. & COWIE, A.L. Carbon allocation in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. *For. Ecol. Manag.* 233:275-284, 2006.
- FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J. & COWIE, A.L. Nutrient cycling in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. *Can. J. For. Res.*, 35:2942-2950, 2005.
- GARAY, I.; PELLENS, R.; KINDEL, A.; BARROS, E. & FRANCO, A.A. Evaluation of soil conditions in fast-growing plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil: a contribution to the study of sustainable land use. *Appl. Soil Ecol.*, 27:177-187, 2004.

- GIARDINA, C.P.; RYAN, M.G.; HUBBARD, R.M. & BINKLEY, D. Tree species and soil textural controls on carbon and nitrogen mineralization rates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1272-1279, 2001.
- GLASER, B.; TURRIÓN, M. & ALEF., K. Amino sugars and muramic acid-biomarkers for soil microbial community structure analysis. *Soil Biol. Biochem.*, 36:399-407, 2004.
- HAMER, U. & MARSCHNER, B. Priming effects in different soil types induced by fructose, alanine, oxalic acid and catechol additions. *Soil Biol. Biochem.*, 37:445-454, 2005.
- HEIM, A. & SCHMIDT, M.W.I. Lignin turnover in arable soil and grassland analysed with two different labelling approaches. *Europ. J. Soil Sci.*, 58:599-608, 2007.
- KÖGEL-KNABNER, I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.*, 34: 139-162, 2002.
- LEMMA, B.; NILSSON, I.; KLEJA, D.B.; OLSSON, M. & KNICKER, H. Decomposition and substrate quality of leaf litters and fine roots from three exotic plantations and a native forest in the southwestern highlands of Ethiopia. *Soil Biol. Biochem.*, 39:2317-2328, 2007.
- LIANG, C.; ZHANG, X.; RUBERT IV, K.F. & BALSER, T.C. Effect of plant materials on microbial transformation of amino sugars in three soil microcosms. *Biol. Fertil. Soils*, 43:631-639, 2007.
- LIMA, A.M.N.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. BARROS, N.F.; MENDONÇA, E.S.; SMYTH, T.J.; MOREIRA, M.S. & LEITE, F.P. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. *For. Ecol. Manag.*, 235:219-231, 2006.
- MENDHAM, D.S.; HEAGNEY, E.C.; CORBEELS, M.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S. & MCMURTRIE R.E. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*. *Soil Biol. Biochem.*, 36:1067-1074, 2004.

- MÖLLER, A.; KAISER, K. & ZECH, W. Lignin, carbohydrate, and amino sugar distribution and transformation in the tropical highland soils of northern Thailand under cabbage cultivation, *Pinus* reforestation, secondary forest, and primary forest. *Austr. J. Soil Res.*, 40:977-998, 2002.
- MORAN, K.K.; SIX, J.; HORWATH, W.R. & VAN KESSEL, C. Role of mineral-nitrogen in residue decomposition and stable soil organic matter formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:1730-1736, 2005.
- OADES, J.M. The retention of organic matter in soils. *Biogeochem.*, 5:35-70, 1984.
- OLK, D.C., ANDERS, M.M., BOECKMANN, J.M., GRANTHAM, J. & HOLZHAUER, J.. Impaired cycling of soil nitrogen under continuous rice rotations in the Arkansas Grand Prairie area. In: *Proceedings, Thirtieth Rice Technical Working Group, New Orleans, LA. State University Agricultural Center, Louisiana. 2004. p.148–149*
- OMETTO, J.C. *Bioclimatologia vegetal*. São Paulo, Ceres, 1981. 425p.
- OTTO, A. & SIMPSON, M.J. Evaluation of CuO oxidation parameters for determining the source and stage of lignin degradation in soil. *Biogeochemistry*, 80:121-142, 2006.
- RASSE, D.P.; DIGNAC, M.F.; BAHRI, H.; RUMPEL, C.; MARIOTTI, A. & CHENU, C. Lignin turnover in an agricultural field: from plant residues to soil-protected fractions. *Europ. J. Soil Sci.*, 57:530-538, 2006.
- REVERSAT, F.B. & SCHWARTZ, D. Change in lignin content during litter decomposition in tropical forest soils (Congo): comparison of exotic plantations and native stands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 325:427-432, 1997.
- 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*, 107:109-141, 2002.

- SIMPSON, R.T.; FREY, S.D.; JOHAN SIX, J. & THIET, R.K. Preferential accumulation of microbial carbon in aggregate structures of no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1249-1255, 2004.
- SIX, J.; FREY, S.D.; THIET, R.K. & BATTEN, K.M. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:555-569, 2006.
- SJÖBERG, G.; NILSSON, S.I.; PERSSON, T. & KARLSSON, P. Degradation of hemicellulose, cellulose and lignin in decomposing spruce needle litter in relation to N. *Soil Biol. Biochem.*, 36 1761-1768, 2004.
- SOLOMON, D.; FRITZSCHE, F.; TEKALIGN, M.; LEHMANN, J. & ZECH, W. Soil organic matter composition in the subhumid Ethiopian highlands as influenced by deforestation and agricultural management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66:68-82, 2002.
- SOLOMON, D.; LEHMANN, J. & ZECH, W. Land use effects on amino sugar signature of chromic Luvisol in the semi-arid part of northern Tanzania. *Biol. Fertil. Soils*, 33:33-40, 2001.
- SPIELVOGEL, S.; PRIETZEL, J. & KÖGEL-KNABNER, I. Changes of lignin phenols and neutral sugars in different soil types of a high-elevation forest ecosystem 25 years after forest dieback. *Soil Biol. Biochem.*, 39:655-668, 2007.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. & DICKEY, D.A. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. New York: McGraw-Hill, 1997. 666p.
- STEVENSON, F.J. Humus Chemistry: Genesis, Composition and Reactions. 2.ed. New York, Willey & Sons Inc., 1994. 496p.
- SUHAS, P.J.M.C. & CARROTT, M.M.L.R. Lignin - from natural adsorbent to activated carbon: A review. *Biores. Technol.*, 98:2301-2312, 2007.
- TURRIÓN, M.B.; GLASER, B. & ZECH, W. Effects of deforestation on contents and distribution of amino sugars within particle-size fractions of mountain soils. *Biol. Fertil. Soils*, 35:49-53, 2002.

ZHANG, X.; AMELUNG, W.; YUAN, Y. & ZECH, W. Amino sugar signatures of particle size fractions in soils of the native prairie as affected by climate. *Soil Sci.*, 163:220-229, 1998.

CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados obtidos indicam que a utilização de técnicas alternativas de cultivo do eucalipto como no sistema de talhadia pode auxiliar na manutenção e, até aumento da estoques de C no solo sem, necessariamente, reduzir a produtividade de madeira. No sistema de talhadia obtem-se ao final dos sete anos de cultivo, estocagem de C de 192 t ha⁻¹ e incrementos de 36 t ha⁻¹ no ecossistema, principalmente pelo aumento do estoque de C na MOS e no compartimento radicular das plantas. Sistemas de cultivo altamente produtivos, pelo uso intensivo de água e nutrientes (fertirrigado) são outra alternativa de aumento da estocagem de C e N na MOS em comparação ao cultivo convencional de ciclo curto (sete anos). Estes resultados devem-se ao maior aporte de matéria seca da serapilheira, água e nutrientes no sistema fertirrigado, que incrementam os teores de N, carboidratos totais, lignina e aminoácidos, indicando maior atividade microbiana no solo. Nos solos cultivados com eucalipto há maior contribuição direta de componentes de origem vegetal para a matéria orgânica que aqueles de origem microbiana em comparação aos solos sob mata nativa, acácia e pastagem. A utilização de sistemas de cultivo alternativos como o de acácia após o cultivo de eucalipto de rotação curta, juntamente com o aumento do tempo de rotação do eucalipto aumentam o teor de C e N na MOS. O cultivo da acácia contribui para o incremento de compostos de origem microbiana (carboidratos e aminoácidos) e a estabilização da lignina no solo na MOS em comparação ao monocultivo de eucalipto de rotação curta.

ANEXOS

ANALISE DE VARIÂNCIA PARA OS RESULTADOS OBTIDOS NO CAPÍTULO I

Quadro 1. Análise de variância para as estimativas do estoque de C ($t\ ha^{-1}$) no ecossistema de povoamentos de eucalipto manejados no sistema de talhadia (RB), reforma com mudas clonais (RF) e reforma com mudas originadas de semente (RFS), e seus compartimentos no período de colheita, localizado no município de Aracruz, região litorânea do Estado do Espírito Santo.

FV	GL	Quadrado médio											
		LH	C	F	G	PA	MOS	RG	RM	RF	R	PA+R	PL+M+MOS+C
		$t\ ha^{-1}$											
Bloco	2	1,49 ns	0,107 °	0,189 ns	3,180 ns	11,00 ns	0,202 ns	3,95 ns	0,0002 ns	0,00008 ns	4,01 ns	19,57 ns	145,31 ns
Manejo	5	1,19 ns	1,388 **	0,185 ns	0,095 ns	2,06 ns	4,945 ***	45,77 *	0,0268 ***	0,02100 ***	43,10 *	50,87 ns	472,07 ns
Erro	22	9,99	0,019	0,112	2,160	19,40	0,064	2,88	0,0004	0,00020	2,85	30,15	193,20
Média		50,93	6,210	1,290	3,080	61,50	5,2100	13,41	0,1900	0,14000	13,74	75,25	177,40
CV (%)		6,20	2,190	25,920	47,800	7,16	4,8900	12,66	10,1100	10,28000	12,27	7,29	7,83

ns, *, **, *** - não significativo ($p > 5\%$), significativo a $p < 5, 1$ e $0,1\%$, respectivamente. LH: lenho; C: casca; F: folha; G: galho; PA: parte aérea; M: manta orgânica do solo; RG: raiz grossa; RM: raiz média; RF: raiz fina; R: raízes; PA+R: parte aérea mais raízes; PL: planta inteira; C: cepas e MOS: matéria orgânica do solo.

Quadro 2. Análise de variância dos estoques de C na biomassa alocados nos ecossistemas de eucalipto e seus componentes durante o crescimento das árvores de eucalipto (I) em sistema de talhadia (1 RB) ou reforma com mudas originadas de estaquia (1 RF, 2 RF, 3 RF, 4 RF) e semente (5 RFS) na região litorânea do estado do Espírito Santo. Desdobramento de idade de desenvolvimento dentro de clones

FV	GL	Quadrado médio											
		LH	C	F	G	PA	M	RG	RM	RF	R	PA+R	PL+M+MOS+C
		t ha ⁻¹											
Bloco	2	4,09 ns	0,39 *	0,02 ns	0,92 ns	5,1 ns	21,92 ns	4,65 ns	0,015 ns	0,05 ***	3,45 ns	2,1 ns	144,4 ns
Clone (Cl)	5	122,82 ***	4,11 ***	0,99 ***	3,37 ***	148,2 ***	4,88 ns	327,10 ***	0,022 ns	0,01 ns	324,37 ***	606,7 ***	1826,0 ***
Idade (I)	5	7875,40 ***	99,05 ***	7,87 ***	49,59 ***	10958,9 ***	856,91 ***	133,40 ***	5,380 ***	1070,00 ***	152,22 ***	12346,0 ***	11016,4 ***
Cl x I	25	31,97 ***	0,56 ***	0,50 ***	2,15 ***	46,8 ***	11,47 *	24,40 ***	0,015 ns	0,01 ns	24,82 ***	90,7 ***	355,7 ns
I d/ Cl 1RB	5	1225,50 ***	21,25 ***	1,80 ***	6,64 ***	1752,8 ***	137,73 ***	106,37 ***	0,940 ***	0,20 ***	87,40 ***	2360,9 ***	3563,2 ***
I d/ Cl 3RF	5	1175,40 ***	12,48 ***	12,48 ***	8,97 ***	1661,0 ***	150,59 ***	25,76 ***	0,897 ***	0,18 ***	32,21 ***	1833,9 ***	1037,1 *
I d/ Cl 1RF	5	1046,40 ***	17,77 ***	3,04 ***	9,54 ***	1479,9 ***	147,15 ***	14,23 ***	0,947 ***	0,19 ***	22,32 ***	1480,7 ***	1328,4 *
I d/ Cl 4RF	5	1992,60 ***	24,00 ***	1,66 ***	9,00 ***	2650,6 ***	188,60 ***	25,02 ***	0,934 ***	0,20 ***	34,85 ***	2761,0 ***	2562,3 ***
I d/ Cl 2RF	5	1149,00 ***	11,10 ***	1,15 ***	10,42 ***	1603,4 ***	140,78 ***	29,64 ***	0,873 ***	0,17 ***	36,93 ***	1840,9 ***	2191,3 ***
I d/ Cl 5RFS	5	1446,10 ***	15,26 ***	0,95 ***	15,77 ***	2044,7 ***	149,40 ***	54,60 ***	0,863 ***	0,18 ***	62,59 ***	2521,7 ***	2112,5 ***
Erro	70	4,60	0,09	0,05	0,67	7,2	6,44	3,02	0,023	0,01	2,97	11,8	279,9
Média		25,77	3,19	1,30	3,04	33,3	7,68	8,73	0,370	0,21	9,30	42,6	135,2
CV (%)		8,38	9,34	18,16	27,08	8,1	33,05	19,92	41,770	51,87	18,51	8,1	12,4

LH: lenho; C: casca; F: folha; G: galho; PA: parte aérea; M: manta orgânica; RG: raiz grossa; RM: raiz média; RF: raiz fina; R: raízes; PA+R: parte aérea mais raízes; PL: planta inteira; C: cepas e MOS: matéria orgânica do solo.

Continuação→

FV	GL	Quadrado médio		
		MOS	(PL-LH)+M+MOS+C	PAMC
		t ha ⁻¹		
Bloco	2	280,50 ns	113,83 *	44,27 ns
Clone (Cl)	5	879,80 **	1215,10 **	548,91 ***
Idade (I)	5	2496,10 ***	2027,10 ***	12246,60 ***
Cl x I	25	298,00 ns	329,60 ns	86,00 ***
I d/ Cl 1RB	5	848,99 **	1090,10 ***	2094,60 ***
I d/ Cl 3RF	5	331,28 ns	302,03 ns	1889,70 ***
I d/ Cl 1RF	5	288,49 ns	404,31 ns	1717,10 ***
I d/ Cl 4RF	5	1308,60 *	921,81 *	2474,50 ***
I d/ Cl 2RF	5	808,16 *	683,15 *	1846,60 ***
I d/ Cl 5RFS	5	401,08 ns	401,08 ns	401,08 ***
Erro	70	268,30	268,30	22,05
Média		83,83	109,45	49,52
CV (%)		19,54	14,97	9,48

ns, *, **, *** - não significativo ($p > 5\%$), significativo a $p < 5$, 1 e 0,1%, respectivamente

Quadro 3. Análise de variância dos estoques de C na biomassa alocados nos ecossistemas de eucalipto e seus componentes durante o crescimento das árvores de eucalipto (I) em sistema de talhadia (1 RB) ou reforma com mudas originadas de estaquia (1 RF, 2 RF, 3 RF, 4 RF) e semente (5 RFS) na região litorânea do estado do Espírito Santo. Desdobramento de clones dentro de cada idade de desenvolvimento do eucalipto

FV	GL	Quadrado médio											
		LH	C	F	G	PA	M	RG	RM	RF	R	PA+R	PL+M+MOS+C
		t ha ⁻¹											
Bloco	2	4,09 ns	0,39 *	0,02 ns	0,92 ns	5,09 ns	21,92 ns	4,65 ns	0,0150 ns	0,045 ***	3,45 ns	2,13 ns	144,40 ns
Clone (Cl)	5	122,82 ***	4,11 ***	0,99 ***	3,37 ***	148,20 ***	4,88 ns	327,10 ***	0,0220 ns	0,011 ns	324,37 ***	606,72 ***	1826,00 ***
Idade (I)	5	7875,40 ***	99,05 ***	7,87 ***	49,59 ***	10958,90 ***	856,91 ***	133,40 ***	5,3800 ***	1070,000 ***	152,22 ***	12346,00 ***	11016,40 ***
Cl x I	25	31,97 ***	0,56 ***	0,50 ***	2,15 ***	46,77 ***	11,47 *	24,40 ***	0,0150 ns	0,007 ns	24,82 ***	90,65 ***	355,70 ns
Cl d/ I2	5	29,14 ***	0,56 ***	2,10 ***	5,73 ***	75,84 ***	53,24 ***	43,33 ***	0,0023 ns	0,002 ns	44,50 ***	219,83 ***	106,66 ns
Cl d/ I3	5	24,74 ***	0,65 ***	0,65 ***	0,352 ns	37,73 *	0,68 ns	170,92 ***	0,0031 ns	0,006 ns	171,26 ***	319,08 ***	1723,86 **
Cl d/ I4	5	54,26 ***	0,59 ***	0,21 ***	0,774 ns	77,99 ***	2,61 ns	103,86 ***	0,0016 ns	0,000 ns	103,29 ***	180,24 ***	507,61 ns
Cl d/ I5	5	80,34 ***	1,57 ***	0,10 ns	4,92 **	95,01 ***	2,07 ns	97,47 ***	0,0800 *	0,016 ns	96,53 ***	237,19 ***	642,08 ns
Cl d/ I6	5	94,19 ***	3,57 ***	0,47 ***	2,37 ns	95,51 ***	3,64 ns	33,80 ***	0,0140 ns	0,023 ns	32,88 ***	103,61 ***	624,37 ns
Erro	70	4,60	0,09	0,05	0,67	7,18	6,44	3,02	0,0230	0,010	2,97	11,77	279,90
Média		25,77	3,19	1,30	3,04	33,31	7,68	8,73	0,3700	0,210	9,30	42,62	135,23
CV (%)		8,38	9,34	18,16	27,08	8,05	33,05	19,92	41,7700	51,870	18,51	8,05	12,37

LH: lenho; C: casca; F: folha; G: galho; PA: parte aérea; M: manta orgânica; RG: raiz grossa; RM: raiz média; RF: raiz fina; R: raízes; PA+R: parte aérea mais raízes; PL: planta inteira; C: cepas e MOS: matéria orgânica do solo. I2: ≈2,5 anos; I3: ≈3,5 anos; I4: ≈4,7 anos; I5: ≈5,6 anos e I6: ≈7,0 anos.

Continuação→

FV	GL	Quadrado médio		
		MOS	(PL-LH)+M+MOS+C	PA+M+C
			t ha ⁻¹	
Bloco	2	280,50 ns	113,83 *	44,27 ns
Clone (Cl)	5	879,80 **	1215,10 **	548,91 ***
Idade (I)	5	2496,10 ***	2027,10 ***	12246,60 ***
Cl x I	25	298,00 ns	329,60 ns	86,00 ***
Cl d/ I2	5	385,86 ns	195,40 ns	159,15 ***
Cl d/ I3	5	1111,80 *	1465,59 **	316,20 ***
Cl d/ I4	5	162,77 ns	313,93 ns	190,87 ***
Cl d/ I5	5	115,91 ns	386,13 ns	247,24 ***
Cl d/ I6	5	693,94 *	502,22 ns	65,46 *
Erro	70	268,30	268,30	22,10
Média		83,83	109,45	49,50
CV (%)		19,54	14,97	9,50

ns, *, **, *** - não significativo (p > 5%), significativo a p < 5, 1 e 0,1%, respectivamente

Quadro 4. Análise de variância para os estoques de C na MOS para as seis profundidades estudadas (0-20; 20-40; 40-60; 60-80; 80-100; 100-120 cm) e total (0-120 cm), durante o crescimento (I) de cinco clones (Cl) de eucalipto em sistema de talhadia (1 RB) ou reforma com mudas originadas de estaquia (1 RF, 2 RF, 3 RF, 4 RF) e semente (5 RFS) na região litorânea do estado do Espírito Santo.

FV	GL	Quadrado médio						
		0-120	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120
		t ha ⁻¹						
Bloco	2	280,50 ns	148,10 ns	26,00 ns	23,15 ns	67,07 **	29,69 **	32,79 ns
Clone (Cl)	5	879,80 **	148,40 ns	31,10 ns	22,80 ns	48,15 **	4,46 ns	9,03 ns
Idade (I)	5	2496,10 ***	583,30 ***	456,88 ***	158,69 ***	468,55 ***	46,52 ***	49,90 ***
Cl x I	25	298,00 ns	36,97 ns	40,72 ns	14,89 ns	20,98 ns	5,64 ns	2,83 ns
Cl d/ I2	5	385,86 ns	39,81 ns	83,63 *	0,00 ns	102,37 ***	9,18 ns	8,51 ns
Cl d/ I3	5	1111,79 *	84,77 ns	52,49 *	57,60 **	31,90 ns	9,40 ns	8,21 ns
Cl d/ I4	5	162,77 ns	86,53 ns	7,42 ns	1,26 ns	4,55 ns	0,17 ns	0,46 ns
Cl d/ I5	5	115,91 ns	77,10 ns	13,19 ns	2,42 ns	1,29 ns	2,29 ns	0,68 ns
Cl d/ I6	5	693,94 *	45,04 ns	77,99 *	35,99 *	12,90 ns	11,61 *	5,30 ns
Erro	70	268,30	71,24	20,46	11,24	13,38	4,64	4,02
Média		83,83	33,26	19,20	10,90	10,64	6,02	5,20
CV (%)		19,54	25,38	23,55	30,74	34,37	35,73	38,54

ns, *, **, *** - não significativo ($p > 5\%$), significativo a $p < 5, 1$ e $0,1\%$, respectivamente

ANALISE DE VARIÂNCIA PARA OS RESULTADOS OBTIDOS NOS CAPÍTULO II, III e IV

Quadro 1. Análise de variância para as estimativas de matéria seca total (MS), dos resíduos grossos (RG) e dos resíduos finos (RF), teores de C, N, lignina (VSC), carboidratos totais, relações ácidos/aldeídos dos grupamentos vanilil - (Ac/Al)v e siringil - (Ac/Al)s, VSC/N, C/N e Carb/VSC em amostras de serapilheira coletadas nas três regiões localizadas no Norte do Estado do Espírito Santo.

FV	GL	MS	GG	F	VSC	(Ac/Al)v		(Ac/Al)s		Carboidratos		H/P	C	N	VSC/N	C/N	VSC/Carb
						-g kg ⁻¹ -		-g g ⁻¹ -		-g kg ⁻¹ -		-g g ⁻¹ -	-dag kg ⁻¹ -		-g g ⁻¹ -		
Capítulo II																	
Bloco	2				41,8 ns	0,0013 ns	0,00015 ns			38053,1 ***	0,0052 ns		5,17 ns	0,0048 ns	3,2 ns	386,8 ns	0,00150 ns
Trats	2				2701,0 ***	0,0035 ns	0,08840 ***			46493,7 ***	0,0740 **		103,86 **	0,3990 **	1493,0 ***	40653,2 ***	0,00430 *
Erro	4				54,3	0,0021	0,00002			293,0	0,0025		2,25	0,0088	8,8	206,2	0,00029
Média					48127,0	0,2700	0,32000			544,3	0,2560		47,01	0,5970	17,1	125,9	0,08600
CV (%)					15,3	16,7600	1,44000			3,1	19,4800		3,19	15,7700	17,3	11,4	19,78000
Capítulo III																	
Bloco	2	1,4 ns	8,6 ns	8,6 ns	58,1 ns	0,0006 ns	0,0002 ns			2087,2 ns	0,0125 ns		0,79 ns	0,0001 ns	9,2 ns	111,2 ns	0,00056 ns
Trats	3	220,0 *	459,6 *	459,6 *	3618,4 ***	0,0027 **	0,0009 ns			64731,5 ***	0,0638 **		14,52 **	0,4374 ***	2268,4 ***	46673,3 ***	0,00990 **
Erro	6	23,8	17,2	17,2	45,5	0,0002	0,0008			1327,9	0,0034		0,77	0,0093	22,0	156,4	0,00020
Média		18,6	48,2	51,8	59,4	0,2700	0,1800			496,5	0,2750		50,22	0,5020	27,5	171,4	0,11600
CV (%)		26,2	8,0	8,6	11,4	4,9300	15,7800			7,3	21,1700		2,00	19,2200	17,1	7,3	12,35000
Capítulo IV																	
Bloco	2	1,8 ns	140,8 ns	140,8 ns	140,2 ns	0,0013 ns	0,00015 ns			3011,9 ns	0,0095 ns		0,51 ns	0,0260 ns	56,5 ns	983,5 ns	0,00055 ns
Trats	7	2240,1 ***	2015,6 **	2015,6 **	2111,1 ***	0,0350 **	0,08840 ***			55724,5 ***	0,0720 ***		4920,00 *	0,7550 ***	446,7 ***	16425,0 ***	0,00220 **
Erro	14	7,7	116,9	116,9	79,1	0,0021	0,00002			3655,4	0,9700		1,76	0,0140	31,5	1026,9	0,00025
Média		27,9	45,4	54,6	52,0	0,2700	0,32000			489,6	0,3100		48,16	0,8650	11,2	89,3	0,10200
CV (%)		10,0	23,8	19,8	17,1	16,7600	1,44000			12,4	31,8200		2,75	13,8200	50,0	35,9	15,56000

ns, *, **, *** - não significativo ($p > 5\%$), significativo a $p < 5, 1$ e $0,1\%$, respectivamente.

Quadro 2. Análise de variância para as estimativas de teores totais de C orgânico, N total, lignina (VSC), carboidratos, aminoaçúcares e, relações VSC/N, C/N e Carb/VSC em amostras de solo coletadas nas três regiões localizadas no norte do Estado do Espírito Santo.

FV	GL	Quadrado Médio							
		C	N	VSC	Carboidratos	Aminoaçúcares	VSC/N	C/N	
		g kg ⁻¹			mg kg ⁻¹			g g ⁻¹	
Capítulo II									
Bloco	2	13,03 ns	0,0809 ns	93,74 ns	191586,7 ns	4089,8 ns	0,0004 ns	0,34 ns	
Trats	2	17,63 *	0,0005 ns	273,37 ns	2500287,0 **	17928,3 ns	0,0004 ns	12,58 ns	
Erro	4	2,54	0,0633	132,11	98663,0	3454,8	0,0004	9,27	
Média		14,09	1,1600	129,09	4892,9	361,2	0,1100	12,40	
CV(%)		11,32	21,7000	8,90	6,42	16,2	17,6000	24,57	
Capítulo III									
Bloco	2	0,50 ns	0,0070 ns	23,39 ns	12652,4 ns	243,7 ns	0,0008 ns	1,31 ns	
Trats	3	23,65 ***	0,3750 **	1212,00 **	2843415,0 ***	8291,5 ns	0,0054 *	6,95 ns	
Erro	6	0,93	0,0270	71,910	77140,9	4146,3	0,0010	8,65	
Média		9,94	0,9100	104,84	3330,8	337,3	0,1300	11,54	
CV(%)		9,68	18,2100	8,09	8,3	19,0	6,0600	25,48	
Capítulo IV									
Bloco	2	9,25 **	0,0940 ns	657,81 ns	609147,3 ns	4539,6 ns	0,0013 ns	6,95 ns	
Trats	3	41,60 ***	0,1500 *	3936,99 **	1601699,0 **	15517,1 *	0,0018 *	8,12 ns	
Erro	6	0,51	0,0210	247,47	185325,2	1806,2	0,0003	3,98	
Média		12,82	1,0600	113,33	4014,3	393,3	0,1100	12,19	
CV(%)		5,60	13,5800	13,08	10,7	10,8	15,9400	16,37	

ns, *, **, *** - não significativo (p > 5 %), significativo a p < 5, 1 e 0,1 %, respectivamente

Quadro 3. Análise de variância para as estimativas de teores de fenóis derivados da lignina (VSC) e relações ácido/aldeído dos grupamentos vanilil - (Ac/Al)v e siringil - (Ac/Al)s em amostras de serapilheira e solo coletados na pastagem em comparação com eucalipto localizado no Norte do Estado do Espírito Santo.

FV	GL	Quadrado médio (Região 1)															
		AG	AL	SG	VL	AS	AV	AF	AC	Vanilil	Siringil	Cinamil	VSC	(Ac/Al)v	(Ac/Al)s		
-----Serapilheira (g kg ⁻¹)-----																	
Bloco	2	9,74 ns	0,014 ns	3,47 ns	0,95 ns	0,52 ns	0,05 ns	0,73 ns	0,18 ns	1,25 ns	11,75 ns	1,58 ns	41,8 ns	0,0013 ns	0,00015 ns		
Trats	2	35,86 ns	0,037 ns	542,32 **	17,44 *	5,49 *	0,52 *	30,16 *	106,01 ***	22,05 *	572,71 *	249,29 **	2701,0 ***	0,0035 ns	0,08840 ***		
Erro	4	16,29	0,045	1,45	2,23	0,11	0,01	1,09	0,08	2,71	19,03	1,74	54,3	0,0021	0,00002		
Média		6,55	1,350	21,74	6,14	4,37	1,61	3,38	5,19	8,56	33,18	6,37	48127,0	0,2700	0,32000		
CV(%)		51,68	15,800	7,00	24,33	7,61	6,63	30,87	5,52	18,1	15,49	15,43	15,3	16,7600	1,44000		
-----Solo (mg kg ⁻¹)-----																	
Bloco	2	1,77 ns	1,660 ns	3,33 ns	5,11 ns	6,27 ns	38,82 ns	5,73 ns	0,93 ns	61,56 ns	17,41 ns	2,04 ns	93,74 ns	0,0170 ns	0,10200 ns		
Trats	1	29,38 *	19,580 ns	12,44 ns	8,41 ns	0,22 ns	27,26 *	61,01 *	5,01 ns	19,48 ns	85,33 **	99,05 **	273,37 ns	1,0020 ns	0,06800 ns		
Erro	2	2,61	12,480	9,75	1,29	7,11	23,29	4,83	7,18	49,14	4,51	20,96	132,11	0,5210	0,17700		
Média		12,00	16,700	16,60	9,30	20,70	28,90	13,50	11,40	54,91	49,21	24,96	129,10	3,1900	1,30000		
CV(%)		13,50	21,200	18,80	12,20	12,90	16,70	16,20	23,40	12,76	4,32	18,34	8,90	22,6400	32,39000		

ns, *, **, *** - não significativo ($p > 5\%$), significativo a $p < 5, 1$ e $0,1\%$, respectivamente. AG: acetosiringona; AL: acetovanilona; SG: siringaldeído; VL: vanilina; AS: ácido siríngico; AV: ácido vanílico; AF: ácido ferúlico e AC: ácido *p*-coumárico.

Quadro 4. Análise de variância para as estimativas de teores de fenóis derivados da lignina (VSC) e relações ácido/aldeído dos grupamentos vanilil - (Ac/Al)v e siringil - (Ac/Al)s em amostras de serapilheira e solo coletado na área de eucalipto convencional comparado com eucalipto irrigado e fertilizado (fertirrigado) localizado no Norte do Estado do Espírito Santo.

FV	GL	Quadrado médio (Região 2)																											
		AG	AL	SG	VL	AS	AV	AF	AC	Vanilil	Siringil	Cinamil	VSC	(Ac/Al)v	(Ac/Al)s														
-----Serapilheira (g kg ⁻¹)-----																													
Bloco	2	1,15	ns	0,069	ns	7,32	ns	0,844	ns	0,950	ns	0,131	ns	0,033	ns	0,091	ns	1,995	ns	22,31	ns	0,104	ns	58,1	ns	0,0006	ns	0,0002	ns
Trats	1	50,01	**	0,298	ns	2080,56	***	7,220	*	32,680	**	0,067	ns	0,832	**	0,754	*	12,930	*	3403,51	***	3,050	***	3618,4	***	0,0027	**	0,0009	ns
Erro	2	1,22		0,110		14,56		1,300		1,180		0,072		0,019		0,083		2,050		28,06		0,112		45,5		0,0002		0,0008	
Média		7,14		1,610		35,01		5,730		6,320		1,570		0,990		0,900		8,920		48,58		1,900		59,4		0,2700		0,1800	
CV(%)		15,00		20,620		10,89		20,000		17,230		17,130		14,430		31,840		16,000		11,00		18,190		11,4		4,9300		15,7800	
-----Solo (mg kg ⁻¹)-----																													
Bloco	2	1,290	ns	7,030	ns	4,52	ns	3,810	ns	0,45	ns	2,860	ns	6,160	ns	0,840	ns	21,320	ns	9,91	ns	8,860	ns	23,39	ns	0,9560	ns	0,0630	ns
Trats	3	11,530	**	30,990	*	16,89	ns	5,580	ns	49,7	*	131,910	*	48,500	***	16,720	**	230,830	*	180,40	**	114,990	**	1212,02	**	2,3880	*	0,1650	*
Erro	6	0,700		3,560		5,44		2,710		5,67		17,070		1,950		1,440		31,530		15,22		5,470		71,91		0,4140		0,0260	
Média		8,600		14,600		14,20		7,600		18,50		22,700		10,900		7,800		44,820		41,30		18,710		104,80		3,0900		1,3200	
CV(%)		9,700		12,900		16,40		21,800		12,90		18,200		12,800		15,400		12,530		9,45		12,510		8,10		20,8100		12,4400	

ns, *, **, *** - não significativo ($P > 5\%$), significativo a $P < 5, 1$ e $0,1\%$, respectivamente. AG: acetosiringona; AL: acetovanilona; SG: siringaldeído; VL: vanilina; AS: ácido siríngico; AV: ácido vanílico; AF: ácido ferúlico e AC: ácido *p*-coumárico.

Quadro 5. Análise de variância para as estimativas de teores de fenóis derivados da lignina (VSC) e relações ácido/aldeído dos grupamentos vanilil - (Ac/Al)v e siringil - (Ac/Al)s, em amostras de serapilheira e solo coletado na área de mata nativa (MN), eucalipto de rotação longa (E24), acácia (A) e eucalipto de rotação curta (E7), localizados no Norte do Estado do Espírito Santo.

FV	GL	Quadrado médio (Região 3)																											
		AG	AL	SG	VL	AS	AV	AF	AC	Vanilil	Siringil	Cinamil	VSC	(Ac/Al)v	(Ac/Al)s														
-----Serapilheira (g kg ⁻¹)-----																													
Bloco	2	4,77	ns	0,03	ns	28,03	ns	4,07	ns	2,41	ns	0,25	ns	0,0004	ns	0,09	ns	6,14	ns	72,89	ns	0,850	ns	140,2	ns	0,0013	ns	0,00015	ns
Trats	7	51,05	*	1,90	***	1063,38	***	38,28	**	27,31	***	3,16	***	0,2860	***	0,80	*	84,76	***	1988,77	***	1,760	*	2111,1	***	0,0350	**	0,08840	***
Erro	14	11,36		0,19		24,07		1,60		1,50		0,12		0,0210		0,14		2,78		69,82		0,199		79,1		0,0021		0,00002	
Média		7,39		2,51		24,30		8,99		5,28		2,53		0,8900		1,10		13,13		36,89		1,990		52,0		0,2700		0,32000	
CV(%)		45,00		18,00		20,00		15,00		24,00		14,60		21,3100		33,79		12,64		23,00		23,000		17,1		16,7600		1,44000	
-----Solo (mg kg ⁻¹)-----																													
Bloco	2	14,90	ns	2,68	ns	16,03	ns	4,91	ns	11,67	ns	77,21	ns	42,4600	ns	4,45	ns	124,8	ns	122,37	ns	49,83	ns	657,80	ns	0,4750	ns	0,0120	ns
Trats	3	29,21	ns	86,76	***	52,60	**	19,64	*	45,58	*	611,37	**	143,8600	*	47,50	*	1172,6	***	253,75	ns	280,79	**	3936,90	**	1,7870	*	0,0330	ns
Erro	6	12,32		2,66		4,68		2,09		5,34		32,81		17,8900		7,58		41,3		56,61		25,58		247,40		0,3100		0,0100	
Média		8,70		16,00		13,60		11,70		13,40		28,00		11,8000		10,30		55,64		35,58		22,10		113,30		2,3300		0,9900	
CV(%)		40,60		10,20		16,00		12,40		17,30		20,50		35,7000		26,80		11,62		21,14		28,88		13,90		23,9100		10,3700	

ns, *, **, *** - não significativo ($p > 5\%$), significativo a $p < 5, 1$ e $0,1\%$, respectivamente. AG: acetosiringona; AL: acetovanilona; SG: siringaldeído; VL: vanilina; AS: ácido siríngico; AV: ácido vanílico; AF: ácido ferúlico e AC: ácido *p*-coumárico.

Quadro 6. Análise de variância para as estimativas de teores de carboidratos e relações hexose/pentose (H/P) em amostras de serapilheira e solo coletadas na pastagem comparada com eucalipto localizado no Norte do estado do Espírito Santo.

FV	GL	Quadrado médio											H/P
		Sorbitol	Manitol	Arabinose	Galactose	Glicose	Manose	Xilose	Frutose	TOTAL			
-----Serapilheira (g kg ⁻¹)-----													
Bloco	2	0,15 ns	0,02 ns	60,2 ns	12,5 ns	6425,9 ns	1519,4 ns	100,4 ns	355,5 *	38053,1 ***	0,0052 ns		
Trats	2	14,90 **	27,06 *	386,4 *	11,8 ns	8481,5 **	18130,1 *	25,6 ns	995,6 ns	46493,7 ***	0,0740 **		
Erro	4	0,67	2,47	25,7	27,7	387,8	319,7	46,3	177,9	293,0	0,0025		
Média		3,53	5,00	25,6	23,3	267,4	159,6	14,3	45,5	544,3	0,2560		
CV(%)		23,23	31,44	19,6	22,7	9,1	11,2	50,0	29,3	3,1	19,4800		
-----Solo (mg kg ⁻¹)-----													
Bloco	2	951,80 ns	541,30 ns	41453,6 *	14306,9 *	40498,4 ns	5267,3 ns	1186,5 ns		191586,7 ns	0,0029 ns		
Trats	1	16114,60 *	381,60 ns	1581,7 ns	67381,1 **	174321,3 ns	239648,8 ***	76885,2 ns		2500287,0 **	0,1515 *		
Erro	2	951,80	217,20	3848,4	1418,2	67658,9	2175,7	21767,2		98663,0	0,0085		
Média		42,31	84,90	718,2	469,5	2551,0	568,3	458,6		4892,9	0,8700		
CV(%)		72,90	17,36	8,6	8,0	10,2	8,2	32,2		6,4	10,6400		

ns, *, **, *** - não significativo ($p > 5\%$), significativo a $p < 5, 1$ e $0,1\%$, respectivamente.

Quadro 7. Análise de variância para as estimativas de teores de carboidratos e relações hexose/pentose (H/P) em amostras de serapilheira e solo coletadas no eucalipto convencional comparada com eucalipto irrigado e fertilizado (fertirrigado) localizado no Norte do estado do Espírito Santo.

FV	GL	Quadrado médio										
		Sorbitol	Manitol	Arabinose	Galactose	Glicose	Manose	Xilose	Frutose	TOTAL	H/P	
-----Serapilheira (g kg ⁻¹)-----												
Bloco	2	0,4 ns	0,3 ns	10,7 **	21,0 ns	3432,6 ns	912,4 ns	35,7 ns	48,8 ns	2087,2 ns	0,0125 ns	
Trats	3	21,1 ***	52,9 *	26,7 **	19,0 ns	15842,0 *	10755,7 ***	46,7 **	2986,0 **	64731,5 ***	0,0638 **	
Erro	6	0,6	13,3	0,1	19,0	2624,6	80,6	3,6	94,5	1327,9	0,0034	
Média		2,4	4,6	18,5	23,3	241,1	134,0	18,5	53,4	496,5	0,2750	
CV(%)		29,0	33,0	1,3	19,1	21,2	7,2	10,6	18,0	7,3	21,1700	
-----Solo (mg kg ⁻¹)-----												
Bloco	2		933,70 ns	27398,2 ns	1526,4 ns	41880,6 ns	468,6 ns	770,1 ns		12652,4 ns	0,0148 ns	
Trats	1		1603,50 ns	162544,8 ***	47935,1 **	678341,5 ***	33409,4 ***	11340,2 *		2843415,0 ***	0,0191 ns	
Erro	2		461,70	4791,9	3350,8	27392,7	682,5	1216,6		77140,9	0,0093	
Média			76,32	617,5	374,18	1837,7	208,5	216,6		3330,8	0,7000	
CV(%)			28,15	11,2	15,47	9,1	12,5	16,1		8,3	13,7600	

ns, *, **, *** - não significativo (p > 5 %), significativo a p < 5, 1 e 0,1 %, respectivamente.

Quadro 8. Análise de variância para as estimativas de teores de carboidratos e relações hexose/pentose (H/P) em amostras de serapilheira e solo coletadas na mata nativa (MN), eucalipto de rotação longa (E24), acácia (A) e eucalipto de rotação curta (E7), localizados no Norte do estado do Espírito Santo.

FV	GL	Quadrado médio										
		Sorbitol	Manitol	Arabinose	Galactose	Glicose	Manose	Xilose	Frutose	TOTAL	H/P	
-----Serapilheira (g kg ⁻¹)-----												
Bloco	2	0,0 ns	2,2 ns	2,6 ns	1,6 ns	1046,4 ns	87,1 ns	8,2 ns	38,3 ns	3011,9 ns	0,0095 ns	
Trats	7	2,7 **	10,6 *	70,7 *	59,8 ns	18087,7 ***	8534,5 **	91,0 ns	499,9 *	55724,5 ***	0,0720 ***	
Erro	14	0,2	0,4	19,0	27,7	1853,6	201,1	53,0	133,0	3655,4	0,9700	
Média		1,1	4,2	19,5	21,5	268,6	114,5	16,2	45,3	489,6	0,3100	
CV(%)		43,4	16,3	22,3	24,8	15,7	11,9	48,2	25,5	12,4	31,8200	
-----Solo (mg kg ⁻¹)-----												
Bloco	2		786,2 ns	20483,7 ns	18421,2 ns	161276,9 ns	16974,9 ns	633,3 ns		609147,3 ns	0,0500 ns	
Trats	3		1071,7 ns	33569,9 ns	47600,4 **	571694,5 *	20535,7 ns	1802,7 ns		1601699,0 *	0,0560 ns	
Erro	6		259,7	10989,9	2793,0	109368,6	4732,9	1004,2		185325,2	0,0140	
Média			103,1	672,9	526,0	2192,3	350,0	170,0		4014,3	1,0400	
CV(%)			15,6	15,6	10,1	15,1	19,7	18,6		10,7	11,5800	

ns, *, **, *** - não significativo ($p > 5\%$), significativo a $p < 5, 1$ e $0,1\%$, respectivamente.

Quadro 9. Análise de variância para as estimativas de teores de aminoaçúcares derivados da atividade microbiana no solo e relações entre glucosamina/galactosamina (Gluc/Galac) e glucosamina/Ác. Murâmico (Gluc/Ac. mur)

FV	GL	Quadrado médio											
		Glucosamina		Galactosamina		Ácido Mururâmico		Total	Gluc/Galac	Gluc/Ac. mur			
-----Capítulo II (mg kg ⁻¹)-----													
Bloco	2	2256,4	ns	268,0	ns	2,0	ns	4089,8	ns	0,104	ns	29,8	ns
Trats	2	13984,6	*	221,5	ns	11,0	ns	17928,3	ns	0,832	ns	34,7	ns
Erro	4	1535,7		650,6		1,8		3454,8		0,193		79,6	
Média		247,8		106,6		6,8		361,3		2,340		37,0	
CV (%)		15,8		23,9		19,3		16,3		18,840		24,1	
-----Capítulo III (mg kg ⁻¹)-----													
Bloco	2	105,8	ns	92,3	ns	0,6	ns	243,7	ns	0,051	ns	32,8	ns
Trats	3	2906,4	ns	1872,4	ns	14,3	*	8291,5	ns	0,354	ns	511,9	**
Erro	6	2181,9		442,5		0,5		4146,3		0,133		36,9	
Média		219,2		111,9		6,2		337,3		2,010		38,7	
CV (%)		21,3		18,8		19,8		19,1		18,150		15,7	
-----Capítulo IV (mg kg ⁻¹)-----													
Bloco	2	1706,5	ns	950,2	ns	6,6	*	4539,6	ns	0,281	ns	452,2	**
Trats	3	7447,4	*	1134,4	*	34,7	***	15517,1	*	0,010	ns	796,0	***
Erro	6	904,1		207,6		0,7		1806,2		0,062		37,4	
Média		276,4		110,7		6,2		393,4		2,530		51,6	
CV (%)		10,9		13,0		13,0		10,8		9,880		11,9	

ns, *, **, *** - não significativo ($p > 5\%$), significativo a $p < 5, 1$ e $0,1\%$, respectivamente.