

ALCIDES GATTO

**ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO E NA BIOMASSA
DE PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO NA REGIÃO
CENTRO-LESTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS**

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
2005

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

T

G263e
2005

Gatto, Alcides, 1969-

Estoques de carbono no solo e na biomassa de
plantações de eucalipto na região Centro-Leste do Estado
de Minas Gerais / Alcides Gatto. – Viçosa : UFV, 2005.
xiii, 73f. : il. ; 29cm.

Orientador: Nairam Félix de Barros.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 64-73.

1. Solos - Teor de carbono - Análise. 2. Biomassa
vegetal. 3. Ciclo do carbono (Biogeoquímica). 4. Ecologia
florestal. 5. Energia da biomassa. 6. Eucalipto.

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

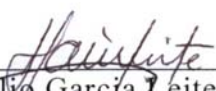
CDD 22.ed. 631.417

ALCIDES GATTO

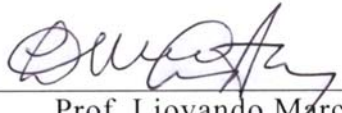
**ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO E NA BIOMASSA
DE PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO NA REGIÃO
CENTRO-LESTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS**

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: 31 de outubro de 2005.



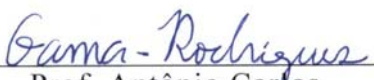
Prof. Helio Garcia Leite
(Conselheiro)



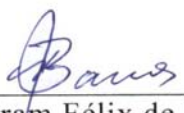
Prof. Liovano Marciano
da Costa



Prof. Ivo Ribeiro da Silva



Prof. Antônio Carlos
da Gama-Rodrigues



Prof. Nairam Félix de Barros
(Orientador)

Aos meus pais, *Hilário Luiz Gatto e Remirez Zenilde Castellani Gatto*, e aos meus irmãos: *Alférico, Gloria Maria, Vera Lucia, Isabel, José Carlos, Lourdes, Inês Jaqueline, Simone e Claudia Cristina*, pelo amor e incentivo, que contribuíram para que eu superasse mais esta etapa na defesa desta Tese, bem como vencesse outros tantos obstáculos no percurso de minha vida.

Dedico.

“Mestre não é quem sempre ensina, mas quem de repente aprende”.

(Guimarães Rosa)

“De cada dez pessoas que encontramos, nove são o que são, isto é, bons ou maus, úteis ou inúteis, por causa de sua educação. É ela que produz as grandes diferenças entre os homens”.

(John Locke)

“Queres saber? Estuda. Queres saber mais? Escolhe um bom mestre. Queres saber melhor ainda? Ensina aos outros o que aprendeste”.

(Chiara Lubich)

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende”.

(Leonardo da Vinci)

“Para mais longe aonde não chegue a ambição de chegar”.

(Guimarães Rosa)

“Todas as coisas têm seu tempo e todas elas passam debaixo do céu, segundo o tempo que a cada uma foi prescrito”.

(Eclesiastes)

“Tentamos proteger a árvore, esquecidos de que é ela que nos protege”.

(Carlos Drummond de Andrade)

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao povo brasileiro e aos cidadãos viçosenses que, por diversas razões, não galgaram o privilégio de estudar e aperfeiçoar-se; desejo homenageá-los e contribuir, no que for possível, para reverter tal situação.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de minha formação como Pesquisador e, principalmente, como Ser Humano.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

Ao orientador Professor Nairam Félix de Barros, do Departamento de Solos, pela orientação durante o meu mestrado e doutorado, bem como pela capacidade de pôr a teoria em prática.

Ao Professor Roberto Ferreira de Novais, do Departamento de Solos, por propiciar o despertar de minha consciência de que ciência não é apenas o desenvolvimento de pesquisa científica, mas, sobretudo, é cultura e arte.

Ao Professor Júlio César Lima Neves, do Departamento de Solos, pela fértil imaginação e capacidade de agregar os conhecimentos de forma tal, que as dificuldades inerentes ao aprendizado se tornam mais claras ao entendimento.

Ao Professor Hélio Garcia Leite, do Departamento de Engenharia Florestal, pelo seu dinamismo e capacidade de transformar os problemas em soluções.

Aos professores dos Departamentos de Solos e de Engenharia Florestal da UFV, que muito me ensinaram durante minha formação acadêmica e, sobretudo, em relação à Vida.

A todos os funcionários do Departamento de Solos, pelo companheirismo, presteza e dedicação para execução dos trabalhos laboratoriais e pelo ótimo convívio que me proporcionaram, dentre os quais destaco: José Luiz Teixeira, José Alberto Cardoso, Geraldo Vitor Teixeira Filho, José Roberto Valente, José Roberto de Freitas e Luciana de Castro Freitas, secretária da Pós-Graduação.

Aos amigos Adelião Cargin, Beno Wendling, Fábio Zanatta, Ivar Wendling, José Raimundo Silva Costa, Luciano Manfroi, Marcos Coutinho Pellegrini, Renato Macedo Filho, Rodinei Facco Pegoraro e Valdinei Sofiatti e aos casais Gilmar do Amaral e Elda Raquel Vargas de Oliveira, Valmir e Maira Sartor, Roberto e Gislaine Orlando, com quem tive a oportunidade de partilhar nossas vidas.

Especial agradecimento a Ecila Albuquerque Villani e Marle Brito de Lima, duas amigas que admiro muitíssimo, pois, ainda que passando por lutas pessoais, tiveram a grandeza de caráter de compartilhar comigo parte de seus preciosos tempos.

Por fim, a todas as pessoas que, apesar de aqui não citadas, contribuíram de alguma forma durante essa trajetória.

Meus sinceros agradecimentos.

BIOGRAFIA

ALCIDES GATTO, sétimo filho do casal Hilário Luiz Gatto e Remirez Zenilde Castellani Gatto, nasceu em São Domingos do Sul - RS, em 10 de novembro de 1969.

Cursou o primeiro e segundo graus na Escola Estadual Frederico Benvegnú, em São Domingos do Sul - RS.

Graduou-se em Engenharia Florestal em janeiro de 1997, na Universidade Federal de Santa Maria - RS.

Obteve os títulos de *Magister Scientiae*, em Ciência Florestal, e *Doctor Scientiae*, em Solos e Nutrição de Plantas, em 1999 e 2005, respectivamente, na Universidade Federal de Viçosa - MG.

Atuou como Instrutor Técnico do Centro Mineiro para Conservação da Natureza - CMCN e do Serviço Nacional de Aprendizagem Rural - SENAR, na Capacitação e Formação Profissional Rural no Estado de Minas Gerais, no período de 1999 a 2002.

A partir de junho de 2004, presta serviços técnicos especializados ao Ministério do Meio Ambiente - MMA, em Brasília, trabalhando no Fundo Nacional do Meio Ambiente - FNMA, em ações que visam à implementação da Política Nacional do Meio Ambiente.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	ix
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Ciclo do carbono	3
2.1.1. Dinâmica do carbono orgânico no solo	5
2.1.2. Entrada e componentes do carbono orgânico do solo	10
2.1.3. Estoque de carbono na biomassa de plantações florestais.....	11
2.1.3.1. Biomassa da parte aérea.....	13
2.1.3.2. Biomassa de raízes.....	15
2.2. Potencial das plantações florestais na fixação de carbono	15
2.3. Estimativas dos estoques de carbono no sistema solo-biomassa	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1. Caracterização geral da área.....	19
3.2. Métodos de determinação do carbono do solo	22
3.2.1. Método Walkley-Black (WB)	23
3.2.2. Método Yeomans & Bremner (YB)	24
3.2.3. Método por combustão seca (CHNS/O).....	25

3.3. Estoque de carbono no solo.....	25
3.4. Estoque de carbono no solo e características edafoclimáticas	26
3.5. Estoque de carbono na biomassa.....	27
3.6. Estoque de carbono total no sistema solo-biomassa	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1. Métodos de determinação do carbono do solo	30
4.2. Estoque de carbono no solo.....	35
4.3. Estoque de carbono no solo e características edafoclimáticas	46
4.4. Estoque de carbono na biomassa.....	51
4.5. Estoque de carbono total no sistema solo-biomassa	59
5. CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

RESUMO

GATTO, Alcides, D.S., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2005.
Estoques de carbono no solo e na biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais.
Orientador: Nairam Félix de Barros. Conselheiros: Roberto Ferreira de Novais e Hélio Garcia Leite.

Os ecossistemas florestais representam uma alternativa viável para mitigar o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, via fixação do C pelas árvores e seu armazenamento na biomassa e no solo como matéria orgânica. A quantificação do carbono (C) imobilizado nesses sistemas é uma das principais necessidades na região Tropical. Este trabalho teve como objetivo comparar três métodos analíticos de determinação do carbono do solo e estimar o estoque de carbono no solo e na biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais, abrangendo cinco regiões: Cocais (CO), Rio Doce (RD), Sabinópolis (SA), Santa Bárbara (SB) e Virginópolis (VI). Foram comparados três métodos de determinação de carbono do solo: Walkley-Black, Yeomans & Bremner e combustão seca (CHNS/O), utilizando amostras de diferentes classes e profundidades de solo, a fim de estimar o

estoque de carbono no solo. Avaliaram-se, também, a biomassa e o estoque de C orgânico dos componentes das árvores (parte aérea e raízes) e da manta orgânica depositada sobre o solo. Foi calculado o estoque de C no solo até 100 cm de profundidade em plantações de eucalipto implantadas em áreas com predomínio de seis classes de solo: Cambissolo Háplico (CX), Latossolo Amarelo (LA), Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Neossolo Flúvico (RU) e Plintossolo Pétrico (FF). Os resultados obtidos dos métodos de determinação de carbono correlacionam-se positiva e significativamente entre si, nas classes de solos e profundidades analisadas. Os métodos Walkley-Black e Yeomans & Bremner tenderam a subestimar os teores de C em relação ao método de referência, CHNS/O, tanto no que se refere às camadas superficiais quanto àquelas mais profundas, com menores teores de C. Quanto ao estoque de carbono no solo e à produção de biomassa, os resultados demonstraram haver diferenças entre as referidas regiões. A região mais produtiva, em termos de biomassa média anual da parte aérea e raízes, aos 84 meses de idade, foi SA, com 32,80 t/ha/ano, decrescendo nos anos subseqüentes, até atingir 31,18 t/ha/ano aos 120 meses de idade. Fato semelhante ocorreu nas regiões de RD e SB, com produtividades de 29,92 e 29,70 t/ha/ano aos 84 meses e 21,09 e 25,21 t/ha/ano aos 120 meses de idade, respectivamente. Constatou-se que a estabilização da produtividade ocorreu após 96 meses de idade em SA e aos 84 meses para as regiões de RD e SB. No tocante às regiões de CO e VI, a produtividade e o estoque de carbono médio anuais mantiveram taxas crescentes até 120 meses de idade, indicando que a maior produtividade ocorre em idades mais avançadas. Do ponto de vista biológico e econômico, o corte desses plantios deve ser prolongado até obter o incremento médio anual máximo. A produtividade e o estoque de carbono médio dessas plantações foram, respectivamente, de 26,96 t/ha/ano de biomassa e 13,64 t/ha/ano de C. No solo, o maior estoque de C ocorreu no LV, com 183,07 t/ha de C, seguido pelas classes de CX, LVA, LA, FF e RU, com 135,65, 130,95, 121,58,

112,01 e 95,08 t/ha de C, respectivamente. Já em relação ao estoque médio de C no solo por região, considerando todas as classes de solo, a região de VI foi a que mais estocou carbono, com 141,22 t/ha de C até 100 cm de profundidade, seguida pelas regiões: SA, CO, SB e RD com 135,54, 127,26, 112,89 e 80,79 t/ha de C, respectivamente. Considerando o estoque de C total no sistema solo-biomassa, aos 84 meses de idade, a região de SA foi a que apresentou maior estoque, com 251,61 t/ha, e a região de RD, o menor estoque, com 186,84 t/ha de C, reflexo das condições edafoclimáticas menos favoráveis (baixa fertilidade do solo, déficit hídrico, temperatura e altitude).

ABSTRACT

GATTO, Alcides, D.S., Universidade Federal de Viçosa, october, 2005.
Carbon storage in the soil and in the biomass of eucalypt plantations in the Central-East Region of the State of Minas Gerais, Brazil. Adviser: Nairam Felix de Barros. Committee Members: Roberto Ferreira de Novais and Hélio Garcia Leite.

Forest ecosystems represent alternatives to mitigate the increase of CO₂ in the atmosphere, by the photosynthetic process and storage of the absorbed carbon (C) in tree biomass and as soil organic matter. Forest growth rate is very high in the tropical region and forest plantations have been considered as an efficient option to reduce CO₂ concentration in the atmosphere. Eucalypt is the main forest species used for planting in Brazil, but very little information is available in the literature on the amount of carbon stored in the soil and in the biomass of these plantation forests. The main objective of this work was to compare three methods of soil carbon determination in the laboratory and to assess the amount of carbon stored in the soil and in the biomass of eucalypt plantations in the Central-East region of Minas Gerais State, Brazil. Eucalypt plantations of five micro-regions (CO, RD, SB, SA, and VI), with varying climatic and soil

conditions, were sampled for tree biomass and soil carbon down to 100 cm depth. Soil carbon content was determined by two methods of wet combustion (Walkley-Black and Yeomans & Bremner) and one of dry combustion (CHNS/O Analyser), using samples from six soil classes and different horizons. Carbon in tree components (above and below ground) and in the forest floor was estimated using allometric equations. There was a significant correlation between soil carbon content as determined by three methods tested. However, the wet combustion methods tended to underestimate carbon content as compared to the dry combustion method. The carbon stored in the soil-plant system differed among micro-regions. The highest rate of biomass production was obtained in SA ($32.80 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, at the age of 84 months, and decreased to $31.18 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ at 120 months of age) and the lowest in RD and SB (29.92 e $29.70 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, at the age of 84 months, respectively). Tree growth regime varied among micro-regions, stabilizing at age 96 months in SA and at 84 months in RD and SB, but still increasing at age of 120 months in CO and VI micro-regions. Soil carbon storage ranged from 183.1 t ha^{-1} in the Red Latosol to 95.1 t ha^{-1} in the Inceptisol, and was negatively correlated to soil K, Ca, and Mg content, because the close relation between tree biomass and nutrient uptake, and density of the soil upper layer. Soil carbon was also negatively related with mean annual temperature and water deficit and positively with elevation. As regarding to the micro-regions, VI presented the highest (141.2 t ha^{-1}) and Rd the lowest (80.8 t ha^{-1}) soil carbon storage. Considering the soil-plant ecosystem and the regular rotation age (84 months), the micro-region SA has the largest carbon storage (251.6 t ha^{-1}) and Rd the lowest (186.8 t ha^{-1}) which reflects the climatic and soil conditions for this latter site, i.e., lower soil fertility, higher water deficit and higher mean annual temperature.

1. INTRODUÇÃO

O aumento acelerado da concentração de Gases de Efeito Estufa (GEEs) na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarbono (CFC), entre outros, decorrente de atividades humanas ligadas ao consumo de combustíveis fósseis e à substituição da cobertura vegetal original, tem provocado mudanças climáticas globais e causado grande preocupação mundial quanto às conseqüências futuras.

Dentre os GEEs, o CO_2 é responsável por 49 a 67 % do fenômeno natural denominado “efeito estufa”; considerando-se o efeito conjunto do CH_4 e o N_2O , esse valor pode atingir até 88 %.

O efeito estufa é um fenômeno natural necessário ao aquecimento da superfície terrestre, a fim de proporcionar condições ambientais favoráveis à existência de vida na Terra. Contudo, a intensificação de seu efeito poderá resultar em mudanças climáticas permanentes, resultando em novos padrões no regime de ventos, na pluviosidade e na circulação dos oceanos, acarretando profundas modificações nas condições de vida. Assim, há um consenso mundial de que estratégias devem ser estudadas e empregadas a fim de reduzir a concentração de GEEs, principalmente de CO_2 .

A partir da década de 1980 acentuou-se a preocupação dos cientistas a esse respeito, acarretando aumento considerável nas discussões e no desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao tema. Assim, alguns tratados internacionais objetivaram definir normas para a adoção de estratégias destinadas a mitigar essas possíveis mudanças climáticas. Dentre eles, destaca-se o Protocolo de Kyoto, publicado pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 1997, por convocar os países de todo o mundo, em especial os industrializados e em desenvolvimento, que se dispuseram a encontrar alternativas para a redução nas atuais taxas de emissão dos GEEs.

Diante desse contexto, o setor agroflorestal desponta como uma das alternativas viáveis para mitigar o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, via fixação do carbono (C) pelos vegetais. Nesse sentido, destacam-se os reflorestamentos com espécies de rápido crescimento em regiões tropicais como uma das mais promissoras formas de redução de CO₂ atmosférico, em virtude da alta produtividade dessas florestas.

No Brasil, o clima tropical predominante e a grande extensão territorial contribuem para que as plantações florestais de rápido crescimento apresentem altas taxas de crescimento vegetativo, acrescidos, ainda, da disponibilidade de mão-de-obra e técnicas inovadoras. Assim, o país poderá tornar-se, em curto prazo, o maior produtor mundial de madeira e subprodutos oriundos de florestas plantadas. Essas plantações, além de contribuírem para a redução da concentração de CO₂ atmosférico, geram emprego e renda ao país.

Considerando a importância do tema, são escassas as informações disponíveis em literatura a respeito dos estoques de carbono fixado pelas plantações florestais e no solo. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivos comparar três métodos de determinação do carbono do solo e estimar o estoque de carbono no solo e na biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Ciclo do carbono

O ciclo do carbono (C) pode ser dividido em longo e curto (Berner, 1996). O longo ocorre em períodos de escalas geológicas correspondentes há milhões de anos, representando o fluxo de C entre a rocha e o sistema biosfera-hidrosfera-atmosfera-solo. O referido ciclo apresenta dois subciclos: carbonato-silicatos e o da matéria orgânica do solo (MOS). O ciclo curto representa os fluxos relacionados entre a atmosfera, os oceanos, a biosfera e o solo, compreendendo um período de centenas de anos.

As atividades antrópicas podem alterar o ciclo do C de modo favorável, quando promovem a fixação de C atmosférico por meio de reflorestamento, a recuperação de áreas degradadas e a utilização de cultivos conservacionistas, ações estas que atuam de forma direta no equilíbrio entre esses componentes e o ciclo curto do C. Por sua vez, atividades que promovem redução da queima de combustíveis fósseis e utilização de fontes energéticas alternativas atuam diretamente no equilíbrio do ciclo longo do C.

O C é um elemento essencial na constituição dos seres vivos e compõe, aproximadamente, 50 % da matéria seca nas plantas. Na natureza, o C é constantemente reciclado, sendo as plantas, via fotossíntese, o elo entre o C atmosférico e o estocado no solo sob a forma de MOS.

O C estocado no solo e na vegetação corresponde de 20 a 25 % do C terrestre mundial. O C do solo é cerca de 3,3 vezes maior do que o atmosférico e 4,0 vezes maior que o estocado na biomassa terrestre (Batjes, 1998), com um tempo de permanência variável de alguns dias até milhares de anos, pelo fato de formar compostos com diferentes níveis de estabilidade com a matriz mineral do solo (Schlesinger, 1997; Wigley & Schimel, 2000; Cerri et al., 2001).

Demonstrando a importância dos estudos das interações envolvendo o ciclo do C e os ecossistemas florestais, Cooper (1983) constatou que o estoque médio de C na biomassa florestal e no solo de um ecossistema tropical é, respectivamente, de 30 e 70 % do estoque total de C no sistema (solo-biomassa).

Conforme Silva & Machado (2000), o C orgânico em sistemas não alterados por ações antrópicas é de aproximadamente 1.500 Pg (Pg = pentagrama = bilhão de toneladas) e mantém equilíbrio com o C incorporado ao solo pela senescência da vegetação e com o que é emitido para a atmosfera, via atividade respiratória da fauna e flora edáfica e da respiração pelas raízes. Além do C orgânico, solos alcalinos localizados em regiões áridas e semi-áridas contêm cerca de 1.000 Pg de C inorgânico, em minerais carbonatados.

O ciclo do C no componente terrestre pode ser dividido em três fases distintas: 1) uma fase anabólica ou de organização do CO₂ atmosférico realizada, principalmente, pelos vegetais fotossintetizantes; 2) uma fase de liberação dos produtos fotossintetizados e de seu acúmulo e estabilização no solo; e 3) uma fase de mineralização de substratos orgânicos e de transferência do CO₂ à atmosfera. A maior parte da segunda e da terceira fase ocorre no solo, constituindo o ciclo interno do C (Cerri et al., 1992).

Por desempenhar múltiplas funções no solo, o C orgânico, expresso em termos de MOS, é considerado, sob condições tropicais e subtropicais, o principal indicador de qualidade e sustentabilidade do sistema (Doran & Parkin, 1994). Desse modo, sistemas de manejo que preservem ou aumentem o seu estoque, via fixação de C, devem ser priorizados com o intuito de promover melhorias na qualidade do solo (Conceição, 2002). O aumento do estoque de C no solo resulta em melhorias significativas em suas qualidades físicas, químicas e biológicas, refletindo positivamente na produtividade e na sustentabilidade do sistema.

Todavia, o potencial de fixação e estocagem de C no solo tem influência das condições climáticas locais, do relevo, da drenagem e do tipo de manejo de solo adotado, entre outras variáveis que influenciam as taxas de aumento do C orgânico do solo (Resck et al., 1991).

Desse modo, as atividades agroflorestais, que, de alguma forma, atuam no ciclo curto do C, agem, tão-somente, de forma a atenuar o efeito estufa, que é reflexo de um desequilíbrio do ciclo longo do C, provocado, principalmente, pela queima de combustíveis fósseis. Assim, para diminuir a emissão de GEEs, faz-se necessária a redução do consumo e da queima desses combustíveis, de modo a atenuar os efeitos deletérios do agravamento do efeito estufa.

2.1.1. Dinâmica do carbono orgânico no solo

O carbono do solo provém, principalmente, da MOS e dos minerais carbonatos presentes em alguns solos de origem calcária. A MOS pode ser definida como a soma de todas as substâncias orgânicas do solo, compostas por uma mescla de resíduos animais e vegetais, em diversos estádios de decomposição. Algumas substâncias da MOS são de fácil degradação e mineralização pela fauna do solo, enquanto outras, altamente polimerizadas, como a celulose, ou de estrutura complexa, como a lignina,

são de difícil degradação, podendo permanecer por vários anos até que sejam completamente degradadas e mineralizadas. O metabolismo das fontes orgânicas varia de acordo com a estrutura dessas substâncias, a diversidade e a quantidade da fauna e flora edáfica. Essas variações traduzem-se por diferentes velocidades de ataque, degradação e mineralização, produzindo substâncias intermediárias diversas. Os produtos finais do processo são CO₂, H₂O e CH₄, em condições de anaerobiose, além dos minerais; os produtos intermediários são extremamente variáveis, desde ácidos orgânicos, aldeídos, álcoois a açúcares, que passam a fazer parte da MOS (Bayer & Mielniczuk, 1999).

A manta orgânica e a MOS sob plantações florestais têm grande importância no fornecimento de nutrientes às plantas, retenção de cátions, complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, estabilidade da estrutura, infiltração e retenção de água, aeração, na atividade microbiana, constituindo-se em componente fundamental e determinante da capacidade produtiva de solos de regiões de clima tropicais e subtropicais, altamente intemperizados (Bayer & Mielniczuk, 1999).

As mudanças de uso do solo que mais afetam o ciclo do C são o desmatamento e as queimadas de grandes áreas de florestas nativas para o cultivo do solo, associados, principalmente, à agricultura itinerante e ao processo de redução gradual dos estoques de C em área de cultivo agrícola. As regiões tropicais, em virtude de sua extensa superfície terrestre (38 %), associadas às mudanças de uso do solo, contribuem com 62,5 % da quantidade total de CO₂ liberado para a atmosfera mundialmente (The World Bank, 1991; Lal et al., 1995; Izac, 1997).

Resultados de pesquisas têm demonstrado que solos sob florestas em regiões tropicais apresentam maior potencial de dreno de C, comparativamente ao uso do solo para fins agrícolas, devido ao maior volume de biomassa depositada anualmente na forma de manta orgânica e de raízes mortas (Schroeder, 1994; Lal et al., 1995; Krishnamurthy & Ávila, 1999). As raízes são outro importante componente na adição de

C orgânico ao solo e age diretamente sobre o ciclo de nutrientes; elas representam cerca de 5 a 20 % da biomassa total produzida. Fabião et al. (1985) constataram que, em povoamentos de *Eucalyptus globulus*, em Portugal, com idades variando de 11 a 16 anos, a incorporação anual média de cerca de 6,0 t/ha de raízes finas equivalia à biomassa de folheto depositada anualmente.

Cooper (1983) assinala que a dinâmica do C em florestas manejadas é fortemente influenciada pela senescência de componentes da biomassa aérea e pela quantidade de manta orgânica acumulada sobre o solo, visto que a maioria do C (excluindo o C orgânico do solo) está presente na biomassa vegetal, e a transferência do C do solo para a atmosfera é relativamente lenta.

Em floresta natural, e mesmo sob plantações florestais, tem-se observado que a quantidade de C orgânico no solo expressa em termos de MOS, tende a ser máxima, se comparada com outras formas de uso do solo. Isso ocorre devido ao não-revolvimento, ou ao revolvimento mínimo do solo, sendo o aporte de C, nessas condições, mais elevado do que em áreas cultivadas, principalmente nas camadas superficiais do solo (Nobre & Gash, 1997; Silva & Machado, 2000). Vélez & Arango (2001) encontraram, em plantações de *Pinus patula*, 213,18 t/ha de C a 50 cm de profundidade; 65,4 % do total estava localizado nos primeiros 25 cm.

Em se tratando de áreas cultivadas, o teor de MOS tende, normalmente, a ser menor e diminuir com a profundidade, uma vez que as frações orgânicas são mais expostas ao ataque de microrganismos decompositores, em razão do maior revolvimento e desestruturação do solo (Resck et al., 1991; Nobre & Gash, 1997). Contudo, a adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo contribui para fixar e incrementar a MOS, resultando num gradativo aumento da qualidade desses solos (Amado, 1999).

Nesse sentido, Silva & Machado (2000) afirmam que a aração e a gradagem podem resultar em diminuição substancial dos estoques de

MOS, pois esses sistemas de preparo promovem grande degradação da estrutura do solo, levando à intensa perda de C e nutrientes por mineralização e erosão. Todavia, a adoção de técnicas conservacionistas de uso do solo, como o plantio direto e o cultivo mínimo, podem reduzir as perdas de MOS, pelo menor revolvimento e pela maior preservação dos resíduos vegetais em sua superfície.

Em virtude da intervenção mínima no sistema, por períodos relativamente longos, áreas sob plantações florestais sem qualquer tipo de manejo do solo (aração, gradagem, escarificação, subsolagem, queima de resíduos, entre outros), aliado ao maior sistema radicular das árvores, em termos de biomassa e volume de solo explorado, incorporam anualmente grandes quantidades de C ao solo. Nesse sentido, a comparação entre os estoques de C em diversos agroecossistemas, com o sistema natural intacto, tem sido utilizada para avaliar o papel do solo e da biomassa vegetal como agentes de emissão ou de depósito de C.

O solo poderá atuar como fonte de CO₂ para a atmosfera, ou como dreno, pelo acúmulo de C na forma de MOS (Amado & Santi, 2000). O balanço entre a entrada de CO₂, fixado na fotossíntese, e as perdas, via decomposição da MOS, é determinado pela interação de vários fatores, destacando-se o clima, o tipo de solo, a qualidade e a quantidade do material orgânico.

Em ecossistemas nativos, o clima e as características edáficas são os determinantes primários do balanço de C no sistema solo-biomassa, por controlarem as taxas de produção e decomposição da biomassa no sistema. Entretanto, em sistemas agrícolas, o uso e o manejo do solo atuam modificando tanto a entrada quanto a taxa de decomposição dos resíduos orgânicos, por meio de produção e manejo dos resíduos, seleção de cultivares, fertilização, procedimentos de colheita e métodos de preparo do solo (Silva & Resck, 1997).

Vários fatores interagem com o C do solo quando as plantações florestais são implantadas. Essas mudanças ocorrem ao longo do tempo,

alterando a quantidade, a qualidade e a entrada de resíduos orgânicos pela deposição do folheto. Posteriormente, o C é adicionado ao solo pela decomposição da manta orgânica e pelas raízes. Além disso, as capinas, os desbastes e a morte natural de plantas também adicionam C orgânico ao solo, ao longo da rotação. A taxa de queda do folheto determina a velocidade de liberação de C para a atmosfera ou, eventualmente, que entra no solo como C orgânico. Cada componente da biomassa aérea das árvores tem taxa de senescência anual diferenciada, variando com a espécie, a estação climática, a ocorrência de estresse hídrico, entre outros fatores.

A dinâmica do C orgânico no solo é influenciada pelas características edafoclimáticas locais. O clima, por exemplo, influencia a queda do folheto, que, em geral, diminui das regiões tropicais para temperadas e frias, ou seja, a taxa de queda diminui do equador para os pólos (Scott et al., 1999; Maclaren, 2000). O clima ainda influencia o acúmulo da MOS, que, em geral, aumenta para regiões com precipitação mais elevada e bem distribuída durante o ano. Entretanto, em qualquer nível de precipitação, o C orgânico no solo tende a aumentar quando a temperatura decresce (Post et al., 1982).

Fonseca (1984), ao estudar o comportamento das propriedades químicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, sob mata de eucalipto e natural, constatou que o C orgânico do solo variou com o tipo de cobertura vegetal e decresceu exponencialmente com a profundidade. Nos primeiros 10 cm de profundidade, o teor de C orgânico sob eucalipto e mata natural foi, respectivamente, de 4,5 e 5,5 %. Explicação plausível para o caso pode estar relacionada ao manejo do solo utilizado para plantio de eucalipto, o qual fragmentou e expôs a MOS, favorecendo a ação dos microrganismos, reduzindo a concentração inicial existente.

Gholz & Fisher (1982) observaram aumento da MOS nos primeiros anos após o plantio de florestas, mas esse aumento não refletia aumento líquido de C no solo para uma rotação completa (25 anos). Entretanto, o

incremento em matéria orgânica pode ser efetivo, caso não sejam queimados os resíduos provenientes da colheita nem sejam triturados ou colhidos para facilitar o trabalho de preparo do solo, tendo em vista a reforma do povoamento. Assim, a mudança das técnicas de preparo do solo e cultivo, como a não-queima dos resíduos culturais, cultivo reduzido ou mínimo e o plantio direto estão entre as técnicas que melhor preservam a MOS em áreas sob florestas plantadas (Gatto, 2000).

Nesse contexto, percebe-se que a dinâmica do C no solo depende de vários fatores, dentre os quais se destacam: a precipitação, a temperatura, a quantidade e qualidade da MOS, a rotação e os tratamentos silviculturais. O conhecimento dessa dinâmica é importante para o desenvolvimento de modelos matemáticos que predizem o comportamento do C no solo e de técnicas que visam à manutenção da sustentabilidade do solo e dos sistemas de cultivo.

2.1.2. Entrada e componentes do carbono orgânico do solo

Segundo Lal et al. (2000), existem dois tipos de entrada de C na pedosfera. O primeiro e mais importante é o C orgânico, e o segundo, o C inorgânico (CI). O CI pode ser encontrado na forma de carbonatos e bicarbonatos, enquanto o C orgânico é constituído por microrganismos, húmus estabilizado, resíduos vegetais e animais em vários estádios de decomposição e também do C inerte, constituído por carvão vegetal e, ou, carvão mineral.

A entrada de C orgânico no solo, em ecossistemas florestais, ocorre pela senescência e deposição de componentes da biomassa aérea (folhas, galhos e casca) e abaixo do solo (raízes), resíduos de exploração e animais mortos (Caldeira et al., 2002). Sua mobilidade no perfil do solo ocorre por lixiviação, e o processo que envolve o C dissolvido ainda não está bem esclarecido (Lal et al., 2000). Segundo esses autores, os processos que aumentam o estoque de C do solo são a produção de biomassa pelas

plantas, humificação, agregação e deposição de sedimentos, e os que colaboram na diminuição do estoque são a erosão e a decomposição da matéria orgânica. O balanço entre os processos que aumentam e diminuem o estoque de C é influenciado pelo uso e manejo aplicado ao solo.

O material orgânico depositado sobre o solo pela senescência dos componentes da parte aérea compõe a manta orgânica. De acordo com Reis et al. (1985), a taxa de deposição somente se estabiliza quando o povoamento atinge sua maturidade, o que varia com as condições de sítio. Constatou-se que, no início do estabelecimento de florestas naturais e plantações florestais, a produção de manta orgânica é baixa, aumentando com o passar do tempo, podendo, posteriormente, ocorrer redução quando atingir a maturidade.

No solo, o C orgânico faz parte de componentes vivos e mortos. O componente vivo – composto pelas raízes e pelos macro e microrganismos, com raras exceções – representa cerca de 4 % do C total do solo. O componente morto pode chegar até 98 % do total, podendo ser subdividido em fração leve, denominada matéria macrorrgânica, e fração pesada, que contém o húmus (Silva & Resck, 1997). Gama-Rodrigues (1999) destaca que, dentre os componentes orgânicos do solo, a biomassa microbiana, contendo em média de 2 a 5 % do C orgânico do solo, tem sido usada em estudos do fluxo de C e de N, ciclagem de nutrientes e produtividade de plantas em diferentes ecossistemas terrestres.

2.1.3. Estoque de carbono na biomassa de plantações florestais

As espécies florestais se distinguem das demais espécies vegetais por possuírem a capacidade de fixar C por décadas e armazená-lo na forma de madeira (Marcolin, 2002). A quantidade de C fixado e o seu tempo de residência no ecossistema dependem, entre outros fatores, da idade da planta, do componente onde o C é alocado e do uso destinado à madeira.

A alocação do C fixado durante o ciclo de crescimento de uma plantação florestal é verificada pelo aumento em biomassa, principalmente de produtos madeireiros (tronco, galhos e raízes grossas) e, também, de produtos não-madeireiros (folhas e raízes finas). Em florestas inequiduais manejadas, a contribuição dos produtos não-madeireiros (4 a 6 %) é relativamente pequena em relação ao tronco, componente da árvore que mais acumula C (Cooper, 1983; Dewar, 1991).

Em povoamentos florestais equiduais, de curta duração, após as árvores serem colhidas, uma porcentagem do C retorna à atmosfera pelo uso da madeira e pela decomposição dos resíduos florestais deixados no campo em decorrência da ação dos organismos decompositores (Houghton et al., 1991; Leles et al., 1994). O tempo necessário para o retorno do C à atmosfera pode ser curto, para alguns componentes da árvore (folhas, galhos e raízes finas), ou longo, dependendo do destino final dado à madeira. Segundo Schroeder et al. (1993), a emissão de C para a atmosfera ocorre porque pelo menos 40 % do C da biomassa total da árvore encontra-se em folhas, galhos e raízes, que se decompõem num curto período de tempo. Dos 60 % restantes, o beneficiamento da madeira, em média, deixa menos da metade do volume no produto final, ou seja, mais de 75 % do C total armazenado retorna à atmosfera num período de tempo relativamente curto.

Em plantações de *Eucalyptus grandis*, em dois sítios de Cerrado, Ferreira (1984) verificou que a produção de biomassa dos componentes das árvores variou com a idade do povoamento e com a capacidade produtiva do sítio. Em Bom Despacho - MG, caracterizado como sítio de melhor qualidade quanto às características edafoclimáticas, a produção de biomassa foi maior, comparativamente à do sítio de menor capacidade, em Carbonita - MG, armazenando maiores quantidades de C por unidade de área. No sítio de maior capacidade produtiva, as raízes contribuíram com 14 % do total de C armazenado nas árvores, ao passo que naquele de menor capacidade essa contribuição chegou a 30 % do C total das árvores.

Verificou-se que o percentual de biomassa correspondente às folhas e aos galhos diminuiu em idades mais avançadas (12,7 %) do que em idades mais jovens (32,3 %), enquanto a biomassa da manta orgânica no solo aumentou até os 52 meses de idade.

Quando as florestas atingem a maturidade, o balanço entre entrada e saída de C do sistema é praticamente nulo, ou seja, a quantidade fixada de C durante o dia, pela fotossíntese, é praticamente a mesma liberada durante a respiração. Árvores em fase de crescimento absorvem quantidades significativas de C atmosférico até atingirem sua maturidade; à medida que seu crescimento diminui, elas praticamente não sequestram mais CO₂, tendo a taxa respiratória equiparada à taxa fotossintética. A idade na quais as árvores atingem a maturidade, ou estabilização, é variável de espécie para espécie (se de crescimento rápido ou lento) e com o tipo de formação florestal (homogênea ou mista).

Com relação à conversão de biomassa em C, há vários trabalhos que fornecem o conteúdo de C em diferentes espécies florestais. O fator de conversão utilizado pelo Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (1996) para conversão da biomassa seca em C é de 0,50. Gifford (2000) determinou o conteúdo de C nos tecidos e na serapilheira de 19 espécies de árvores nativas da Austrália, 15 das quais eram eucalipto, reportando que o conteúdo médio de C não passava de 50,3 %, sugerindo um fator de conversão de 50 ± 2 %, para abranger as diversas espécies estudadas.

2.1.3.1. Biomassa da parte aérea

A biomassa aérea da árvore é representada por tronco, galhos e folhas, sendo o tronco, em geral, a parte que contém mais da metade da biomassa total.

Em relação à produção de biomassa de plantações de eucalipto, tem sido constatado que, após o fechamento do dossel, a produção tende a diminuir. Leite et al. (1997) constataram que a produção de biomassa é afetada pela densidade e pela idade do povoamento. Conforme Bradstock (1981), a capacidade produtiva do sítio influencia a taxa de crescimento e produção de biomassa e, aliada aos tratamentos silviculturais aplicados, interfere no crescimento e na alocação de C nos componentes das árvores.

Em plantações de coníferas, Cooper (1983) observou que, durante os primeiros anos de vida da árvore, as acículas podem constituir mais de 50 % do peso total da biomassa seca, mas, com o crescimento das árvores, a maior parte da biomassa passa a ser alocada no tronco. Esse autor ainda reportou que a biomassa de galhos varia de 5 a 7 % da biomassa total da árvore. Em povoamentos adultos, a biomassa do tronco corresponde a 81–84 % da biomassa aérea, e a biomassa de raiz, 16–19 % da biomassa total.

De acordo com relatório emitido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT (2001), o total de C em uma árvore de eucalipto, em média, apresenta a seguinte distribuição: tronco, 65 %, copa, 13 %, e raízes, 22 %. Pode-se observar que o tronco representa mais da metade da biomassa de uma floresta de eucalipto. Assim, ao se desprezar a copa e as raízes para cálculo do C em plantações de eucalipto, subestima-se o real valor de C estocado. Contudo, devido à dificuldade de obtenção e aferição do estoque de C nesses últimos componentes, muitas vezes estes são negligenciados na predição do estoque total de C. Em decorrência da dificuldade de medição e da necessidade de redução de tempo e recursos destinados à obtenção da biomassa de galhos e folhas, estes componentes podem ser estimados como uma proporção da biomassa do tronco (Loza-Balbuena, 2001).

2.1.3.2. Biomassa de raízes

Como mencionado anteriormente, em relação aos demais componentes da árvore, a avaliação da biomassa de raízes é a mais difícil e complexa para ser executada.

Devido à dificuldade de medição de raízes, Cooper (1983) considera possível estimar a biomassa de raízes de coníferas e de espécies caducifólias pela relação existente com o diâmetro do tronco a 1,30 m de altura.

Em geral, a biomassa de raízes em florestas bem desenvolvidas corresponde a 15–20 % da biomassa total (Cairns et al., 1997). O IPCC (1996) recomenda um fator de 0,20 para estimar a biomassa de raízes como uma proporção da biomassa de florestas de coníferas, em regiões de clima temperado.

Cairns et al. (1997) concluíram que, de todas as variáveis estudadas, as que estimam com bom grau de precisão a biomassa de raízes são: idade (anos), zona latitudinal (temperada, boreal e tropical), biomassa de manta orgânica (t/ha) e densidade de plantas por unidade de área (plantas/ha).

2.2. Potencial das plantações florestais na fixação de carbono

As florestas naturais em estágio clímax são consideradas como reservatórios de C, pois fixam e emitem C por meio da decomposição da manta orgânica, raízes mortas e pela própria respiração da planta. Aquelas em fase de crescimento, que fixam mais C do que emitem, são consideradas drenos ou sumidouros (Scarpinella, 2002). É por isso que plantações florestais com espécies de rápido crescimento são mais eficientes que florestas naturais em termos de fixação de C atmosférico, pois, em condições tropicais, apresentam produção contínua de matéria seca.

Informações disponíveis sobre a capacidade de fixação de C pelas florestas tropicais indicam haver variabilidade diária, porém positiva, em relação ao liberado pela respiração. O ciclo diário do fluxo de CO₂ mostra absorção de 5 a 20 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, durante o período diurno, e uma liberação de cerca de 7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, à noite (Grace et al., 1995). Em condições ideais às plantas, em fase de crescimento, a taxa fotossintética é cerca de 30 vezes maior que a taxa respiratória (Hall & Rao, 1980).

Bossel (1994) estimou que a fotossíntese líquida realizada pelas árvores para a produção de uma tonelada de matéria seca consome, em média, 600 L de H₂O, remove 1.470 kg de CO₂ da atmosfera e devolve 1.070 kg de O₂ ao ambiente.

Em virtude da alta capacidade de fixação de C, plantações florestais com espécies de rápido crescimento, melhoradas geneticamente, como o eucalipto, por exemplo, quando bem estabelecidas, podem fixar entre 100 e 400 t/ha de CO₂ durante a fase de crescimento (ECOAR, 2003). Exemplificando, pela fotossíntese, estima-se que para cada 1,0 g de CO₂ fixado ocorra produção de 0,682 g de matéria seca vegetal.

Para fins de cálculo do estoque de C na biomassa, utiliza-se comumente um fator único de conversão da biomassa seca em C, o qual considera que 50 % da biomassa seca é constituída de C. Assim, para cada tonelada de biomassa seca produzida pelas plantações florestais, são fixados, aproximadamente, 500 kg de C. Apesar de amplamente utilizado para tal conversão, o uso indiscriminado de um fator único de conversão para diferentes espécies, das quais não se conhece o verdadeiro teor, pode levar a resultados sub ou superestimados do estoque de C (Koehler et al., 2002).

2.3. Estimativas dos estoques de carbono no sistema solo-biomassa

O estoque de C no sistema solo-biomassa sob plantações florestais é influenciado por fatores edafoclimáticos, manejo silvicultural, características intrínsecas às espécies e da idade do povoamento (Beets et al., 1999).

Para estimar o estoque de C do solo, um dos métodos mais empregados é o da abertura de trincheiras, com dimensões variáveis, no interior da plantação, de onde são coletadas amostras de solo deformadas, para análise do teor de C orgânico em laboratório, e amostras indeformadas, para determinação da densidade do solo. No laboratório, o teor de C orgânico pode ser determinado empregando-se métodos de combustão úmida, com base na oxidação da matéria orgânica a CO₂ por íons dicromato em meio fortemente ácido, ou por combustão seca, como, por exemplo, o método CHNS/O, utilizado como referência internacional para determinação do C orgânico (Delaney et al., 1997; Vélez & Arango, 2001; Machado et al., 2005).

A forma clássica de estimar o estoque de C orgânico no solo é pelo produto da densidade do solo, do conteúdo de C orgânico e do volume de solo amostrado, como descrito por Bashkin & Binkley (1998).

Para estimar a biomassa e quantificar o estoque de C orgânico em plantações florestais, há métodos que vão desde a análise destrutiva com o abate das árvores (métodos diretos) e não-destrutiva (métodos indiretos) até a estimativa por processamento digital de imagens por satélite. Os métodos indiretos são ferramentas de grande valia, dada a facilidade de obtenção dos dados necessários, sem grande demanda de tempo e de recursos. Contudo, os modelos devem ser específicos, para uso local ou regional.

Em geral, os métodos de estimativa do estoque de C orgânico fazem uso de modelos de regressão cujas variáveis independentes são a

biomassa total e o fator de conversão (0,50), pressupondo-se que 50 % da biomassa é constituída por C, de modo que 1,0 g de matéria seca corresponde a 0,5 g de C orgânico ou seu equivalente, 1,7 g de CO₂ (Brown et al., 1986).

O modelo desenvolvido por Dewar & Cannell (1992) descreve como o depósito e o fluxo de C ocorrem em povoamentos florestais eqüiâneos, periodicamente colhidos e replantados. Outros modelos levam em consideração a vida útil do produto madeireiro e o período de rotação para máxima produção de biomassa da floresta (Leles et al., 1994).

Além dos modelos mencionados, devem ser considerados os desenvolvidos por Schroeder (1992), Alvarez (1993), Flint & Richards (1994), Hoen & Solberg (1994), Delaney et al. (1997), Ortiz (1997), Bashkin & Binkley (1998) e Vélez & Arango (2001).

Uma abordagem prática, porém nem sempre exeqüível e muitas vezes onerosa, para estimar o estoque de C orgânico em plantações florestais é baseada no volume convertido em biomassa seca, para posterior obtenção do estoque (Beets et al., 1999). Inicialmente, é necessário obter o volume e, ou, a biomassa seca dos componentes aéreo e subterrâneo. O componente aéreo é representado pelo tronco (lenho + casca) e pela copa (folhas + galhos), e o subterrâneo, pelo sistema radicular (raízes grossas, finas e pivotante). Posteriormente, estima-se o estoque de C orgânico por meio do produto da biomassa seca pelo teor de C de cada componente para estimativas mais exatas, ou com um fator único, 0,50, tradicionalmente utilizado para essa conversão, obtendo, contudo, estimativas menos exatas.

Assim, o estoque total de C orgânico na biomassa é a soma do estocado na biomassa dos componentes das árvores mais o estocado na manta orgânica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização geral da área

O estudo abrangeu cinco regiões distintas quanto às características edafoclimáticas, situadas na região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais, a saber: Cocais (CO), Rio Doce (RD), Sabinópolis (SA), Santa Bárbara (SB) e Virginópolis (VI), localizadas entre as coordenadas geográficas de 18° 38' a 19° 59' de latitude sul e 42° 25' a 43° 20' de longitude oeste, de Greenwich (Quadro 1).

Estimaram-se a produção de biomassa por componente da árvore e o estoque de carbono (C). As plantações de eucalipto foram implantadas, em sua maioria, de mudas obtidas por sementes. O teor de C do solo foi determinado por três métodos e o estoque de C estimado com base em dados contidos nos levantamentos de solos realizados no período de 2001 a 2002 pela CENIBRA, bem como em trabalhos de pesquisa conduzidos por estudantes vinculados ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

Quadro 1 - Principais características ambientais das regiões em estudo

Característica	Região ⁽¹⁾				
	CO	RD	SA	SB	VI
Latitude	19° 29'	19° 16'	18° 38'	19° 59'	18° 42'
Longitude	42° 48'	42° 25'	42° 56'	43° 20'	42° 30'
Precipitação média anual (mm)	1.342	1.204	1.183	1.450	1.148
Temperatura mínima anual (°C)	16,6	18,9	15,9	17,3	15,3
Temperatura máxima anual (°C)	24,3	31,2	26,7	27,2	22,8
Temperatura média anual (°C)	20,0	24,8	21,7	22,3	16,8
Umidade relativa média anual (%)	77	65	63	62	79
Déficit hídrico anual (mm)	105	300	203	195	198
Altitude média (m)	1.200	290	800	740	1.000
Radiação total (MJ/m ² /dia)	15,0	23,9	15,9	16,2	15,6
Radiação fotossintética ativa (mmol/m ²)	26.481	24.819	29.141	30.945	30.755
Produtividade média aos 7 anos (m ³ /ha)	241	197	224	203	248

⁽¹⁾ CO = Cocais; RD = Rio Doce; SA = Sabinópolis; SB = Santa Bárbara; VI = Virginópolis.

Um dos critérios utilizados para separação das áreas de plantio por região foi a altitude de 600 m, correspondente à isolinha de evapotranspiração potencial anual igual a 1.000 mm, que separa a faixa megatérmica da mesotérmica. Assim, foram selecionadas áreas com altitudes superiores a 600 m, na faixa mesotérmica, onde o clima é ameno e o relevo acidentado. Essas áreas abrangem a maior parte das regiões de Cocais, Santa Bárbara, Virginópolis e Sabinópolis, enquanto as áreas da região do Rio Doce enquadram-se na faixa megatérmica, com relevo predominante plano a ondulado e temperaturas mais elevadas (Golfari, 1975; Fabres et al., 1987).

O clima predominante nas regiões de Santa Bárbara, Virginópolis e Sabinópolis, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, temperado chuvoso-mesotérmico, em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18 °C, e a do mês mais quente, superior a 22 °C, com as chuvas ocorrendo, predominantemente, no verão e inverno, com

baixas precipitações. No entanto, na região de Rio Doce, com altitudes inferiores a 400 m, predomina o tipo Aw, tropical, com verão chuvoso e inverno seco de maio a setembro. Na região serrana de Cocais, o clima é do tipo Cwb, mesotérmico de inverno seco e verão ameno, com temperaturas abaixo de 22 °C (CENIBRA, 2001).

As precipitações médias anuais variam de 1.400 a 1.600 mm, para as regiões de Cocais e Santa Bárbara; de 1.300 a 1.500 mm, para as regiões de Sabinópolis e Virginópolis; e de 1.000 a 1.200 mm, para a região do Rio Doce. Ocorre déficit hídrico em todas as regiões nos meses de inverno, sendo mais severo na região do Rio Doce, com quatro a cinco meses de duração; déficit hídrico mensal entre 30 e 90 mm; e evapotranspiração potencial anual entre 959 e 1.200 mm. Nas demais regiões, o período seco durante o inverno é de dois a quatro meses, com déficit hídrico mensal entre 10 e 60 mm e evapotranspiração potencial anual de 800 a 850 mm.

O relevo dominante é ondulado, com interflúvios normalmente estreitos levemente aplanados e encostas com pendentes longas, de forma convexa ou convexo-côncava, com declividade que pode chegar a 45°. Diferenças de nível em casos extremos podem atingir valores de até 400 m entre as maiores altitudes e o fundo dos vales.

A altitude varia de 200 a 1.200 m, embora a maior parte das áreas com plantios esteja situada entre 600 e 900 m. As faixas de declividade entre 0° e 15°, 16° e 26° e acima de 26° representam 43, 42 e 15 % das áreas com plantios, respectivamente.

A vegetação natural caracteriza-se pela floresta estacional semidecidual, formada de tipos arbóreos de médio a grande porte, com distribuição espacial entre as espécies, que se intercalam com tipos de menor tamanho. Grande parte dessa vegetação foi substituída por vegetação homogênea, inicialmente pelo plantio de café, e posteriormente transformada em áreas de pastagem (Oliveira & Leite, 2000). Muitas dessas áreas de pastagens transformaram-se, com o passar do tempo, em

áreas degradadas pelo uso inadequado do solo e vêm sendo utilizadas, atualmente, com a cultura do eucalipto como uma das formas de recuperação e proteção do solo.

Foram avaliadas seis classes de solos Cambissolo Háplico (CX), Latossolo Amarelo (LA), Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Neossolo Flúvico (RU) e Plintossolo Pétrico (FF), representativas da região em estudo, quanto à abrangência e à área cultivada com eucalipto, para estimativa do estoque de carbono no solo, e três classes de solo (Cambissolo, Latossolo e Neossolo) para determinação do C orgânico do solo, não sendo considerada a unidade de mapeamento, cujas características encontram-se descritas em Embrapa (1999) e Resende et al. (2002).

Os solos variam de textura franco-arenosa a muito argilosa, predominando os de textura muito argilosa, de coloração bruno-amarelada a vermelho-escura, e pertencem às classes dos Latossolos, Cambissolos, Neossolos e Plintossolos. No aspecto químico, em geral, os solos são de baixa fertilidade natural, exceto nas áreas situadas na planície aluvial do rio Doce e nos vales intramontanos de sedimentação colúvio-aluvial (CENIBRA, 2001).

As informações sobre classes e perfis de solo utilizados são provenientes do levantamento semidetalhado de solos realizado nas áreas de plantio da CENIBRA, que abrangeu cerca de 80 mil hectares, nos anos de 2000 e 2001 (CENIBRA, 2001).

3.2. Métodos de determinação do carbono do solo

Para determinação do carbono do solo foram utilizadas 33 amostras provenientes de 11 perfis de solo das classes dos Cambissolos, Latossolos e Neossolos, coletadas em três horizontes, totalizando 99 amostras. As amostras foram provenientes: 0–20, 20–80 e 80–130 cm nos Cambissolos; 0–25, 25–70 e 70–110 cm nos Latossolos; e 0–18, 18–50 e 50–110 cm nos Neossolos. Em razão da diferença na espessura das camadas de acordo

com a classe de solo, as camadas foram classificadas, para fins de interpretação dos resultados, em superior, intermediária e inferior.

Três métodos analíticos foram avaliados para determinar o teor de C orgânico: 1) Walkley & Black (1934), no qual o C orgânico é determinado por combustão úmida, baseando-se na oxidação da matéria orgânica pelo íon dicromato, em meio fortemente ácido, sem fonte externa de aquecimento; 2) Yeomans & Bremner (1988), com modificações, que também utiliza a combustão úmida, porém com fonte de aquecimento externa; e 3) Combustão seca (CHNS/O) em analisador elementar (Perkin Elmer, PE-2400 Séries II), sendo utilizado como referência para comparação com os demais métodos.

3.2.1. Método Walkley-Black (WB)

Amostras de 0,5 g de solo seco ao ar (TFSA), trituradas em almofariz e passadas em peneira de malha de 0,2 mm, foram transferidas para um erlenmeyer de 500 mL, adicionando-se 10 mL da solução de $K_2Cr_2O_7$ $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ e 20 mL de H_2SO_4 concentrado; o erlenmeyer foi agitado por aproximadamente um minuto, para promover a mistura do solo com os reagentes, permanecendo em repouso por 30 min. Após esse intervalo, adicionaram-se 150 mL de água destilada e a solução foi filtrada em papel de filtragem rápida, utilizando-se bomba-vácuo para acelerar o processo. Em seguida, adicionaram-se mais 50 mL de água destilada sobre o papel-filtro, para completa remoção da solução. Depois da filtragem, foram adicionados mais 10 mL de H_3PO_4 concentrado e 10 mL do indicador difenilamina. Procedeu-se, então, à titulação com $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ $0,25 \text{ mol L}^{-1}$, até a mudança de cor violeta para o verde. Paralelamente, o mesmo procedimento foi repetido para três amostras-controle, sem solo (“branco”). O teor de C orgânico no solo foi calculado da seguinte forma:

$$\text{C orgânico (dag/kg)} = [(1 - V_a / V_{bs}) (10) (0,003) (1,2987) (100)] / P_{am}$$

em que:

V_{bs} = volume de sulfato ferroso gasto na titulação do branco (mL);
 V_a = volume de sulfato ferroso gasto na titulação da amostra (mL);
 10 = volume de dicromato adicionado (mL);
 0,003 = equivalente do carbono (mg);
 1,2987 = fator de recuperação do método; e
 P_{am} = peso da amostra de solo (mg).

3.2.2. Método Yeomans & Bremner (YB)

Amostras de 0,5 g de solo seco ao ar (TFSA), trituradas em almofariz e passadas em peneira de malha de 0,2 mm, foram transferidas para um tubo de vidro (100 mL). Adicionaram-se 5,0 mL da solução de $K_2Cr_2O_7$ 0,167 mol L⁻¹ e 10 mL de H_2SO_4 concentrado. Em seguida, o tubo foi levado ao bloco digestor e pré-aquecido a 170 °C, por 30 min. Transcorrido esse tempo, deixou-se o tubo esfriar durante 15 min, e todo o conteúdo foi transferido para um béquer graduado (100 mL), usando água destilada para elevar o volume final a 50 mL. Aguardou-se o esfriamento da solução à temperatura ambiente. Posteriormente, adicionaram-se 10 mL de H_3PO_4 concentrado, uma pitada de NaF e 0,3 mL (5 a 8 gotas) de solução indicadora foram adicionados à solução, seguindo-se a titulação com $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 0,2 mol L⁻¹ (sal de Mohr). Procedimento idêntico foi repetido para três amostras-controle (“branco”), sem solo, aquecidas e não-aquecidas. A amostra não-aquecida foi utilizada para calcular a quantidade de dicromato perdida pelas amostras aquecidas. O teor de C orgânico no solo foi calculado da seguinte forma:

$$C \text{ orgânico (dag/kg)} = V (N (P_{eq}) 100) / P_{am}$$

em que:

N = normalidade da solução de sulfato ferroso amoniacal;
 P_{eq} = peso equivalente de carbono (0,003 mg); e
 P_{am} = peso da amostra de solo (mg).

Cálculo do volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação (V):

$$V = (V_{bc} - V_a) (V_{bs} - V_{bc}) / V_{bs} + (V_{bc} - V_a)$$

em que:

V_{bc} = volume de sulfato ferroso amoniacal utilizado na titulação do branco com aquecimento (mL);

V_{bs} = volume de sulfato ferroso amoniacal usado na titulação do branco sem aquecimento (mL); e

V_a = volume de sulfato ferroso amoniacal utilizado na titulação da amostra (mL).

3.2.3. Método por combustão seca (CHNS/O)

Amostras de 1,0 g de solo seco ao ar (TFSA) foram trituradas em almofariz e passadas em peneira de malha de 0,2 mm, evitando-se sua segregação. Em seguida, foram transferidas individualmente para um pequeno tubo e acondicionadas em um dessecador, para retirar possível umidade existente, antes de se proceder à análise via combustão seca (CHNS/O) em analisador elementar, modelo Perkin Elmer, PE-2400 Séries II.

Posteriormente às determinações, foi calculado um fator de correção entre os métodos, sendo considerado o método CHNS/O como referência. O fator foi obtido pela seguinte forma:

$$f = Y / Y_1$$

em que:

f = fator de correção;

Y = teor de C do solo determinado pelo método CHNS/O; e

Y_1 = teor de C do solo determinado pelo método WB ou YB.

3.3. Estoque de carbono no solo

O estoque de carbono no solo (ECS) foi calculado por classes de solo e região. Foram quantificados os estoques de C orgânico presente nos perfis do solo, por camada, até 100 cm de profundidade (Quadro 2). No cálculo do ECS adotou-se um sistema de interpolação dos horizontes dos solos em camadas, com o intuito de facilitar a interpretação e comparação dos resultados obtidos.

Utilizaram-se os teores de C determinados pelos métodos WB, YB e CHNS/O, a fim de averiguar a coerência nos teores determinados nas análises realizadas no levantamento de solos e, principalmente, identificar qual o método mais confiável para determinação do teor de C orgânico do solo e estimativa do estoque presente em solos sob plantações de eucalipto.

O ECS foi obtido pela soma dos estoques em cada camada de solo, com valores médios do teor de C orgânico e densidade do solo da respectiva camada em todos os perfis analisados. O estoque de C orgânico de cada camada correspondeu ao produto do teor de carbono do solo (C, g/kg) pela densidade do solo (DS, g/cm³) e pela profundidade da camada (p, cm), conforme a seguinte fórmula:

$$\text{ECS} = \text{C (DS) p}/10$$

em que:

ECS = estoque de carbono do solo (t/ha);

C = teor de carbono do solo (g/kg);

DS = densidade do solo (g/cm³); e

p = profundidade da camada (cm).

Quadro 2 - Classes e número de perfis (n) de solo analisados por região, para estimativa do estoque de carbono do solo

Classe de solo	Região ⁽¹⁾				
	CO	RD	SA	SB	VI
	n				
Cambissolo Háplico (CX)	13	18	10	13	10
Latossolo Amarelo (LA)	10	26	2	2	4
Latossolo Vermelho (LV)	6	6	15	2	13
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)	17	14	4	3	9
Neossolo Flúvico (RU)	1	17	1	-	4
Plintossolo Pétrico (FF)	1	1	2	2	2
Total	48	82	34	22	42

⁽¹⁾ CO = Cocais; RD = Rio Doce; SA = Sabinópolis; SB = Santa Bárbara; VI = Virginópolis.

3.4. Estoque de carbono no solo e características edafoclimáticas

As principais características edafoclimáticas que, de algum modo, pudessem interferir no ECS foram correlacionadas. Efetuou-se, ainda, análise de regressão multivariada, pelo processo Stepwise, para seleção das características para comporem uma equação de regressão a fim de estimar o ECS para cada camada de solo.

Na análise estatística dos dados das características edafoclimáticas foi utilizado o Sistema de Análise Estatística para Windows – WinStat – versão 2.0 (Machado & Conceição, 2003).

3.5. Estoque de carbono na biomassa

Na estimativa do estoque de C na biomassa (ECB) foram utilizados dados disponíveis de produtividade dos componentes das árvores de eucalipto (folhas, galhos, lenho, casca e raízes), de povoamentos implantados no espaçamento 3 x 2 m, com idades variando de 12 a 120 meses, e da manta orgânica depositada no solo.

Os dados foram estratificados por idade e região (Quadro 3), em intervalos de 12 meses, contados a partir da menor para a de maior idade. Identificou-se a inexistência de dados coletados de biomassa de certos componentes das árvores, para algumas idades, bem como da biomassa de raízes. Os dados inexistentes foram estimadas por meio de equações de regressões geradas no programa CurveExpert 1.3 (Hyams, 1997), a partir dos dados existentes.

Para manta orgânica e raízes, tendo em vista o número limitado de dados de biomassa disponíveis, nas cinco regiões (manta orgânica = 29 e raízes = 27), optou-se por gerar uma equação geral para esses componentes para a região Centro-Leste de MG. Quando da existência de dados foram geradas equações por componente e região.

Quadro 3 - Número de dados (n) disponíveis de biomassa dos componentes das árvores, por região

Componente	Região ⁽¹⁾				
	CO	RD	SA	SB	VI
	n				
Folhas	-	77	87	247	-
Galhos	-	44	118	244	-
Lenho	-	42	96	207	-
Casca	-	45	100	213	-
Tronco	44	25	111	66	58

⁽¹⁾ CO = Cocais; RD = Rio Doce; SA = Sabinópolis; SB = Santa Bárbara; VI = Virginópolis.

Na estimativa da biomassa dos componentes das árvores considerou-se a relação existente entre estes componentes e a biomassa do tronco, obtida pelo método destrutivo, por apresentar bom grau de confiabilidade dos valores gerados em relação à biomassa real (Bartelink, 1998; Neves, 2000; Loza-Balbuena, 2001). Assim, foram geradas equações de regressão utilizando o programa CurveExpert 1.3, para estimativa da biomassa de todos os componentes das árvores por idade e região de estudo. Na escolha do melhor modelo de regressão observou-se a classificação ordenada dos modelos gerados pelo programa, levando também em consideração o comportamento biológico.

As equações de regressão geradas foram utilizadas com a finalidade de estimar a biomassa do tronco e a partição dos componentes das árvores por idade e região. A biomassa dos componentes das árvores foi convertida em estoque de C, multiplicando-se a biomassa pelo teor médio de C em cada componente da árvore, obtido por Neves (2000) para plantações de eucalipto na região litorânea do Estado do Espírito Santo. Esse autor encontrou, em plantações de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, os seguintes teores médios de C: 524,0, 479,6, 525,1, 506,6 e 507,0 g/kg, respectivamente, para folhas, casca, galhos, lenho e raiz

grossa. Considerando que a manta orgânica é constituída basicamente por folhas, galhos e casca, estimou-se o teor médio de C desses três componentes em 509,6 g/kg, para cálculo do estoque de C.

O estoque de carbono na biomassa (ECB) das árvores (parte aérea + raízes) e da manta orgânica, por hectare, foi obtido utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\text{ECB} = \text{Bfs} (f) + \text{Bgs} (f) + \text{Bls} (f) + \text{Bcs} (f) + \text{Brs} (f) + \text{Bmos} (f)$$

em que:

ECB = estoque de carbono na biomassa (t/ha);

Bfs = biomassa de folhas seca (t/ha);

Bgs = biomassa de galhos seca (t/ha);

Bls = biomassa de lenho seca (t/ha);

Bcs = biomassa de casca seca (t/ha);

Brs = biomassa de raízes seca (t/ha);

Bmos = biomassa de manta orgânica seca (t/ha); e

f = fator de proporção de carbono no componente.

3.6. Estoque de carbono total no sistema solo-biomassa

Considerando que o C fixado pela fotossíntese é estocado na biomassa (item 3.5.) e, em seguida, parcialmente incorporado ao solo (item 3.3), a previsão do estoque de carbono total (ECT) no sistema solo-biomassa deve considerar esses dois compartimentos. Logo, o ECT foi calculado pela seguinte fórmula:

$$\text{ECT} = \text{ECS} + \text{ECB}$$

em que:

ECT = estoque de carbono total (t/ha);

ECS = estoque de carbono no solo (t/ha); e

ECB = estoque de carbono na biomassa (t/ha).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Métodos de determinação do carbono do solo

Independentemente da classe e da profundidade do solo, maiores teores de carbono (C) do solo foram obtidos com o método de combustão seca (CHNS/O), em decorrência do próprio processo analítico (Quadro 4). Esse procedimento analítico tem sido bastante usado em trabalhos de determinação do C do solo, visto que a combustão seca, que ocorre à temperatura de 925 °C, oxida todo o C (formas orgânicas e inorgânicas) da amostra. Nos dois métodos por combustão úmida (Walkley-Black e Yeomans & Bremner), a oxidação do C, com ou sem aquecimento, não é completa, determinando essencialmente o C orgânico (Nelson & Sommers, 1996).

Em termos gerais, os teores médios de C do solo diferiram significativamente entre as profundidades dentro de cada método, e entre os métodos, para uma mesma classe de solo (Quadro 4).

Os teores de C foram superiores, nas três profundidades analisadas, na classe dos Latossolos em relação aos obtidos nas classes dos Cambissolos e Neossolos, para os três métodos testados; nestas classes, os teores foram bastante próximos entre si.

Quadro 4 - Teor de C no solo determinados pelo método de referência combustão seca (CHNS/O), e pelos métodos de combustão úmida Walkley-Black (WB) e Yeomans & Bremner (YB) para três classes, camadas e profundidades e respectivo desvio padrão (s)

Classe	Camada	Prof.	Teor de C					
			CHNS/O	s	WB	s	YB	s
		cm	g/kg		g/kg		g/kg	
Cambissolo	Superficial	0-20	1,92 Aa ⁽¹⁾	0,01	1,55 Ab	0,05	1,37 Ac	0,04
	Intermediária	20-80	0,84 Ba	0,01	0,65 Bb	0,04	0,77 Ba	0,01
	Inferior	80-130	0,46 Ca	0,02	0,34 Cb	0,03	0,34 Cb	0,01
Latossolo	Superficial	0-25	2,30 Aa	0,01	1,84 Ab	0,14	1,52 Ac	0,03
	Intermediária	25-70	1,25 Ba	0,09	0,91 Bb	0,02	0,93 Bb	0,08
	Inferior	70-110	0,84 Ca	0,01	0,70 Cb	0,04	0,68 Cb	0,04
Neossolo	Superficial	0-18	1,84 Aa	0,03	1,59 Ab	0,02	1,25 Ac	0,02
	Intermediária	18-50	1,09 Ba	0,00	0,78 Bc	0,01	0,91 Bb	0,01
	Inferior	50-110	0,36 Ca	0,01	0,20 Cb	0,01	0,25 Cb	0,02
Média	Superficial	0-20	2,02 Aa	0,01	1,66 Ab	0,07	1,38 Ac	0,01
	Intermediária	20-60	1,06 Ba	0,03	0,78 Bc	0,01	0,87 Bb	0,03
	Inferior	60-108	0,56 Ca	0,01	0,41 Cb	0,02	0,42 Cb	0,01

⁽¹⁾ Médias seguidas de mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade (média de três repetições).

Os teores de C orgânico determinados pelo método Yeomans & Bremner (YB) diferiram estatisticamente daqueles obtidos pelo método Walkley-Black (WB) apenas na camada superficial, a despeito das diferenças entre os dois métodos (concentração de reagentes e fonte de aquecimento externa). Na camada superficial, maiores teores de C orgânico foram obtidos com o método WB, sendo a diferença entre os dois métodos por combustão úmida de 12 % nos Cambissolos, 17 % nos Latossolos e 21 % nos Neossolos. No que se refere às camadas mais profundas, observou-se tendência inversa, ou seja, os teores de C orgânico foram maiores quando determinados pelo método YB. Na camada intermediária, a diferença entre valores foi significativa nos Cambissolos e Neossolos; na camada inferior, não houve diferença estatística entre os teores de C orgânico determinados pelos dois métodos, nas três classes de solo.

De acordo com Islam & Weil (1988), a fonte de aquecimento externa, como no método YB, possibilitaria que maior quantidade de C fosse detectada, pois a temperatura da solução se manteria constante durante o processo de oxidação do material orgânico pelo Cr(VI), em meio ácido. Essa proposição tem respaldo nos resultados obtidos por esses autores ao determinarem o C orgânico em 15 amostras de solos empregando diversos métodos, tanto por combustão seca quanto úmida. Entretanto, os resultados aqui apresentados (Quadro 4) se ajustaram a essa expectativa apenas nas camadas subsuperficiais.

Dias et al. (1991), ao avaliarem cinco métodos de determinação do C orgânico por combustão úmida com e sem fonte de aquecimento externa, entre os quais os métodos Yeomans & Bremner e Walkley-Black, encontraram resultados semelhantes aos aqui apresentados para as amostras superficiais de solo (Quadro 4). Das 15 amostras de solos analisadas, 10 apresentaram o teor de C orgânico superior pelo método WB, apesar da pequena diferença (3 a 10 %). De acordo com esses autores, a utilização de um ou mais métodos analíticos de rotina não pode levar em consideração apenas os custos e a praticidade dos procedimentos, mas também a precisão, a exatidão e a reprodutibilidade dos resultados.

A precisão pode ser avaliada pelo valor do desvio padrão, o qual melhor retrata as diferenças entre as médias. Dessa forma, os métodos (CHNS/O) e YB podem ser considerados como os de maior precisão, nas três profundidades analisadas (Quadro 4).

Em relação ao método de referência (CHNS/O), os resultados mostram que, nas classes de solo estudadas, os métodos WB e YB tenderam a subestimar os teores de C orgânico tanto nas camadas superficiais como nas mais profundas (Quadro 5). Os fatores de correção estimados, para o método WB, variaram de 1,23 a 1,79, independentemente da camada e classe de solo; e para o método de YB, de 1,09 a 1,52. No método WB, o fator de correção 1,30 é empregado para corrigir o percentual de C orgânico que não tenha sido oxidado durante o processo, pois se considera que o

dicromato de potássio oxida apenas 77 % do C orgânico do solo (Walkley & Black, 1934). De acordo com Blair et al. (1995), esse fator de recuperação do método deve ser reavaliado. Esses autores verificaram que, dependendo do teor de C orgânico lábil, o C total do solo estaria sendo ora subestimado, ora superestimado, com a aplicação do fator de correção, 1,3. Diante disso, para estudos que objetivam estimar o EC do solo, empregando-se os teores de C determinados pelos métodos WB e YB, seria apropriado calcular um fator específico para cada classe de solo e profundidade de amostragem.

No Quadro 6 encontram-se os modelos de regressão em que o método de combustão seca foi considerado variável dependente do C orgânico obtido pelos métodos WB e YB, nas três profundidades avaliadas. Os métodos possibilitaram o ajuste de modelos com elevada capacidade de predição do C, destacando-se o WB, tanto nos valores de intercepto como de declividade e coeficiente de determinação, especialmente na camada superior. Esses resultados mostram que os métodos apresentam boa exatidão, apesar das diferenças operacionais entre eles. Os baixos valores do coeficiente de determinação (R^2) para as equações ajustadas com os teores de C orgânico determinado pelo método YB refletem a maior dispersão entre esses teores, indicando, indiretamente, possíveis desajustes na condução das análises, haja vista a literatura considerar o método como mais eficiente na oxidação do C orgânico, por causa do controle da temperatura da solução durante o processo (Islam & Weil, 1988).

Assim, como os modelos apresentados no Quadro 6 indicam estreita relação entre os métodos WB e YB e o método de referência (CHNS/O), os coeficientes de correlação linear obtidos entre os diferentes métodos (Quadro 7) mostram que estes se correlacionaram positiva e significativamente entre si. Os menores valores de coeficiente de correlação para o método YB, nas três camadas avaliadas, reforçam os comentários efetuados com relação às adequações do método, especialmente em camadas que apresentam menor teor de C orgânico, como as subsuperficiais.

Quadro 5 - Fator de correção (f) médio por camadas e classes de solo analisadas pelos métodos de combustão úmida, Walkley-Black (WB) e Yeomans & Bremner (YB), em relação ao método de referência combustão seca (CHNS/O)

Camada	Fator de correção (f)							
	Cambissolo		Latossolo		Neossolo		Média	
	WB	YB	WB	YB	WB	YB	WB	YB
Superficial	1,23	1,41	1,25	1,52	1,16	1,47	1,22	1,47
Intermediária	1,30	1,09	1,37	1,35	1,39	1,20	1,35	1,22
Inferior	1,35	1,35	1,30	1,23	1,79	1,45	1,37	1,33

Quando 6 - Equações de regressão para estimativa dos teores de C (g/kg) por camadas de solo pelo método de referência combustão seca (CHNS/O), a partir dos teores determinados pelos métodos de combustão úmida, Walkley-Black (WB) e Yeomans & Bremner

Camada	Equação de regressão	R ²
Superficial	CHNO/S = 0,0051 + 1,1982** C orgânico WB	0,927
	CHNO/S = -0,2560 + 1,6596** C orgânico YB	0,648
Intermediária	CHNO/S = 0,1256 + 1,2664** C orgânico WB	0,947
	CHNO/S = 0,1022 + 1,1405** C orgânico YB	0,814
Inferior	CHNO/S = 0,1075 + 1,1016** C orgânico WB	0,939
	CHNO/S = 0,0828 + 1,0887** C orgânico YB	0,891
Geral	CHNO/S = 0,1255 + 1,1565** C orgânico WB	0,964
	CHNO/S = -0,1032 + 1,4755** C orgânico YB	0,846

** : Significativo a 1 %.

Quadro 7 - Coeficientes de correlação (r) entre os teores de C por classes e camadas do solo, determinados pelos métodos de referência combustão seca (CHNS/O), e pelos métodos de combustão úmida, Walkley-Black (WB) e Yeomans & Bremner (YB)

Classe	Método	r	
		WB	CHNS/O
Cambissolo	CHNO/S	0,993**	0,976**
	YB	0,979**	
Latossolo	CHNO/S	0,955**	0,960**
	YB	0,879**	
Neossolo	CHNO/S	0,959**	0,911**
	YB	0,964**	
Camada			
Superficial	CHNO/S	0,972**	0,929**
	YB	0,963**	
Intermediária	CHNO/S	0,976**	0,966**
	YB	0,912**	
Inferior	CHNO/S	0,951**	0,929**
	YB	0,947**	

** : Significativo a 1 %.

4.2. Estoque de carbono no solo

Nas cinco regiões estudadas, os maiores teores de C (Quadros 8 a 12), assim como o estoque de carbono no solo (ECS) (Quadro 13) foram detectados na camada de 0–20 cm, decrescendo em profundidade, para todas as classes de solos. Os teores mais elevados foram dos Latossolos, principalmente nas regiões de Sabinópolis e Virginópolis.

Os resultados obtidos podem ser atribuídos, na classe dos Latossolos, ao maior teor de argila desses solos, favorecendo a formação de agregados estáveis, os quais dificultariam tanto a decomposição quanto a mineralização das frações orgânicas do solo (Hassink, 1994; Matus & Maire, 2000). O acúmulo de material orgânico na camada superficial pode, também, influenciar as características físicas do solo, haja vista os valores de densidade do solo (DS) e porosidade total (PT) encontrados (Quadros 8 a 12).

Outra possível justificativa para os maiores teores de C orgânico na camada superficial do solo é o aporte de material orgânico, proveniente da queda de folhas, galhos e da casca das árvores, formando a manta orgânica. Esse material, somado aos resíduos da colheita, em condições favoráveis de crescimento, pode representar 26 % do total de matéria seca produzida em plantações de eucalipto aos sete anos de idade, conforme constatou Leite (2001).

Em condições restritivas ao crescimento das plantas, como baixa fertilidade do solo (Quadros 8 a 12) e déficit hídrico (Quadro 1), como ocorre nas regiões em estudo, a contribuição da manta orgânica, somada aos resíduos de exploração mantidos no campo, pode corresponder a 44 % da biomassa total produzida e, se a biomassa do sistema radicular for considerada, a 64 % (Ladeira, 1999). Nas regiões em estudo, a biomassa de resíduos vegetais variou de 30,2 a 40,2 t/ha, devido à menor produção de biomassa total, reflexo das condições edafoclimáticas restritivas, principalmente na região de Cocais, dos tratos silviculturais aplicados e das características genéticas das espécies utilizadas (mudas produzidas por sementes). Esses valores são inferiores àqueles apresentados por Barros & Comerford (2002), ao mencionarem 40,0 a 60,0 t/ha para a quantidade de biomassa, na forma de resíduos, que podem permanecer na área após a colheita do eucalipto, aos sete anos de idade.

Em relação às classes e ao estoque médio de C orgânico no solo (0-100 cm), constatou-se, em ordem decrescente, a seguinte situação: Latossolo Vermelho (LV), com 140,99 t/ha; Cambissolo Háplico (CX), com 135,65 t/ha; Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), com 130,95 t/ha; Latossolo Amarelo (LA), com 121,58 t/ha; Plintossolo Pétrico (FF), com 112,01 t/ha; e Neossolo Flúvico (RU), com 95,08 t/ha de C orgânico (Quadro 13).

Quadro 8 - Características químicas e físicas dos solos estudados e produtividade média de plantações de eucalipto aos 84 meses de idade, na região de Cocais

Profundidade	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m	CO	DS	DP	PT	Areia	Silte	Argila	Prod.
cm	H ₂ O	—mg/dm ³ —		cmol _c /dm ³								%		g/kg	g/cm ³			g/kg		m ³ /ha
Cambissolo Háplico (CX)																				
0-20	5,1	2,1	22,5	0,11	0,08	1,05	7,02	0,30	1,35	7,32	4,1	77,8	32,23	0,90	2,44	63	45	11	44	270
20-40	5,1	0,8	12,2	0,05	0,04	0,50	4,81	0,17	0,67	4,98	3,4	74,7	18,36	1,00	2,55	61	42	11	47	(54)*
40-60	5,1	0,8	12,2	0,05	0,04	0,50	4,81	0,17	0,67	4,98	3,4	74,7	18,12	1,00	2,55	61	42	11	47	
60-100	5,1	0,3	7,2	0,03	0,02	0,25	3,17	0,11	0,36	3,28	3,5	68,6	8,86	1,06	2,61	59	38	14	47	
Latossolo Amarelo (LA)																				
0-20	4,9	1,3	21,4	0,08	0,06	1,16	7,68	0,22	1,37	7,90	2,8	84,2	22,44	1,08	2,52	57	46	6	47	242
20-40	4,9	0,6	11,5	0,05	0,03	0,75	5,81	0,12	0,87	5,93	2,0	86,5	17,18	1,07	2,58	58	41	6	53	(35)
40-60	4,8	0,3	7,0	0,04	0,02	0,62	4,78	0,08	0,70	4,87	1,7	88,0	10,52	1,07	2,60	59	38	5	57	
60-100	4,8	0,3	5,3	0,03	0,02	0,58	4,42	0,08	0,65	4,50	1,7	88,4	7,97	1,07	2,62	59	37	5	58	
Latossolo Vermelho (LV)																				
0-20	4,9	2,9	16,8	0,07	0,05	0,71	5,41	0,17	0,88	5,59	3,1	80,5	19,32	0,95	2,51	62	39	12	49	191
20-40	4,8	2,2	9,9	0,06	0,03	0,32	3,60	0,12	0,45	3,72	3,3	72,2	12,49	1,08	2,56	58	34	11	55	(37)
40-60	4,9	0,3	5,5	0,05	0,02	0,23	2,94	0,09	0,32	3,04	3,1	70,9	8,90	1,14	2,59	56	30	10	61	
60-100	4,9	0,3	5,1	0,06	0,02	0,22	2,82	0,10	0,31	2,92	3,3	69,3	7,77	1,14	2,59	56	29	9	61	
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)																				
0-20	4,9	1,5	25,3	0,11	0,08	0,95	6,58	0,29	1,24	6,87	4,2	76,6	22,80	0,97	2,49	61	44	9	47	253
20-40	5,0	0,6	11,8	0,04	0,04	0,51	4,52	0,13	0,64	4,65	2,9	79,3	14,48	1,08	2,55	58	37	10	53	(49)
40-60	4,9	0,4	7,2	0,04	0,02	0,36	3,63	0,11	0,48	3,74	3,0	76,7	8,80	1,10	2,56	57	34	9	57	
60-100	4,9	0,3	6,8	0,06	0,02	0,32	3,25	0,13	0,45	3,38	3,8	71,6	7,06	1,11	2,57	57	34	9	57	
Neossolo Flúvico (RU)																				
0-20	5,1	1,6	49,8	2,48	0,81	0,10	5,18	3,44	3,54	8,62	39,3	5,5	18,93	1,15	2,34	51	21	17	61	239
20-40	5,1	0,6	49,0	0,62	0,33	0,53	3,95	1,09	1,62	5,04	21,6	32,9	9,15	1,07	2,54	58	15	12	72	(n.d.)
40-60	5,1	0,4	46,0	0,37	0,19	0,62	3,21	0,68	1,31	3,89	17,5	52,6	6,91	1,07	2,54	58	23	25	52	
60-100	5,1	0,3	41,7	0,17	0,07	0,69	2,51	0,35	1,04	2,86	12,2	68,8	4,81	1,07	2,54	58	31	37	32	
Plintossolo Pétrico (FF)																				
0-20	5,1	1,3	14,0	0,02	0,03	0,55	5,29	0,10	0,65	5,39	1,9	84,0	17,32	1,05	-	-	60	10	30	252
20-40	5,2	0,7	12,7	0,01	0,03	0,42	4,47	0,09	0,51	4,56	2,0	82,5	16,15	1,02	-	-	53	12	35	(n.d.)
40-60	5,1	0,5	11,0	0,01	0,02	0,34	4,42	0,07	0,41	4,49	1,7	81,8	16,13	1,01	-	-	41	14	45	
60-100	5,6	1,5	46,8	0,08	0,37	0,05	1,92	0,59	0,64	2,52	23,6	83,0	1,67	1,02	-	-	51	12	37	

pH em H₂O - relação solo:água 1:2,5; extratores: P e K (Mehlich-1); Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ (KCl 1 mol/L); H + Al (acetato de cálcio 0,5 mol/L, a pH 7,0); CO = carbono orgânico determinado pelo método Walkley & Black e convertido para CHNS/O; SB = soma de bases trocáveis; t = capacidade de troca catiônica efetiva; T = capacidade de troca catiônica total a pH 7,0; V = índice de saturação por bases; m = índice de saturação por alumínio; DS = densidade do solo; DP = densidade da partícula; PT = porosidade total; * = desvio padrão; (n.d.) = não determinado (produção proveniente de apenas uma observação).

Quadro 9 - Características químicas e físicas dos solos estudados e produtividade média de plantações de eucalipto aos 84 meses de idade, na região de Rio Doce

Profundidade	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m	CO	DS	DP	PT	Areia	Silte	Argila	Prod.
cm	H ₂ O	—mg/dm ³ —		cmol _c /dm ³							%		g/kg	g/cm ³			g/kg		m ³ /ha	
Cambissolo Háplico (CX)																				
0-20	4,9	1,9	38,0	0,73	0,24	1,18	5,87	1,13	2,31	6,99	16,1	51,2	14,58	1,10	2,56	57	35	13	52	189
20-40	4,9	0,9	21,6	0,50	0,20	0,93	4,29	0,78	1,71	5,07	15,4	54,3	9,49	1,13	2,58	56	27	19	54	(33)*
40-60	5,0	0,7	15,7	0,43	0,18	0,87	3,67	0,67	1,53	4,34	15,3	56,6	7,14	1,14	2,60	56	25	24	51	
60-100	5,1	0,7	13,5	0,34	0,16	0,74	3,13	0,56	1,30	3,69	15,3	56,8	5,22	1,16	2,63	56	25	30	44	
Latossolo Amarelo (LA)																				
0-20	4,4	2,4	36,8	0,34	0,16	1,73	8,52	0,61	2,35	9,14	6,7	73,8	14,38	1,14	2,58	56	37	5	58	199
20-40	4,3	1,0	12,9	0,06	0,04	1,74	6,78	0,15	1,88	6,92	2,1	92,1	9,95	1,11	2,60	57	31	4	65	(33)
40-60	4,3	0,7	7,3	0,04	0,04	1,55	5,77	0,11	1,66	5,87	1,8	93,6	6,91	1,10	2,61	58	28	6	66	
60-100	4,4	0,6	5,3	0,04	0,03	1,42	5,09	0,09	1,51	5,18	1,8	93,9	5,35	1,10	2,60	58	27	6	67	
Latossolo Vermelho (LV)																				
0-20	4,8	1,7	37,8	0,94	0,52	1,27	7,11	1,58	2,84	8,69	18,2	44,5	15,96	1,09	2,57	58	33	5	62	183
20-40	4,7	0,7	21,6	0,36	0,29	1,01	5,37	0,72	1,72	6,09	11,8	58,3	11,68	1,05	2,60	59	25	6	69	(21)
40-60	4,6	0,4	18,8	0,07	0,15	0,79	4,31	0,28	1,07	4,58	6,0	74,2	7,53	1,06	2,61	59	21	7	72	
60-100	4,6	0,4	16,7	0,06	0,15	0,66	3,90	0,27	0,93	4,16	6,4	71,5	6,31	1,06	2,61	59	20	10	70	
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)																				
0-20	4,3	1,5	19,8	0,10	0,07	1,58	7,32	0,23	1,81	7,55	3,0	87,3	14,93	1,11	2,62	58	30	5	66	201
20-40	4,3	0,9	11,1	0,05	0,04	1,19	5,44	0,13	1,32	5,57	2,4	89,9	10,72	1,06	2,64	60	25	5	70	(38)
40-60	4,5	0,6	5,9	0,03	0,02	0,91	4,19	0,07	0,99	4,26	1,7	92,7	6,89	1,08	2,65	59	22	6	72	
60-100	4,6	0,6	4,8	0,03	0,02	0,78	3,78	0,07	0,85	3,85	1,8	91,8	5,66	1,07	2,66	59	21	9	70	
Neossolo Flúvico (RU)																				
0-20	5,6	1,9	92,0	1,82	0,73	0,25	3,16	2,82	3,08	5,98	47,2	8,3	11,69	1,23	2,53	52	40	15	44	203
20-40	5,6	1,2	48,4	0,65	0,38	0,23	2,12	1,18	1,41	3,30	35,7	16,5	5,70	1,21	2,57	53	32	26	42	(8)
40-60	5,7	1,4	48,5	0,60	0,39	0,11	1,86	1,14	1,25	3,00	38,0	8,9	4,79	1,21	2,60	53	30	35	35	
60-100	5,8	1,9	34,2	0,45	0,45	0,06	1,60	1,01	1,08	2,62	38,7	6,0	3,58	1,21	2,62	54	32	50	19	
Plintossolo Pétrico (FF)																				
0-20	5,2	4,4	243,0	2,00	1,45	0,36	3,55	4,11	4,47	7,66	53,7	8,0	5,68	1,16	2,43	42	6	14	80	205
20-40	5,4	1,5	108,0	0,55	0,75	0,29	2,32	1,60	1,89	3,91	40,9	15,3	2,62	1,02	2,66	45	3	17	80	(n.d.)
40-60	5,6	1,5	46,8	0,08	0,37	0,05	1,92	0,59	0,64	2,52	23,6	7,4	1,73	0,99	2,72	64	2	21	77	
60-100	5,6	1,5	46,8	0,08	0,37	0,05	1,92	0,59	0,64	2,52	23,6	7,4	1,68	0,99	2,72	64	2	21	77	

pH em H₂O - relação solo:água 1:2,5; extratores: P e K (Mehlich-1); Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ (KCl 1 mol/L); H + Al (acetato de cálcio 0,5 mol/L, a pH 7,0); CO = carbono orgânico determinado pelo método Walkley & Black e convertido para CHNS/O; SB = soma de bases trocáveis; t = capacidade de troca catiônica efetiva; T = capacidade de troca catiônica total a pH 7,0; V = índice de saturação por bases; m = índice de saturação por alumínio; DS = densidade do solo; DP = densidade da partícula; PT = porosidade total; * = desvio padrão; (n.d.) = não determinado (produção proveniente de apenas uma observação).

Quadro 10 - Características químicas e físicas dos solos estudados e produtividade média de plantações de eucalipto aos 84 meses de idade, na região de Sabinópolis

Profundidade	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m	CO	DS	DP	PT	Areia	Silte	Argila	Prod.
cm	H ₂ O	—mg/dm ³ —		cmol _c /dm ³								%		g/kg	g/cm ³			g/kg		m ³ /ha
Cambissolo Háplico (CX)																				
0-20	4,7	1,8	32,5	0,35	0,18	1,77	9,17	0,62	2,40	9,79	6,4	74,0	29,75	0,94	2,48	59	26	14	60	231
20-40	4,9	0,8	16,2	0,21	0,11	0,80	5,08	0,37	1,17	5,45	6,8	68,4	16,09	1,03	2,56	60	24	18	59	(53)*
40-60	5,0	0,4	7,7	0,20	0,08	0,58	3,75	0,30	0,88	4,05	7,5	65,7	11,31	1,04	2,59	60	22	24	54	
60-100	5,1	0,4	7,7	0,15	0,06	0,39	2,66	0,24	0,62	2,90	8,2	62,1	8,22	1,04	2,57	60	24	37	39	
Latossolo Amarelo (LA)																				
0-20	4,6	1,2	21,4	0,17	0,08	1,98	9,96	0,31	2,29	10,27	3,0	86,5	21,75	1,06	2,41	53	32	8	61	215
20-40	4,6	0,6	10,3	0,02	0,02	1,39	7,30	0,08	1,47	7,38	1,1	94,7	15,74	0,92	2,55	45	29	7	63	(2)
40-60	4,7	0,3	4,1	0,02	0,02	0,88	5,19	0,05	0,93	5,24	1,0	94,3	9,73	0,79	2,58	41	29	6	66	
60-100	4,7	0,3	2,6	0,02	0,02	0,77	4,95	0,05	0,82	5,01	1,0	93,7	8,41	0,72	2,58	38	28	5	66	
Latossolo Vermelho (LV)																				
0-20	4,6	1,0	21,2	0,08	0,07	1,55	9,76	0,22	1,77	9,98	2,2	87,6	31,58	0,88	2,53	65	19	7	74	227
20-40	5,0	0,5	7,9	0,02	0,02	0,68	5,62	0,09	0,77	5,71	1,6	88,3	17,36	0,94	2,62	64	17	6	77	(38)
40-60	5,0	0,4	5,3	0,02	0,01	0,54	4,67	0,07	0,62	4,74	1,6	88,1	13,23	0,96	2,62	63	16	6	78	
60-100	5,0	0,2	2,8	0,02	0,01	0,34	3,80	0,06	0,40	3,86	1,5	85,1	9,62	0,98	2,64	63	15	7	78	
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)																				
0-20	4,5	1,8	27,3	0,34	0,13	2,09	11,38	0,56	2,65	11,93	4,7	79,0	25,60	1,06	2,57	59	31	8	61	248
20-40	4,5	1,1	17,6	0,04	0,04	1,83	9,69	0,14	1,97	9,83	1,4	92,8	21,06	1,11	2,58	57	31	8	61	(69)
40-60	4,5	0,5	9,6	0,03	0,03	1,52	8,40	0,09	1,62	8,50	1,1	94,2	15,24	1,07	2,57	58	28	9	64	
60-100	4,5	0,3	4,7	0,03	0,02	1,18	6,99	0,07	1,26	7,06	1,0	94,3	11,06	1,07	2,57	58	28	7	65	
Neossolo Flúvico (RU)																				
0-20	5,2	0,7	47,0	0,57	0,48	0,43	6,81	1,19	1,62	8,01	14,9	26,3	21,46	1,12	2,62	57	38	12	51	235
20-40	5,6	0,2	7,4	0,05	0,16	0,03	2,87	0,24	0,27	3,11	7,7	10,0	9,51	0,95	2,69	47	27	12	61	(n.d.)
40-60	5,7	0,1	7,0	0,09	0,16	0,02	2,58	0,27	0,29	2,84	9,4	6,4	7,77	0,95	2,69	32	18	38	45	
60-100	5,9	0,1	6,4	0,10	0,14	0,01	2,11	0,27	0,28	2,38	11,4	2,9	6,07	0,95	2,69	32	15	49	36	
Plintossolo Pétrico (FF)																				
0-20	4,7	1,3	17,6	0,03	0,03	1,73	10,02	0,12	1,86	10,14	1,2	93,4	30,32	1,02	2,79	63	24	7	69	185
20-40	4,6	0,5	7,6	0,01	0,01	0,70	4,88	0,08	0,78	4,96	1,6	89,9	15,04	1,04	2,94	65	20	7	73	(28)
40-60	4,9	0,5	4,5	0,01	0,01	0,39	3,25	0,06	0,46	3,31	2,0	85,8	9,82	1,03	2,76	64	22	7	71	
60-100	5,3	0,5	2,0	0,02	0,01	0,14	2,08	0,06	0,20	2,13	2,7	71,2	6,26	1,03	2,69	64	24	7	69	

pH em H₂O - relação solo:água 1:2,5; extratores: P e K (Mehlich-1); Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ (KCl 1 mol/L); H + Al (acetato de cálcio 0,5 mol/L, a pH 7,0); CO = carbono orgânico determinado pelo método Walkley & Black e convertido para CHNS/O; SB = soma de bases trocáveis; t = capacidade de troca catiônica efetiva; T = capacidade de troca catiônica total a pH 7,0; V = índice de saturação por bases; m = índice de saturação por alumínio; DS = densidade do solo; DP = densidade da partícula; PT = porosidade total; * = desvio padrão; (n.d.) = não determinado (produção proveniente de apenas uma observação).

Quadro 11 - Características químicas e físicas dos solos estudados e produtividade média de plantações de eucalipto aos 84 meses de idade, na região de Santa Bárbara

Profundidade	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m	CO	DS	DP	PT	Areia	Silte	Argila	Prod.
cm	H ₂ O	—mg/dm ³ —		cmol _c /dm ³								%		g/kg	g/cm ³			g/kg		m ³ /ha
Cambissolo Háplico (CX)																				
0-20	4,6	1,4	32,8	0,24	0,15	1,99	8,61	0,49	2,48	9,10	5,4	80,3	18,16	1,13	2,50	55	40	11	50	194
20-40	4,8	3,5	14,0	0,12	0,09	1,70	6,35	0,25	1,95	6,59	3,7	87,4	11,79	1,12	2,56	56	34	10	56	(43)*
40-60	4,9	4,9	10,4	0,10	0,07	1,54	5,44	0,21	1,74	5,65	3,7	88,1	9,54	1,12	2,58	57	32	11	57	
60-100	5,1	2,6	6,8	0,09	0,06	1,32	4,69	0,18	1,49	4,87	3,6	88,2	7,30	1,12	2,59	57	32	14	54	
Latossolo Amarelo (LA)																				
0-20	4,6	0,9	16,4	0,07	0,06	1,36	7,11	0,18	1,54	7,29	2,5	88,2	13,21	1,24	2,47	50	52	8	41	242
20-40	4,8	0,6	8,3	0,02	0,03	0,82	4,85	0,08	0,90	4,93	1,7	90,8	10,85	1,20	2,49	52	43	7	50	(82)
40-60	4,9	0,5	5,3	0,03	0,02	0,57	3,84	0,07	0,63	3,91	1,7	89,4	7,94	1,17	2,51	53	40	7	53	
60-100	5,0	0,3	3,0	0,06	0,02	0,42	3,11	0,10	0,51	3,20	3,0	81,2	5,02	1,14	2,56	55	38	7	56	
Latossolo Vermelho (LV)																				
0-20	5,1	0,7	16,9	0,08	0,05	0,43	8,50	0,19	0,61	8,69	2,1	69,5	33,13	1,00	2,65	62	13	28	59	176
20-40	5,4	0,3	2,9	0,02	0,01	0,04	3,79	0,05	0,09	3,85	1,4	39,8	19,09	1,00	2,76	64	10	18	73	(11)
40-60	5,5	0,3	2,0	0,02	0,01	0,02	3,34	0,05	0,07	3,39	1,5	25,0	15,62	1,00	2,76	64	10	16	75	
60-100	5,0	0,3	1,7	0,02	0,01	0,01	2,75	0,04	0,05	2,80	1,5	20,8	11,89	1,00	2,78	64	10	13	76	
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)																				
0-20	4,5	0,5	23,2	0,12	0,09	1,31	6,73	0,28	1,59	7,01	4,0	82,6	16,12	1,14	2,45	54	41	9	50	209
20-40	4,7	0,4	9,7	0,10	0,05	1,02	4,47	0,19	1,21	4,66	4,1	84,3	11,95	1,11	2,58	57	35	15	49	(21)
40-60	4,9	1,1	4,8	0,06	0,03	0,68	3,26	0,11	0,78	3,37	3,2	86,4	7,22	1,10	2,58	57	30	17	52	
60-100	5,0	0,5	3,9	0,03	0,02	0,61	2,98	0,07	0,68	3,05	2,3	89,8	6,14	1,09	2,60	58	30	16	54	
Plintossolo Pétrico (FF)																				
0-20	4,7	1,3	34,5	0,06	0,08	2,23	9,07	0,26	2,49	9,33	2,8	89,5	24,50	1,10	2,50	56	33	9	58	196
20-40	4,8	0,7	15,8	0,06	0,05	2,08	6,36	0,17	2,25	6,53	2,6	92,4	22,26	1,12	2,58	57	27	12	61	(39)
40-60	5,0	0,7	6,6	0,03	0,03	1,28	3,78	0,09	1,38	3,87	2,4	93,2	10,76	1,12	2,60	58	26	29	45	
60-100	5,0	0,9	5,1	0,03	0,02	1,12	3,18	0,08	1,20	3,26	2,4	93,4	8,73	1,12	2,60	57	27	30	44	

pH em H₂O - relação solo:água 1:2,5; extratores: P e K (Mehlich-1); Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ (KCl 1 mol/L); H + Al (acetato de cálcio 0,5 mol/L, a pH 7,0); CO = carbono orgânico determinado pelo método Walkley & Black e convertido para CHNS/O; SB = soma de bases trocáveis; t = capacidade de troca catiônica efetiva; T = capacidade de troca catiônica total a pH 7,0; V = índice de saturação por bases; m = índice de saturação por alumínio; DS = densidade do solo; DP = densidade da partícula; PT = porosidade total; * = desvio padrão.

Quadro 12 - Características químicas e físicas dos solos estudados e produtividade média de plantações de eucalipto aos 84 meses de idade, na região de Virginópolis

Profundidade	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	V	m	CO	DS	DP	PT	Areia	Silte	Argila	Prod.
cm	H ₂ O	—mg/dm ³ —		cmol _c /dm ³								%		g/kg	g/cm ³		g/kg			m ³ /ha
Cambissolo Háplico (CX)																				
0-20	4,7	1,9	27,0	0,16	0,12	1,71	9,11	0,36	2,07	9,47	3,8	82,5	26,98	0,94	2,56	65	31	8	63	246
20-40	4,8	0,8	12,5	0,05	0,06	0,95	5,90	0,15	1,10	6,06	2,6	85,9	17,29	0,91	2,56	64	26	18	56	(48)*
40-60	4,8	0,6	8,7	0,05	0,05	0,83	5,12	0,13	0,95	5,24	2,4	86,6	13,69	0,91	2,59	65	25	12	63	
60-100	4,8	0,5	5,2	0,03	0,04	0,78	4,75	0,09	0,87	4,84	1,9	89,6	10,95	0,93	2,58	64	25	14	61	
Latossolo Amarelo (LA)																				
0-20	4,7	2,1	23,8	0,09	0,09	1,32	9,29	0,27	1,58	9,56	2,8	83,1	33,62	0,96	2,46	64	25	10	65	307
20-40	4,7	0,8	7,9	0,03	0,04	0,71	5,81	0,10	0,81	5,90	1,7	87,7	22,23	0,85	2,42	62	19	5	75	(70)
40-60	4,8	0,5	3,1	0,02	0,03	0,48	4,35	0,06	0,54	4,41	1,4	88,5	12,54	0,96	2,52	65	18	9	73	
60-100	4,9	0,4	2,5	0,02	0,03	0,43	3,73	0,06	0,49	3,80	1,7	87,0	9,36	0,81	2,37	59	19	9	73	
Latossolo Vermelho (LV)																				
0-20	4,7	1,6	26,1	0,04	0,06	1,31	7,63	0,20	1,51	7,82	2,5	87,0	28,50	0,88	2,50	65	30	9	60	274
20-40	4,9	0,6	12,5	0,01	0,03	0,65	5,16	0,09	0,74	5,25	1,7	87,9	19,60	0,92	2,59	65	28	9	63	(71)
40-60	4,9	0,3	7,9	0,01	0,02	0,39	4,07	0,06	0,45	4,13	1,5	86,6	12,57	0,96	2,62	65	23	6	71	
60-100	4,9	0,2	5,8	0,01	0,02	0,31	3,56	0,05	0,36	3,61	1,4	85,8	9,87	0,96	2,62	64	22	6	72	
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)																				
0-20	4,6	1,9	23,2	0,15	0,12	1,37	7,81	0,34	1,72	8,15	4,2	80,1	29,55	0,87	2,43	64	28	6	65	272
20-40	4,8	0,8	12,5	0,05	0,06	0,84	5,53	0,15	1,00	5,69	2,7	84,6	19,43	0,89	2,53	65	23	8	69	(74)
40-60	4,8	0,5	10,3	0,03	0,04	0,63	4,78	0,11	0,74	4,88	2,2	85,5	13,27	0,88	2,55	65	22	8	70	
60-100	4,8	0,4	9,4	0,02	0,04	0,61	4,44	0,09	0,70	4,54	2,1	86,6	10,63	0,88	2,54	65	21	7	72	
Neossolo Flúvico (RU)																				
0-20	4,7	3,1	43,2	0,54	0,36	1,42	8,48	1,05	2,47	9,54	11,1	57,3	23,56	1,19	2,12	46	19	12	69	212
20-40	5,0	1,1	15,5	0,16	0,12	0,86	4,66	0,34	1,20	5,00	6,7	71,8	12,15	1,20	2,13	43	14	16	69	(73)
40-60	5,2	1,1	6,0	0,08	0,06	0,61	3,03	0,17	0,78	3,21	5,4	77,7	6,98	1,32	2,37	43	22	29	49	
60-100	5,3	0,9	4,3	0,11	0,05	0,58	2,25	0,18	0,77	2,43	7,5	76,1	4,76	1,41	2,48	43	24	40	36	
Plintossolo Pétrico (FF)																				
0-20	4,8	3,1	28,0	0,04	0,09	1,91	7,72	0,21	2,12	7,93	2,7	90,0	32,04	0,91	2,58	65	12	42	47	178
20-40	5,4	0,7	7,7	0,03	0,03	0,80	3,79	0,09	0,89	3,88	2,3	89,9	13,19	0,90	2,71	67	9	37	54	(n.d.)
40-60	5,2	0,5	4,0	0,04	0,03	0,51	2,64	0,08	0,59	2,71	2,9	86,7	8,41	0,91	2,73	67	9	27	64	
60-100	5,3	0,3	2,1	0,04	0,02	0,36	1,98	0,08	0,43	2,06	3,8	82,0	5,32	0,93	2,74	66	10	41	50	

pH em H₂O - relação solo:água 1:2,5; extratores: P e K (Mehlich-1); Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ (KCl 1 mol/L); H + Al (acetato de cálcio 0,5 mol/L, a pH 7,0); CO = carbono orgânico determinado pelo método Walkley & Black e convertido para CHNS/O; SB = soma de bases trocáveis; t = capacidade de troca catiônica efetiva; T = capacidade de troca catiônica total a pH 7,0; V = índice de saturação por bases; m = índice de saturação por alumínio; DS = densidade do solo; DP = densidade da partícula; PT = porosidade total; * = desvio padrão; (n.d.) = não determinado (produção proveniente de apenas uma observação).

Quadro 13 - Estoque de carbono no solo (ECS), por região, classes e profundidades, sob plantações de eucalipto, aos 84 meses de idade

Profundidade	Região ⁽¹⁾					Média	s
	CO	RD	SA	SB	VI		
cm	ECS (t/ha)						
	Cambissolo Háplico (CX)						
0-20	57,72	32,18	56,06	41,00	50,59	47,51	10,8
20-40	36,86	21,46	33,22	26,32	31,42	29,86	6,0
40-60	36,38	16,22	23,48	21,28	24,94	24,46	7,4
60-100	37,44	24,11	34,19	32,55	40,84	33,82	6,3
Total	168,40	93,96	146,94	121,15	147,80	135,65	28,7
	Latossolo Amarelo (LA)						
0-20	48,62	32,72	46,28	32,70	64,78	45,02	13,3
20-40	36,88	22,14	29,08	26,10	37,83	30,41	6,8
40-60	22,45	15,22	15,42	18,64	24,03	19,15	4,0
60-100	34,05	23,46	24,11	23,00	30,41	27,00	5,0
Total	142,00	93,53	114,89	100,43	157,05	121,58	27,2
	Latossolo Vermelho (LV)						
0-20	36,88	34,75	55,79	66,12	50,41	48,79	13,1
20-40	26,94	24,63	32,69	38,15	36,18	31,72	5,8
40-60	20,29	15,93	25,41	31,27	24,02	23,38	5,7
60-100	35,53	26,87	37,60	47,53	37,94	37,09	7,4
Total	119,63	102,18	151,50	183,07	148,55	140,99	31,2
	Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)						
0-20	44,25	33,07	54,20	36,65	51,61	43,95	9,2
20-40	31,25	22,84	46,95	26,51	34,40	32,39	9,3
40-60	19,40	14,84	32,62	15,85	23,35	21,21	7,2
60-100	31,24	24,35	47,18	26,88	37,29	33,39	9,1
Total	126,14	95,10	180,95	105,89	146,66	130,95	34,2
	Neossolo Flúvico (RU)						
0-20	43,60	28,69	48,11	-	55,97	44,09	11,5
20-40	19,63	13,77	13,05	-	29,08	18,88	7,4
40-60	14,82	11,60	7,35	-	18,38	13,04	4,7
60-100	20,66	17,34	11,49	-	26,77	19,07	6,4
Total	98,72	71,40	80,01	-	130,20	95,08	26,0
	Plintossolo Pétrico (FF)						
0-20	36,25	13,14	61,62	54,02	58,28	44,66	20,2
20-40	32,89	5,37	31,14	49,65	23,72	28,55	16,1
40-60	32,67	3,42	20,31	24,06	15,26	19,14	10,8
60-100	6,87	6,66	25,87	39,06	19,81	19,65	13,7
Total	108,68	28,59	138,95	166,78	117,06	112,01	51,8
Média	127,26	80,79	135,54	112,89	141,22	122,71	

⁽¹⁾ CO = Cocais; RD = Rio Doce; SA = Sabinópolis; SB = Santa Bárbara; VI = Virginópolis; s = desvio padrão.

Dentro da classe dos Latossolos, maior valor absoluto de ECS foi verificado no LV, com 183,07 t/ha, seguido pelo LVA, com 180,95 t/ha, e pelo LA, com 157,05 t/ha, para as regiões de Santa Bárbara, Sabinópolis e Virginópolis. Considerando o C orgânico médio estocado por classe de solo, a quantidade nos Latossolos (131,17 t/ha) se aproximou da observada na classe dos Cambissolos (135,65 t/ha).

Os maiores ECS encontrados na classe dos Latossolos podem estar correlacionados às características destes solos. Em geral, estes são profundos e bem drenados, praticamente sem impedimentos ao crescimento do sistema radicular do eucalipto, o que poderia estar influenciando positivamente a manutenção de C orgânico no solo. Os Latossolos apresentam maior teor de argila que as demais classes, com valores médios acima de 60 % e alto grau de flocculação de argila, características que conferem maior proteção física ao C orgânico, devido à formação de complexos argilo-orgânicos, menos propensos à decomposição. Esse fato foi constatado por Rezende (2002) em uma ampla variação de solos, ao verificar que 52 a 98 % do C orgânico estão associados à fração argila, o que limitaria a mineralização da matéria orgânica do solo (MOS). Além da argila, os sesquióxidos de Fe, Al e Mn também influenciam a estabilização da MOS em muitos solos de clima tropical, como os Latossolos, exercendo proteção física aos compostos orgânicos, causando perda de solubilidade e envolvendo estes compostos em Fe insolúvel ou hidróxidos de Al (Zech et al., 1997).

Somado às características mencionadas, os LVs, nas regiões, ocorrem preferencialmente nos topos aplainados mais expressivos do relevo ondulado e forte ondulado ou nas encostas com declives mais acentuados (CENIBRA, 2001, 2005). Nessa condição, em altitude média superior a 600 m, o clima é ameno, com temperatura média anual e déficit hídrico mais baixo, quando comparado àquele da região de relevo mais plano e de altitude inferior, como na região do RD, resultando em menores taxas de decomposição e mineralização da MOS.

Nas áreas de Neossolos Flúvicos (RU) e Plintossolos Pétricos (FF) encontram-se os menores ECS (Quadro 13). Resultados semelhantes foram obtidos por Menezes (2005), ao avaliar a produtividade da cultura do eucalipto em áreas com RU e FF, nas regiões de Rio Doce e Virginópolis. Esses resultados podem estar relacionados ao fato de esses solos serem relativamente jovens, com características morfológicas pouco definidas. Ambos se caracterizam por apresentar ampla variabilidade quanto às características morfológicas, químicas e físicas, como: pouco profundos ou com pequena expressão dos processos pedogenéticos, tendo como consequência modificações pouco expressivas no material de origem, com presença, ou não, de horizonte B definido e decréscimo irregular do teor de C com a profundidade.

Sabinópolis e Virginópolis são as regiões com maior ECS (0-100 cm), com média de 135,54 e 141,22 t/ha, respectivamente (Quadro 13). A pequena variação no ECS entre as regiões (diferença de 4 %) reflete a semelhança de características ambientais (Quadro 1) e do solo entre elas (Quadro 10 e 12).

Considerando-se as classes de solo e regiões, o estoque de C orgânico no solo foi menor na região do Rio Doce (Quadro 13). Esta região é situada em relevo mais plano que o das demais, com altitude média de 290 m, clima tropical (Aw), temperatura média anual de 25,5 °C e déficit hídrico acentuado (300 mm), durante os meses de inverno (Quadro 1). Nessas condições, a produtividade média do eucalipto é menor (Quadro 1) e a decomposição e a mineralização da MOS são favorecidas, refletindo, conseqüentemente, em menor quantidade de C incorporado e estocado no solo, comparativamente à das demais regiões em estudo, localizadas em maiores altitudes, de temperaturas mais amenas e déficit hídrico menos acentuado. Além disso, a biomassa de manta orgânica é menor, com média de 16,4 t/ha, aos 84 meses de idade em comparação às demais regiões. Na região de Sabinópolis, a biomassa de manta orgânica acumulada sobre o solo é de 28,8 t/ha, seguida por

Virginópolis, Cocais e Santa Bárbara, com 20,8, 19,2 e 17,7 t/ha, respectivamente (Gatto, 2000; Skorupa, 2000; Leite, 2001).

O estoque de C orgânico no solo resulta, principalmente, da taxa de decomposição dos resíduos da colheita florestal que permanecem sobre a superfície do solo, da manta orgânica e das raízes, que, devido à maior concentração de substâncias recalcitrantes, originam formas mais estáveis de C orgânico no solo (Silva et al., 2004; Schumacker & Witschoreck, 2004). Assim, o plantio de espécies florestais que apresentassem maior quantidade de raízes possibilitaria a alocação de grande quantidade de C orgânico no solo, que permaneceria estocado por período relativamente longo no solo, em comparação com C orgânico estocado na biomassa.

Com respeito às regiões estudadas, maior ECS, aos 84 meses de idade, foi registrado na região de Virginópolis, com 141,223 t/ha, e o menor ECS na região de Rio Doce, com 80,79 t/ha (Quadro 13), refletindo a influência das características edafoclimáticas sobre a produção de biomassa, no aporte, acúmulo e decomposição de material orgânico no solo (Quadros 1, 8 a 12). Nessa mesma região foi verificado menor ECS na classe dos FF, com 28,59 t/ha, porém, como o ECS dessa classe é proveniente de apenas uma avaliação (área e perfil), não é possível afirmar que o ECS, em áreas com predomínio de FF, seja efetivamente menor em relação às demais áreas com predomínio de outras classes de solo.

Em relação às classes de solo, na classe dos LV foi observado maior ECS, com média de 140,99 t/ha, e o menor na classe dos RU, com média de 95,08 t/ha. Esta classe (RU) caracteriza-se por solos constituídos de material mineral ou orgânico, pouco espessos, com pequena expressão dos processos pedogenéticos, que guardam, ainda, características do material de origem. Essa semelhança se deve à resistência ao intemperismo ou à composição química e ao relevo, que podem impedir ou limitar a evolução desses solos (Embrapa, 1999; Resende et al., 2002). Além da interferência das características edafoclimáticas que atuam como

determinantes do ECS, as características genéticas do material utilizado (mudas produzidas por semente ou clones) e o aporte de material orgânico, na forma de manta orgânica e resíduos da colheita, interferem na capacidade produção de biomassa e no estoque de carbono.

4.3. Estoque de carbono no solo e características edafoclimáticas

Relações entre o ECS e as características edafoclimáticas foram analisadas por camada de solo, utilizando a análise de correlação de Pearson (Quadro 14).

Foram analisadas 23 características edafoclimáticas, das quais 20 apresentaram correlação significativa com o ECS. As características químicas do solo que se correlacionaram significativamente foram: K, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H + Al, SB, t, V, m e CO; as físicas: DS, Areia, Silte e Argila e as climáticas: Temperatura média anual, Déficit hídrico anual e Altitude média (Quadro 14). Resultados semelhantes foram encontrados por Menezes (2005), ao avaliar a produtividade de plantações de eucalipto nas regiões de Virginópolis e Rio Doce.

Coefficientes de correlação negativos foram obtidos para o P e para os cátions (K, Ca^{2+} e Mg^{2+}), refletindo na SB e no V. A correlação negativa desses nutrientes pode ser explicada – ao menos para solos de regiões tropicais, em geral muito intemperizados e com baixa fertilidade – pelo fato de eles estarem imobilizados na biomassa vegetal (Barros & Novais, 1996).

Nas mesmas regiões em estudo, Fabres et al. (1987) obtiveram coeficiente de correlação negativo para o K quando relacionaram a biomassa do tronco de eucalipto com o teor de Ca^{2+} e de K no solo, fato este que pode sugerir, por exemplo, afirmativas equivocadas, como: diminuição da produção por aumento dos teores de K no solo.

Quadro 14 - Coeficientes de correlação (r) entre o estoque de carbono no solo e características edafoclimáticas, por profundidade

Característica	Profundidade (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-100
pH em água	-0,1658	-0,3738*	-0,2694	-0,6122**
P, mg/dm ³	-0,2645	-0,1436	-0,0794	-0,3326
K, mg/dm ³	-0,5630**	-0,5796**	-0,4765**	-0,5507**
Ca ²⁺ , cmol _c /dm ³	-0,4892**	-0,6088**	-0,3825*	-0,3984*
Mg ²⁺ , cmol _c /dm ³	-0,5493**	-0,6902**	-0,6316**	-0,5444**
Al ³⁺ , cmol _c /dm ³	0,3381	0,4011*	0,2001	0,2294
H + Al, cmol _c /dm ³	0,7009**	0,6623**	0,5650**	0,4705**
SB, cmol _c /dm ³	-0,5340**	-0,6635**	-0,5080**	-0,5330*
t, cmol _c /dm ³	-0,4123*	-0,0889	-0,0974	-0,0702
V, %	-0,5714**	-0,6980**	-0,5665**	-0,5691**
m, %	0,4590*	0,6568**	0,4599*	0,4205*
CO, g/kg	0,9593**	0,9502**	0,8821**	0,9462**
DS, g/cm ³	-0,5828**	-0,0054	0,18405	0,0697
DP, g/cm ³	0,1347	-0,0729	-0,0651	0,4060*
PT, g/cm ³	0,3227	-0,0094	-0,0253	0,4424*
Areia, g/kg	-0,2734	0,2569*	0,4039*	-0,0317
Silte, g/kg	0,2455	-0,2812	-0,3953*	-0,5388**
Argila, g/kg	0,1356	-0,1176	0,0116	0,5049**
Prod. média aos 7anos, m ³ /ha	0,2601	0,3407	0,2706	0,1730
Temperatura média anual, °C	-0,6074**	-0,3920*	-0,3452	-0,2367
Precipitação média anual, mm	-0,1229	0,1899	0,2236	0,1343
Déficit hídrico anual, mm	-0,4184*	-0,4335*	-0,4823*	-0,2129
Altitude média, m	0,5434**	0,4578*	0,4774*	0,2364

** , * :Significativos a 1 % e 5 %, respectivamente.

Menezes (2005), ao estabelecer relação entre a produtividade e as características do solo das regiões de Rio Doce e Virginópolis, obteve coeficientes de correlação negativos para os nutrientes nos horizontes A, B ou C. Ao correlacionar os teores de nutrientes no solo – estimados para a fase inicial de crescimento das árvores pelo conteúdo de nutrientes existentes nas árvores – aos teores do solo avaliado no final do ciclo, ou

por ocasião do monitoramento, os coeficientes foram sempre positivos, indicando a necessidade de considerar os teores de nutrientes no solo na fase inicial de crescimento da cultura.

Quanto a alumínio trocável (Al^{3+}) e acidez potencial ($H + Al$) do solo, ambos apresentaram coeficientes de correlação positivos em todas as camadas, enquanto o $H + Al$ foi significativo, refletindo no índice de saturação por alumínio (m). Essa condição pode estar associada à absorção dos cátions pelas plantas, fazendo com que reste mais Al^{3+} no solo, que, pela sua toxidez, interfere na atividade microbiana e, por conseguinte, reduz a decomposição e a mineralização da MOS (Zech et al., 1997).

O teor de C orgânico no solo é, obviamente, a variável que melhor se correlacionou com o ECS, o que pode ser confirmado pelos sinais positivos e pela significância dos coeficientes de correlação obtidos (Quadro 14). Esses resultados reforçam as afirmativas acerca da influência benéfica da MOS na produtividade florestal, as quais, por esses motivos, podem ser consideradas como referência das qualidades física, química e biológica do solo.

A densidade do solo (DS) da camada de 0–20 cm de profundidade mostrou correlação significativa com o ESC. A correlação foi positiva, porém não significativa, nas demais camadas. O sinal negativo dessa correlação do ponto de vista de manejo do solo pode estar sinalizando a necessidade do preparo do solo localizado, na faixa de plantio, ao menos para a camada superficial (0–20 cm), pois poderia estar afetando o ECS, pela restrição ao crescimento radicular e aporte de C no solo.

Os teores de areia, silte e argila tiveram coeficientes de correlação negativo e positivo, variando quanto à significância. Trabalhos de pesquisa têm demonstrado que a textura do solo pode interferir na produtividade do eucalipto, sendo considerada como fator determinante na disponibilidade de água para as plantas, visto que o aumento no teor de areia influencia o espaço poroso, facilitando a aquisição de água e nutrientes pelas plantas (Gonçalves et al., 1990; Grespan, 1997; Reschutzegger, 2003).

As características físicas do solo relacionadas à textura atuam muito mais como um fator determinante da disponibilidade de água para as plantas, agindo de modo indireto sobre a produtividade e o ECS. Assim, tem sido reportado que o aumento do teor de silte e argila, até determinados valores, nos horizontes superficiais e subsuperficiais, geralmente, está associado ao aumento no crescimento; também têm sido observadas correlações inversas quando do aumento do adensamento e, ou, compactação do solo em solos argilosos a muito argilosos (Gonçalves et al., 1990; Grespan, 1997; Resende et al., 2002; Reschutzegger, 2003).

Reschutzegger (2003) constatou, em solos do Uruguai, correlação negativa entre a produtividade de eucalipto e o teor de argila na camada de 20–40 cm e considerou que esta característica possa estar representando uma medida indireta de outras propriedades que afetam o crescimento. Resultado semelhante foi constatado neste trabalho, ocorrendo correlação negativa entre o ECS e o teor de argila na camada de 20–40 cm, possivelmente em virtude do relacionamento desta característica com as demais características edafoclimáticas determinantes da produção de biomassa e do EC no sistema solo-planta.

As características climáticas, a altitude e o déficit hídrico apresentaram correlações significativas sobre o ECS. A influência destas características, aparentemente, ocorre de modo mais acentuado na profundidade de 0 a 40 cm (Quadros 14 e 15).

Dentre as características climáticas, o déficit hídrico tem sido reportado como fator ambiental limitante à obtenção de elevada produtividade para o eucalipto. Almeida & Soares (1997) estimaram que, para cada 100 mm de incremento no déficit hídrico, a produtividade do eucalipto na região costeira do Espírito Santo foi reduzida em 4,85 m³/ha/ano. O efeito do estresse hídrico sobre a produtividade do eucalipto também pode ser inferido dos resultados de Leite et al. (1997), nos quais se constatou que a taxa de incremento do crescimento em diâmetro de *Eucalyptus grandis* foi reduzida em 35,9 % com o decréscimo da água disponível no solo.

Além do exposto, tem sido constatado que sob condições de estresse hídrico e nutricional há maior partição relativa de carbono para as raízes, alteração na arquitetura do sistema radicular, com raiz pivotante bifurcada e ocorre maior crescimento das raízes para camadas mais profundas, refletindo em aumento da superfície de aquisição de água e nutrientes (Reis et al., 1985; Gonçalves, 1994; Neves, 2000). Essas condições são mais perceptíveis para a região do Rio Doce (Quadros 1 e 9), onde se determinou, aos 84 meses de idade, biomassa de raízes de 27,88 t/ha, equivalente ao estoque de C de 14,14 t/ha, sendo o segundo maior estoque observado nesse componente, entre as regiões avaliadas (Quadro 18).

Para estimativa do ECS foram selecionadas cinco características edafoclimáticas que apresentam relação direta com o estoque: três características ambientais (altitude, déficit hídrico e temperatura), uma física (argila) e uma química (Al^{3+}). A maior capacidade preditiva do ECS pelos modelos gerados foi para a camada de 0–20 cm de profundidade, com 51,2 % das variações no ECS explicadas pelas variáveis selecionadas. A capacidade preditiva dos modelos decresceu com a profundidade (Quadro 15). Das cinco características edafoclimáticas inseridas nos modelos, verifica-se que somente o Al^{3+} e a argila apresentaram significância. Entretanto, as demais características, mesmo não apresentando significância, contribuíram para a explicação do ECS. O Al^{3+} foi significativo nas camadas de 0–20 e 20–40 cm, e a argila, na camada de 60–100 cm de profundidade. A não-significância das características inseridas no modelo pode estar relacionada ao fato delas terem sido consideradas por classe de solo e região, mascarando as possíveis diferenças entre os solos (Cambissolo, Latossolo, Neossolo e Plintossolo).

Quadro 15 - Equações de regressão para estimativa do estoque de carbono no solo (ECS), em função de cinco características edafoclimáticas para a região Centro-Leste de MG

Profundidade	Equação de regressão	R ²
cm		
0-20	$ECS = -46,9011 + 0,0449^{ns} \text{ Altitude} + 0,1079^{ns} \text{ Déficit hídrico} + 0,4767^{ns} \text{ Temperatura} + 0,1879^{ns} \text{ Argila} + 5,4018^* \text{ Al}^{3+}$	0,512
20-40	$ECS = 42,1866 - 0,0253^{ns} \text{ Argila} - 0,0017^{ns} \text{ Altitude} - 0,6998^{ns} \text{ Temperatura} - 0,0495^{ns} \text{ Déficit hídrico} + 7,2182^{**} \text{ Al}^{3+}$	0,494
40-60	$ECS = 53,5977 - 0,0131^{ns} \text{ Altitude} - 0,0966^{ns} \text{ Déficit hídrico} + 4,3612^{ns} \text{ Al}^{3+} + 0,0753^o \text{ Argila} - 0,7400^{ns} \text{ Temperatura}$	0,353
60-100	$ECS = 120,4090 - 2,1518^{ns} \text{ Temperatura} - 0,1986^{ns} \text{ Déficit hídrico} - 0,0428^{ns} \text{ Altitude} + 0,3300^{**} \text{ Argila} + 6,1261^{ns} \text{ Al}^{3+}$	0,431

** , * , o , e ns: Significativos a 1 %, 5 % e 10 % e não-significativo, respectivamente.

4.4. Estoque de carbono na biomassa

Para estimar a biomassa dos componentes das árvores (tronco, lenho, casca, galhos, folhas e raízes) e da manta orgânica de plantações de eucalipto, numa seqüência de idades (24 a 120 meses), área (ha) e região, foram geradas equações de regressão e, ou, calculada a partição desses componentes em relação à biomassa do tronco (Quadros 16 e 17), sendo posteriormente convertida em estoque de carbono na biomassa (ECB) (Quadro 18).

Para as regiões de Cocais e Virginópolis, em razão do número limitado de dados disponíveis de biomassa dos componentes das árvores e de se referirem a dados coletados aos 96 a 120 e 85 a 120 meses de idade, respectivamente, exceto para biomassa do tronco, não foram geradas equações de regressão, sendo considerada a partição dos componentes em relação à biomassa do tronco registrada nas respectivas idades.

A partição da biomassa dos componentes das árvores, em função da biomassa do tronco, foi semelhante entre si para todas as idades e regiões (Quadro 17). O lenho apresenta maior contribuição para a biomassa, com média de 0,70, seguido por raízes (0,16), casca (0,08), galhos (0,04) e folhas (0,02).

Quadro 16 - Equações de regressão para estimativa da biomassa do tronco, partição dos componentes das árvores (lenho, casca, galhos e folhas) em função da idade (i = idade em meses), por região, equações gerais para estimativa da biomassa do tronco, raízes, manta orgânica e partição dos componentes para a região Centro-Leste de MG

Componente	Equação de regressão	r
Cocais		
Tronco	$\hat{Y}_{Tr} = -4,3921 + 1,1143i + 0,0044i^2$	0,944
Lenho	$\frac{W_L}{W_{Tr}} = 0,90$	-
Casca	$\frac{W_C}{W_{Tr}} = 0,10$	-
Galhos	$\frac{W_G}{W_{Tr}} = 0,04$	-
Folhas	$\frac{W_F}{W_{Tr}} = 0,02$	-
Rio Doce		
Tronco	$\hat{Y}_{Tr} = 150,9416 / (1 + 21,1017 \exp(-0,0925i))$	0,992
Lenho	$\frac{W_L}{W_{Tr}} = 0,9116 / (1 + 0,1831 \exp(-0,0764i))$	0,936
Casca	$\frac{W_C}{W_{Tr}} = 0,0893 / (1 - 1,9056 \exp(-0,0882i))$	0,946
Galhos	$\frac{W_G}{W_{Tr}} = 0,0618 / (1 - 5,4656 \exp(-0,1069i))$	0,916
Folhas	$\frac{W_F}{W_{Tr}} = 0,0199 / (1 - 1,8713 \exp(-0,0390i))$	0,912
Sabinópolis		
Tronco	$\hat{Y}_{Tr} = 279,5691 / (1 + 17,4880 \exp(-0,0390i))$	0,981
Lenho	$\frac{W_L}{W_{Tr}} = 0,8902 / (1 + 0,8659 \exp(-0,1559i))$	0,932
Casca	$\frac{W_C}{W_{Tr}} = 0,1101 / (1 - 1,4709 \exp(-0,0922i))$	0,938
Galhos	$\frac{W_G}{W_{Tr}} = 0,0185 / (1 - 1,0825 \exp(-0,0079i))$	0,981
Folhas	$\frac{W_F}{W_{Tr}} = 0,0187 / (1 - 1,8467 \exp(-0,0316i))$	0,988

Continua...

Quadro 16 - Continuação

Componente	Equação de regressão	r
Santa Bárbara		
Tronco	$\hat{Y}_{Tr} = 197,147 / (1 + 28,1900 \exp(-0,0537i))$	0,985
Lenho	$\frac{W_L}{W_{Tr}} = 0,9000 / (1 + 0,3528 \exp(-0,0946i))$	0,936
Casca	$\frac{W_C}{W_{Tr}} = 0,1001 / (1 - 2,8721 \exp(-0,1000i))$	0,937
Galhos	$\frac{W_G}{W_{Tr}} = 0,0286 / (1 - 1,2611 \exp(-0,0156i))$	0,973
Folhas	$\frac{W_F}{W_{Tr}} = 0,0063 / (1 - 1,0795 \exp(-0,0048i))$	0,972
Virginópolis		
Tronco	$\hat{Y}_{Tr} = -3,3456 + 0,7123x + 0,0084i^2$	0,964
Lenho	$\frac{W_L}{W_{Tr}} = 0,89$	-
Casca	$\frac{W_C}{W_{Tr}} = 0,11$	-
Galhos	$\frac{W_G}{W_{Tr}} = 0,04$	-
Folhas	$\frac{W_F}{W_{Tr}} = 0,02$	-
Equação geral		R²
Tronco	$\hat{Y}_{Tr} = 0,5860 + 1,5534i + 0,0014i^2$	0,873
Lenho	$\frac{W_L}{W_{Tr}} = -1,2149 + 0,9190i - 7,9195e - 005i^2$	0,999
Casca	$\frac{W_C}{W_{Tr}} = 1,1971 + 0,0801i + 8,5275e - 05i^2$	0,961
Folhas	$\frac{W_F}{W_{Tr}} = 1,7158i^{0,1373}$	0,338
Galhos	$\frac{W_G}{W_{Tr}} = 0,5264i^{0,5029}$	0,762
Raízes	$\hat{Y}_R = 176,4035(1 - \exp(-0,0011\hat{Y}_{Tr}))$	0,971
Manta orgânica	$\hat{Y}_{Mo} = 3,5154 + 0,1943\hat{Y}_{Tr} - 0,0006\hat{Y}_{Tr}^2$	0,934

r = coeficiente de correlação; \hat{Y}_{Tr} = biomassa do tronco, em t/ha; W = biomassa; L = lenho; Tr = tronco; C = casca; F = folhas; G = galhos; \hat{Y}_R = biomassa de raízes; e \hat{Y}_{Mo} = biomassa de manta orgânica; R² = coeficiente de determinação.

Quadro 17 - Partição da biomassa dos componentes das árvores (lenho, casca, folhas, galhos e raízes), por região, em função da biomassa do tronco, numa seqüência de idade

Componente	Idade (meses)								
	24	36	48	60	72	84	96	108	120
Cocais									
Lenho	0,71	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
Casca	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Folhas	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Galhos	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Raízes	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Rio Doce									
Lenho	0,64	0,69	0,71	0,71	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
Casca	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Folhas	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Galhos	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Raízes	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Sabinópolis									
Lenho	0,58	0,66	0,69	0,70	0,71	0,71	0,72	0,72	0,72
Casca	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Folhas	0,09	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Galhos	0,12	0,07	0,06	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
Raízes	0,13	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14
Santa Bárbara									
Lenho	0,55	0,65	0,68	0,70	0,71	0,72	0,72	0,73	0,73
Casca	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Folhas	0,10	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Galhos	0,14	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
Raízes	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Virginópolis									
Lenho	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,72	0,72
Casca	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Folhas	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Galhos	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Raízes	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

A biomassa do tronco aos 84 meses, idade usualmente utilizada na definição da data de corte da floresta para as regiões em estudo, variou de 162,94 a 229,57 t/ha (Quadro 18). Esses valores corresponderam, em média, a 71,9 % da produção total de biomassa. O lenho, componente de maior interesse comercial, corresponde, em média, a 64,7 % da biomassa total. Após o lenho, o sistema radicular é o componente com maior produção de biomassa, com média de 26,36 t/ha, representando 13,5 % da biomassa total, seguido de manta orgânica, com 19,03 t/ha (9,7 %); casca, com 14,32 t/ha (7,3 %); galhos, com 6,46 t/ha (3,3 %); e folhas, com 2,99 t/ha (1,5 %).

A região de Sabinópolis apresenta maior produtividade (32,80 t/ha) aos 84 meses de idade e, conseqüentemente, maior estoque de C. A partir dos 84 meses, o incremento médio em biomassa tende a se estabilizar para as regiões de Rio Doce e Santa Bárbara e, aos 96 meses de idade, para a região de Sabinópolis. Contudo, nas regiões de Cocais e Virginópolis, a produtividade e a alocação de C continuam crescentes, indicando que o incremento médio anual não se estabilizou. Essa condição indica que a idade de corte das plantações florestais, nessas duas regiões, do ponto de vista biológico e econômico, deve ser superior a sete anos (Quadro 18).

A produção de biomassa do sistema radicular merece destaque. Seus valores variaram de 22,00 a 31,03 t/ha, aos 84 meses de idade, para as regiões de Virginópolis e Sabinópolis (Quadro 18). Esses valores se assemelham àqueles encontrados por Mello et al. (1998) e Santana (2000), ao avaliarem a produção de biomassa da parte aérea e do sistema radicular de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, aos sete anos de idade. Os autores verificaram que a biomassa radicular correspondeu, respectivamente, a 18,0 % e 19,5 % da biomassa total e do lenho.

Quadro 18 - Biomassa e estoque de carbono na biomassa nos componentes das árvores (lenho, casca, folhas, galhos e raízes) e da manta orgânica de plantações de eucalipto, por região, numa seqüência de idade

Componente	Idade (meses)									Média	Idade (meses)									Média
	24	36	48	60	72	84	96	108	120		24	36	48	60	72	84	96	108	120	
	Biomassa (t/ha)									t/ha/ano	ECB (t/ha)									t/ha/ano
	Cocais										Cocais									
Lenho	22,42	37,33	53,40	70,61	88,98	108,50	129,17	150,99	173,97	13,18	11,36	18,91	27,05	35,77	45,08	54,97	65,44	76,49	88,13	6,68
Casca	2,49	4,15	5,93	7,85	9,89	12,06	14,35	16,78	19,33	1,46	1,19	1,99	2,85	3,76	4,74	5,78	6,88	8,05	9,27	0,70
Folhas	0,50	0,83	1,19	1,57	1,98	2,41	2,87	3,36	3,87	0,29	0,26	0,44	0,62	0,82	1,04	1,27	1,51	1,76	2,03	0,15
Galhos	1,00	1,66	2,37	3,14	3,95	4,82	5,74	6,71	7,73	0,59	0,52	0,87	1,25	1,65	2,08	2,53	3,01	3,52	4,06	0,31
Raízes	4,98	8,22	11,63	15,22	18,96	22,84	26,84	30,95	35,16	2,79	2,53	4,17	5,90	7,72	9,61	11,58	13,61	15,69	17,83	1,42
Manta orgânica	7,99	10,57	12,98	15,15	17,00	18,42	19,33	19,62	19,18	2,58	4,07	5,39	6,62	7,73	8,67	9,39	9,86	10,00	9,78	1,31
Total	39,38	62,75	87,50	113,54	140,75	169,05	198,30	228,41	259,23	20,89	19,94	31,76	44,28	57,45	71,21	85,52	100,31	115,52	131,10	10,57
Média (t/ha/ano)	19,69	20,92	21,88	22,71	23,46	24,15	24,79	25,38	25,92		9,97	10,59	11,07	11,49	11,87	12,22	12,54	12,84	13,11	
	Rio Doce										Rio Doce									
Lenho	40,62	77,49	109,67	126,93	133,88	136,34	137,18	137,46	137,55	18,69	20,58	39,26	55,56	64,30	67,82	69,07	69,49	69,64	69,68	9,47
Casca	5,24	8,51	11,20	12,57	13,09	13,27	13,32	13,34	13,34	1,93	2,51	4,08	5,37	6,03	6,28	6,36	6,39	6,40	6,40	0,93
Folhas	3,43	3,17	3,38	3,39	3,30	3,21	3,14	3,09	3,06	0,63	1,80	1,66	1,78	1,78	1,73	1,69	1,65	1,62	1,61	0,33
Galhos	4,88	6,02	7,72	8,70	9,11	9,25	9,30	9,32	9,33	1,41	2,56	3,16	4,05	4,57	4,78	4,86	4,89	4,89	4,90	0,74
Raízes	9,06	16,61	22,89	26,14	27,43	27,88	28,03	28,08	28,10	3,90	4,59	8,42	11,61	13,26	13,91	14,14	14,21	14,24	14,25	1,98
Manta orgânica	11,19	15,89	18,44	19,22	19,41	19,47	19,48	19,49	19,49	3,19	5,71	8,10	9,40	9,80	9,90	9,93	9,93	9,94	9,94	1,63
Total	74,43	127,69	173,30	196,96	206,22	209,42	210,46	210,78	210,87	29,76	37,76	64,69	87,76	99,74	104,42	106,04	106,56	106,73	106,77	15,07
Média (t/ha/ano)	37,22	42,56	43,33	39,39	34,37	29,92	26,31	23,42	21,09		18,88	21,56	21,94	19,95	17,40	15,15	13,32	11,86	10,68	

Continua...

Quadro 18 - Continuação

Componente	Idade (meses)									Média	Idade (meses)									Média
	24	36	48	60	72	84	96	108	120		24	36	48	60	72	84	96	108	120	
	Biomassa (t/ha)									t/ha/ano	ECB (t/ha)									t/ha/ano
	Sabinópolis										Sabinópolis									
Lenho	31,02	46,83	67,38	92,65	121,04	149,79	175,97	197,60	214,08	17,34	15,72	23,73	34,14	46,94	61,32	75,88	89,15	100,10	108,45	8,79
Casca	4,54	5,94	8,35	11,43	14,93	18,47	21,70	24,36	26,40	2,18	2,18	2,85	4,00	5,48	7,16	8,86	10,41	11,69	12,66	1,05
Folhas	4,00	2,42	2,38	2,70	3,14	3,62	4,06	4,43	4,70	0,65	2,10	1,27	1,25	1,41	1,65	1,90	2,13	2,32	2,47	0,34
Galhos	6,31	5,27	5,41	5,91	6,50	7,04	7,42	7,63	7,67	1,21	3,32	2,77	2,84	3,10	3,42	3,70	3,90	4,00	4,03	0,63
Raízes	7,07	10,39	14,71	19,90	25,53	31,03	35,87	39,74	42,62	3,65	3,58	5,27	7,46	10,09	12,95	15,73	18,18	20,15	21,61	1,85
Manta orgânica	9,68	12,14	14,87	17,39	19,10	19,62	19,03	17,77	16,35	2,81	4,94	6,19	7,58	8,87	9,74	10,00	9,70	9,06	8,34	1,43
Total	62,63	82,99	113,10	149,97	190,25	229,57	264,04	291,52	311,81	27,83	31,83	42,07	57,27	75,89	96,23	116,08	133,47	147,32	157,55	14,09
Média (t/ha/ano)	31,32	27,66	28,28	29,99	31,71	32,80	33,01	32,39	31,18		15,92	14,02	14,32	15,18	16,04	16,58	16,68	16,37	15,76	
	Santa Bárbara										Santa Bárbara									
Lenho	19,52	34,52	56,26	83,41	111,51	135,42	152,59	163,46	169,81	14,42	9,89	17,49	28,50	42,25	56,49	68,60	77,30	82,81	86,03	7,30
Casca	2,96	4,28	6,49	9,38	12,44	15,06	16,96	18,16	18,87	1,67	1,42	2,05	3,11	4,50	5,97	7,23	8,13	8,71	9,05	0,80
Folhas	3,67	2,64	2,75	3,05	3,29	3,38	3,33	3,19	3,01	0,61	1,93	1,39	1,44	1,60	1,73	1,78	1,75	1,67	1,58	0,32
Galhos	4,87	3,97	4,46	5,26	6,02	6,54	6,77	6,79	6,71	1,01	2,56	2,08	2,34	2,76	3,16	3,43	3,55	3,57	3,52	0,53
Raízes	4,50	7,70	12,28	17,85	23,43	28,03	31,25	33,25	34,41	3,04	2,28	3,90	6,23	9,05	11,88	14,21	15,84	16,86	17,44	1,54
Manta orgânica	7,59	10,17	13,40	16,50	18,60	19,48	19,61	19,47	19,31	2,63	3,87	5,19	6,83	8,41	9,48	9,93	10,00	9,93	9,85	1,34
Total	43,11	63,29	95,63	135,45	175,29	207,92	230,51	244,33	252,12	23,37	21,94	32,10	48,45	68,58	88,71	105,18	116,58	123,55	127,47	11,84
Média (t/ha/ano)	21,56	21,10	23,91	27,09	29,22	29,70	28,81	27,15	25,21		10,97	10,70	12,11	13,72	14,79	15,03	14,57	13,73	12,75	

Continua...

Quadro 18 - Continuação

Componente	Idade (meses)									Média	Idade (meses)									Média
	24	36	48	60	72	84	96	108	120		24	36	48	60	72	84	96	108	120	
	Biomassa (t/ha)									t/ha/ano	ECB (t/ha)									t/ha/ano
	Virginópolis										Virginópolis									
Lenho	16,55	29,55	44,70	62,01	81,47	103,09	126,87	152,80	180,88	12,09	8,38	14,97	22,64	31,41	41,27	52,23	64,27	77,41	91,64	6,13
Casca	2,05	3,65	5,52	7,66	10,07	12,74	15,68	18,89	22,36	1,49	0,98	1,75	2,65	3,68	4,83	6,11	7,52	9,06	10,72	0,72
Folhas	0,37	0,66	1,00	1,39	1,83	2,32	2,85	3,43	4,06	0,27	0,20	0,35	0,53	0,73	0,96	1,22	1,50	1,80	2,13	0,14
Galhos	0,74	1,33	2,01	2,79	3,66	4,63	5,70	6,87	8,13	0,54	0,39	0,70	1,05	1,46	1,92	2,43	2,99	3,61	4,27	0,29
Raízes	3,73	6,61	9,90	13,58	17,62	22,00	26,67	31,60	36,76	2,59	1,89	3,35	5,02	6,89	8,94	11,15	13,52	16,02	18,64	1,31
Manta orgânica	6,93	9,32	11,80	14,21	16,39	18,16	19,30	19,60	18,80	2,42	3,53	4,75	6,01	7,24	8,36	9,26	9,84	9,99	9,59	1,23
Total	30,37	51,11	74,93	101,64	131,05	162,94	197,07	233,19	271,00	19,40	15,37	25,87	37,91	51,41	66,28	82,40	99,65	117,89	136,99	9,81
Média (t/ha/ano)	15,19	17,04	18,73	20,33	21,84	23,28	24,63	25,91	27,10		7,69	8,62	9,48	10,28	11,05	11,77	12,46	13,10	13,70	

A produção de biomassa da parte aérea e das raízes é influenciada pela capacidade produtiva do sítio. Tem sido registrada maior produção de biomassa de raízes em sítios onde os estresses nutricional e, ou, hídrico são mais acentuados (Reis et al., 1985; Gonçalves, 1994). Quando a disponibilidade de água e nutrientes é limitada, as árvores tendem a alocar, em termos relativos, mais fotoassimilados nas raízes, em detrimento dos demais componentes da árvore. O aumento da densidade de raízes permite que maior volume de solo seja explorado, aumentando a capacidade de absorção de água e nutrientes pelas árvores (Gonçalves & Mello, 2000).

Independentemente da região, constatou-se aumento do estoque de C orgânico nos componentes de árvores de eucalipto com o aumento da idade, exceto para o componente folhas, nas regiões de RD e SB. Já a biomassa e o estoque de C orgânico na manta orgânica tendem a decrescer para todas as regiões e em idades mais avançadas.

De todos os componentes analisados, os maiores estoques de C foram registrados no lenho e nas raízes, em virtude da maior biomassa produzida. A região de Sabinópolis foi a mais produtiva dentre todas, com 149,79 e 31,03 t/ha, respectivamente de biomassa de lenho e raízes, aos 84 meses de idade (Quadro 18).

4.5. Estoque de carbono total no sistema solo-biomassa

Para fins de avaliação do estoque de carbono total (ECT) no sistema solo-biomassa de plantações de eucalipto, aos 84 meses de idade, considerou-se o C estocado no lenho, nos resíduos da colheita e do C estocado no solo até 100 cm de profundidade (Quadro 19).

Nas cinco regiões, aos 84 meses de idade, em média, o EC no lenho correspondeu a 29 % (64,15 t/ha) do ECT no sistema solo-biomassa; os resíduos da colheita, a 16 % (34,89 t/ha); e o solo, a 55 % (122,71 t/ha) (Quadro 19).

Considerando as cinco regiões, o ECB (lenho + resíduos) médio, foi de 14,15 t/ha/ano, correspondendo 64,8 % ao lenho, 13,5 % às raízes, 9,8 % à manta orgânica, 6,9 % à casca, 3,4 % aos galhos e 1,6 % às folhas. Reis et al. (1994), empregando o método indireto de estimativa do ECB em plantações de eucalipto com produtividade média de 35 m³/ha/ano, aos 84 meses de idade e densidade da madeira equivalente a 430 kg/m³, estimaram-no em 10,32 t/ha/ano, sendo 65 % provenientes da biomassa do tronco, 13 % da copa e 22 % de raízes. Acrescentaram, ainda, 20 % ao valor estocado na biomassa viva, correspondente à produção média de matéria orgânica morta ao longo de uma rotação de sete anos, resultando no ECB de 12,38 t/ha/ano.

Quadro 19 - Estoque de carbono total (ECT) e partição no sistema solo-biomassa de plantações de eucalipto, aos 84 meses de idade

Compartimento	Região ⁽¹⁾					Média
	CO	RD	SA	SB	VI	
	ECT (t/ha)					
Lenho	54,97 (0,26) ²	69,07 (0,37)	75,88 (0,30)	68,60 (0,31)	52,23 (0,23)	64,15 (0,29)
Resíduos ⁽³⁾	30,55 (0,14)	36,98 (0,20)	40,19 (0,16)	36,58 (0,17)	30,17 (0,13)	34,89 (0,16)
Solo (0-100 cm)	127,26 (0,60)	80,79 (0,43)	135,54 (0,54)	112,89 (0,52)	141,22 (0,63)	122,71 (0,55)
Total	212,78 (1,00)	186,84 (1,00)	251,61 (1,00)	218,07 (1,00)	223,62 (1,00)	221,75 (1,00)

⁽¹⁾ CO = Cocais; RD = Rio Doce; SA = Sabinópolis; SB = Santa Bárbara; VI = Virginópolis; ⁽²⁾ Partição do EC em relação ao ECT; ⁽³⁾ Resíduos da colheita (casca + folhas + galhos + raízes + manta orgânica).

O ECB médio, obtido neste trabalho (14,15 t/ha/ano), aos 84 meses de idade é superior aos comumente usados como referência do potencial de fixação de C de plantações florestais de rápido crescimento, implantadas com espécies do gênero *Eucalyptus* no Brasil e no mundo. Comparativamente a outros países, tradicionais produtores de madeira, localizados em regiões geográficas de clima temperado, como a Nova Zelândia, o Chile e o Canadá, o país apresenta grande potencial de contribuição ao esforço coletivo mundial para mitigação do aquecimento global, com a implantação de novas áreas com plantações florestais de rápido crescimento.

Entre as cinco regiões, o ECS em relação ao ECT, variou de 43 % na região de Rio Doce, a 63 %, em Virginópolis. Esses valores percentuais correspondem a 80,79 e 141,22 t/ha de C, respectivamente.

Os resultados apresentados endossam a premissa de que os solos sob plantações florestais de rápido crescimento, em regiões tropicais, podem ser considerados como o maior dreno para o estoque de C no sistema solo-biomassa.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho resulta da consolidação de vários estudos conduzidos na região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais, em plantações de eucalipto implantadas em diferentes condições edafoclimáticas e teve por objetivo comparar três métodos de determinação do carbono do solo (Walkley-Black, Yeomans & Bremner e CHNS/O) para quantificar o estoque deste elemento em distintas classes de solo, bem como quantificar a produção de biomassa dos componentes das árvores e manta orgânica e o respectivo estoque de carbono acumulado numa seqüência de idades.

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- Os três métodos de determinação de carbono do solo correlacionaram-se significativamente entre si, nas classes de solos e profundidades analisadas, especialmente os métodos Walkley-Black e de combustão seca (CHNS/O).
- Os métodos Walkley-Black e Yeomans & Bremner tenderam a subestimar os teores de carbono do solo em relação ao método referência (CHNS/O), em todas as classes de solo e profundidades analisadas.

- A produtividade média e o estoque de carbono na biomassa e no solo, por região, aos 120 meses de idade apresentaram a seguinte seqüência: Sabinópolis > Virginópolis > Cocais > Santa Bárbara > Rio Doce.
- O estoque de carbono no solo, por classes e profundidade (0–100 cm), mostrou a seguinte seqüência: Latossolo Vermelho > Cambissolo Háplico > Latossolo Vermelho-Amarelo > Latossolo Amarelo > Plintossolo Pétrico > Neossolo Flúvico.
- Sabinópolis foi a região que mais estocou carbono no sistema solo-biomassa, aos 84 meses de idade, com 53,9 % do estoque de carbono total no solo, 30,1 % no lenho e 16,0 % nos resíduos da colheita.
- Aos 84 meses de idade, na região Centro-Leste de Minas Gerais, o estoque de carbono no lenho foi, em média, de 64,15 t/ha (29 %) do estoque de carbono total no sistema solo-biomassa; nos resíduos da colheita, de 34,89 t/ha (16 %); e, no solo, a 0-100 cm de profundidade, de 122,71 t/ha (55 %).
- O estoque médio de carbono na biomassa de plantações de eucalipto, aos 84 meses de idade, na região Centro-Leste de Minas Gerais foi de 14,15 t/ha/ano, correspondendo 64,8 % ao lenho, 13,5 % às raízes, 9,8 % à manta orgânica, 6,9 % à casca, 3,4 % aos galhos e 1,6 % às folhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A.C. & SOARES, J.V. Análise da influência da variabilidade hidrometeorológica inter anual no crescimento de plantações de eucalipto. Embrapa, IUFRO, Salvador. 1997. p.52-61.
- ALVAREZ, E. Composición florística diversidad, estructura y biomasa de un bosque inundable de la Amazonia colombiana. Universidad de Antioquia, 1993. 143p. (Tese de Mestrado)
- AMADO, T.J.C. Seqüestro de carbono em plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. In: CONFERÊNCIA ANUAL DA REVISTA PLANTIO DIRETO, 4., Passo Fundo, 1999. Anais... Passo Fundo, Aldeia Norte, 1999. p.44-51.
- AMADO, T.J.C. & SANTI, A. Seqüestro de carbono em plantio direto e suas implicações no efeito estufa. In: SEMANA ACADÊMICA DA FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA. Passo Fundo, 2000. Resumo de palestras... Passo Fundo, 2000, p.173-184.
- 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. V.II. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2002. p.487-592.

- BARROS, N.F. & NOVAIS, R.F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P.M & ADAMS, M.A., eds. Nutrition of eucalypts. Australia, CSIRO, 1996.
- BARTELINK, H.H. A model of dry matter partitioning in trees. *Tree Physiol.*, 18:91-101, 1998.
- BASHKIN, M.A. & BINKLEY, D. Changes in soil carbon following afforestation in Hawaii. *Ecol.*, 3:828-833, 1998.
- BATJES, N.H. Mitigation of atmospheric CO₂ concentrations by increased carbon sequestration in the soil. *Biol. Fertil. Soils*, 27:230-235, 1998.
- BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Gênese, 1999. p.9-26.
- BEETS, P.K.; ROBERTSON, K.A.; FORD-ROBERTSON, J.; GORDON, J. & MACLAREN, J.P. Description and validation of C-change: a model for simulating carbon content in managed *Pinus radiata* stands. *New Zealand J. Forestry Sci.*, 3:409-427, 1999.
- BERNER, E. Global environment. New Jersey, Prentice-Hall, 1996. 376p.
- BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B. & LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Aust. Agric. Res.*, 46:1459-1466, 1995.
- BOSSEL, H. Umweltwissen: Daten, Fakten, Zusammenhaenge, Berlin, Springer Verlag, 1994. 169p.
- BRADSTOCK, R. Biomass in an age series of *Eucalyptus grandis* plantations. *Aust. Forest Res.*, 11:111-127, 1981.
- BROWN, S.; LUGO, A.E. & CHAPMAN, J. Biomass of tropical tree plantations and implications for the global carbon budget. *Can. J. Forest Res.*, 16:390-394, 1986.
- CAIRNS, M.A.; BROWN, S.; HELMER, E.H. & BAUMGARDNER, G.A. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111:1-11, 1997.

- CALDEIRA, M.V.W.; WATZLAWICK, L.F.; SCHUMACKER, M.V.; BALBINOT, R. & SANQUETTA, C.R. Carbono orgânico em solos florestais. In: SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M.A.B. & GOMES, F.S., eds. As florestas e o carbono. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2002. p.251-264.
- CELULOSE NIPO-BRASILEIRA S.A. - CENIBRA. Relatório Climático Anual 2004. Cenibra, Belo Oriente, 2005. 22p.
- CELULOSE NIPO-BRASILEIRA S.A. - CENIBRA. Relatório do Levantamento Semidetalhado de Solos da Cenibra: Fase 2, V.I. Cenibra, Belo Oriente, 2001. 101p.
- CERRI, C.C.; ANDREUX, F. & EDUARDO, B.P. O ciclo do carbono no solo. In: CARDOSO, E.I.B.N.; TSAI, S.M. & NEVES, M.C.P., eds. Microbiologia do solo. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p.73-90.
- CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CARVALHO, M.C.S.C. & VOLKOFF, B. Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: Emissões e remoções de dióxido de carbono pelos solos por mudanças de uso da terra e calagem. Ministério da Ciência e Tecnologia. 2001. 41p.
- CONCEIÇÃO, P.C. Indicadores de qualidade do solo visando à avaliação de sistemas de manejo do solo. Universidade Federal de Santa Maria, 2002. 138p. (Tese de Mestrado)
- COOPER, C.F. Carbon storage in managed forests. *Can. J. Forest Res.*, 13:155-165, 1983.
- DELANEY, M.; BROWN, S.; LUGO, E.; TORRES-LEZAMA, A. & BELLO-QUINTERO, N. The distribution of organic carbon in major components of Forests located in five life zones of Venezuela. *J. Tropical Ecol.*, 13:697-708, 1997.
- DEWAR, R.C. Analytical model of carbon in the trees, soil, and wood products of managed forest. *Tree Physiol.*, 8:239-258, 1991.
- DEWAR, R.C. & CANNELL, M.G.R. Carbon sequestration in the tree, products and soils of forest plantations: an analysis using UK examples. *Tree Physiol.*, 11:49-72, 1992.
- DIAS, L.E.; JUCKSCH, I.; RICCI, M.S.F. & ALVAREZ V., V.H. Comparação de diferentes métodos de determinação de carbono orgânico em amostras de solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:157-162, 1991.

- DORAN, J.W. & PARKIN, J.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Minneapolis, Soil Science Society of America, 1994. p.3-22. (SSSA Special Publication, 35)
- ECOAR – Instituto Ecoar para Cidadania. Efeito Estufa. São Paulo, 2003. 5p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FABIÃO, A.; PERSSON, H.A. & STEEN, E. Growth dynamics of superficial roots in portuguese plantations of *Eucalyptus globulus* Labill, studied with a mesh bag technique. Plant Soil, 83:233-242, 1985.
- FABRES, A.S.; BARROS, N.F. & NOVAIS, R.F. Produtividade e exportação de nutrientes em eucaliptos e identificação de sítios visando o manejo do solo e o manejo florestal em áreas da Cenibra. Viçosa, Convênio SIF/CNB-F, 1987. 142p. (Relatório Anual/Programa 86-87)
- FERREIRA, M.G.M. An analysis of the future productivity of *Eucalyptus grandis* plantations in the “cerrado” region in Brasil: A nutrient cycling approach. Columbia, University of British Columbia, 1984. 230p. (Tese de Doutorado)
- FLINT, E.P & RICHARDS, J.F. Trends in carbon content of vegetation in South and Southeast Asia associated with changes in land use. In: DALE, V.H., ed. Effects of land-use changes on atmospheric concentrations. South and Southeast Asia as a case study. New York, Springer-Verlag, 1994. p.201-299.
- FONSECA, S. Propriedades físicas, químicas e microbiológicas de um latossolo vermelho-amarelo sob eucalipto, mata natural e pastagem. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1984. 78p. (Tese de Mestrado)
- GAMA-RODRIGUES, E.F. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.227-243.

- GATTO, A. Manejo do solo em áreas de reforma de floresta de eucalipto e seus reflexos na produtividade. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 62p. (Tese de Mestrado)
- GHOLZ, H.L. & FISHER, R.F. Organic matter production and distribution in slash pine (*Pinus elliottii*) plantation. *Ecol.*, 6:1827-1839, 1982.
- GIFFORD, R. Carbon content of aboveground tissues of forest and woodland trees. Aust. Greenhouse Office, 2000. 27p.
- GOLFARI, L. Zoneamento ecológico do Estado de Minas Gerais para reflorestamento. Belo Horizonte. PRODEPPEF, 1975. 65P. (Série Técnica, 3)
- GONÇALVES, J.L.M. Características do sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1994. 84p. (Tese de Livre Docência)
- GONÇALVES, J.L.M. & MELLO, S.L.M. O sistema radicular das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M. & BENEDETTI, V., eds. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba, IPEF, 2000, p.221-267.
- GONÇALVES, J.L.M.; COUTO, H.T.Z. & DEMATTÊ, J.L.I. Relações entre a produtividade de sítios florestais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no Estado de São Paulo. IPEF, 43/44:24-39, 1990.
- GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.; MEIR, P.; MIRANDA, H.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; WRIGHT, I. & GASH, J. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia. *Global Change Biol.*, 1:1-12, 1995.
- GRESPLAN, S.L. Produção e eficiência nutricional de clones de eucalipto no norte do Espírito Santo e suas relações com características do solo. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 81p. (Tese de Mestrado)
- HALL, D.O. & RAO, K.K. Fotossíntese. São Paulo, Pedagógica e Universitária, 1980. 89p.
- HASSINK, J. Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralization. *Soil Biol. Biochem.*, 26:1221-1231, 1994.

- HOEN, H. & SOLBERG, B. Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. *Forest Sci.*, 3:429-451, 1994.
- HOUGHTON, J.T.; JENKINS, G.J. & EPHRAUMS, J.J. Climate change. The IPCC scientific assessment. New York, Cambridge University Press, 1991. p.287-311.
- HYAMS, D.G. CurveExpert 1.3: A comprehensive curve fitting system for Windows. <http://curveexpert.webhop.biz/>. Starkville, 1997. [software].
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Land Use Change and Forestry. In: Revised 1996 guidelines for national GHG inventories: reference manual, 1996. p.5.1-5.75
- ISLAM, K.R. & WEIL, R.R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. *Biol. Fertil. Soils*, 27:408-416, 1998.
- IZAC, A.M.N. Developing policies for soil carbon management in tropical regions. *Geoderma*, 79:261-276, 1997.
- KOEHLER, H.S.; WATZLAWICK, L.F. & KIRCHNER, F.F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M.A.B. & GOMES, F.S., eds. *As florestas e o carbono*. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2002. p.251-264.
- KRISHNAMURTHY, L. & AVILA, M. Agroforesteria Básica. Red. de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México, 1999. p.29-36.
- LADEIRA, B.C. Crescimento, produção de biomassa e eficiência nutricional de *Eucalyptus* spp., sob três espaçamentos, em uma seqüência de idades. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 148p. (Tese de Mestrado)
- LAL, R.; KIMBLE, J. & STEWART, B.A. World soils as a source or sink for radiatively-active gases. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E. & STEWART, B.A., eds. *Soil management and greenhouse effect*. Boca Raton, CRC Lewis Publishers, 1995. p.1-7.
- LAL, R.; KIMBLE, J. & FOLLETT, R.F. Pedospheric processes and the carbon cycle. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, R.F. & STEWART, B.A., eds. *Soil processes and the carbon soil*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 2000. p.1-8

- LEITE, F.P. Relações nutricionais e alterações de características químicas de solos da região do Vale do Rio Doce pelo cultivo do eucalipto. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2001. 72p. (Tese de Doutorado)
- LEITE, F.P., BARROS, N.F. NOVAIS, R.F. SANS, L.M.A. & FABRES, A.S. Crescimento de *Eucalyptus grandis* em diferentes densidades populacionais. R. Árvore, 3:313-322. 1997.
- LELES, P.S.S.; NETO, S.N.O. & SILVA, E. Captura e fluxo de CO₂ atmosférico pelas florestas plantadas e manejadas. B. Técnico SIF, 7:1-13, 1994.
- LOZA-BALBUENA, I. Impacts carbon trading on afforestation projects in Uruguay. New Zealand, University of Canterbury, 2001. 121p. (Tese de Mestrado)
- MaCLAREN, J.P. Trees in the greenhouse. Forest Res. Bull., 219. 2000. 72p.
- MACHADO, A.A. & CONCEIÇÃO, A.R. Sistema de análise estatística para Windows. WinStat. Versão 2.0. Universidade Federal de Pelotas, 2003.
- MACHADO, P.L.O.A.; BODDEY, R.; MADARI, B.; ALVES, B.J.R. & URQUIAGA, S. Os solos brasileiros e o seqüestro de carbono. B. Informativo – Soc. Bras. Ci. Solo, 29:21-25, 2004.
- MARCOLIN, M. Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: Emissões e remoções de dióxido de carbono por mudanças nos estoques de florestas plantadas. Ministério da Ciência e Tecnologia. 2002. 47p.
- MATUS, F.J. & MAIRE G., C.R. Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. Agric. Técnica, 26:112-126, 2000.
- 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. Sci. Florest., 54:16-26, 1998.
- MENEZES, A.A. Produtividade da cultura do eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2005. 91p. (Tese de Doutorado)

- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA Estimativa da quantidade de carbono fixado pelas florestas plantadas. 2001. (Disponível na internet <www.mct.gov.br/clima>)
- NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods. Madison, Soil Science of America and American Society of Agronomy, 1996. p.961-1010.
- 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 Norte Fluminense, 2000. 191p. (Tese de Doutorado)
- NOBRE, C.A. & GASH, J. Desmatamento muda clima da Amazônia. Ci. Hoje, 22:33-42, 1997.
- OLIVEIRA, A.A.K. & LEITE, A.S. Projeto Leste: Folha Ipatinga – SE.24-ZD-II, escala 1:100.000. v.20. Belo Horizonte, SEME/COMIG/CPRM, 2000. 58p.
- ORTIZ, R. Costa Rican secondary forest: an economic option for joint implementation initiatives to reduce atmospheric CO₂. Draft paper presented for inclusion in the Beijer Seminar in Punta Leona. Costa Rica. 19p.
- POST, W.M.; EMANUEL, W.R.; ZINKE, P.J. & STANGENBERG, A.G. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 298:156-159, 1982.
- REIS, M.G.F.; KIMMINS, J.P.; RESENDE, G.C. & BARROS, N.F. Acúmulo de biomassa em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. R. Árvore, 9:149-162, 1985.
- REIS, M.G.F.; REIS, G.G.; VALENTE, O.F. & FERNANDES, H.A.C. Seqüestro e armazenamento de carbono em florestas nativas e plantadas dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo. In: SEMINÁRIO EMISSÃO x SEQUESTRO DE CO₂, 1., Rio de Janeiro, 1994. Anais... Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p.157-195.
- RESCK, D.V.S.; PEREIRA, J. & SILVA, J.E. Dinâmica da matéria orgânica dos cerrados. Planaltina, Embrapa-CPAC, 1991. 22p. (Documentos, 36)

- RESCHUTZEGGER, G.M. Relação entre características edáficas e a produtividade de eucalipto na região central do Uruguai. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2003. 106p. (Tese de Doutorado)
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. Pedologia: base para distinção de ambientes. Viçosa, MG, NEPUT, 2002. 338p.
- REZENDE, A.V. O estoque de carbono no cerrado: um estudo de caso. In: SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M.A.B. & GOMES, F.S., eds. As florestas e o carbono. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2002. p.175-190.
- SANTANA, R.C. Predição de biomassa e alocação de nutrientes em povoamentos de eucalipto no Brasil. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 59p. (Tese de Doutorado)
- SCARPINELLA, G.D. Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Kyoto. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2002. 182p. (Tese de Mestrado)
- SCOTT, N.; TATE, K.; FORD-ROBERTSON, J.; GILTRAP, D. & TATTERSALL, C. Soil carbon storage in plantation forest and pastures: land use change implications. *Tellus*, 51:326-335, 1999.
- SCHLESINGER, W.H. Biogeochemistry: an analysis of global change. San Diego, Academic Press, 1997. 588p.
- SCHROEDER, P.E. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Syst.*, 27:89-97, 1994.
- SCHROEDER, P.E. Carbon storage potencial of short rotation tropical tree plantations. *Forest Ecol. Manag.*, 50:31-41, 1992.
- SCHROEDER, P.E.; DIXON, R.K. & WINJUM, J.K. Ordenación forestal y agrosilvicultura para reducir el dióxido de carbono atmosférico. *Unasylva*, 44:52-60, 1993.
- SCHUMACHER, M.V. & WITSCHORECK R. Inventário de carbono em povoamentos de *Eucalyptus* spp. nas propriedades fumageiras do sul do Brasil: “Um estudo de caso”. In: SANQUETTA, C.R.; BALBINOT, R. & ZILIOOTTO, M.A.B., eds. Fixação de carbono: Atualidades, projetos e pesquisas. Curitiba, AM Impressos, 2004. p.111-124.
- SILVA, C.A. & MACHADO, P.L.O.A. Seqüestro e emissão de carbono em ecossistemas agrícolas: estratégias para o aumento dos estoques de matéria orgânica em solos tropicais. Embrapa, Solos, Rio de Janeiro, 2000. 23p. (Documento, 19)

- 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. B. Informativo – Soc. Bras. Ci. Solo, 29:10-20, 2004.
- SILVA, J.E. & RESCK, D.V.S. Matéria orgânica do solo. In: VARGAS, M.A.T. & HUNGRIA, M., eds. Biologia dos solos do cerrado. Planaltina, Embrapa-CPAC, 1997. p.465-524.
- SKORUPA, A.L.A. Distribuição da manta e nutrientes em uma seqüência de idades em povoamentos de *Eucalyptus grandis*, na regional do Baixo Rio Doce – CENIBRA (Celulose Nipo-Braileira), MG. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 17p. (Relatório de Disciplina Solos de Ecossistemas Florestais)
- THE WORLD BANK (Washington, D.C.). The forest sector. Washington, D.C. 1991. 52p.
- VÉLEZ, V.H.G. & ARANGO, G.J.L. Metodología para la cuantificación de existencias y flujo de carbono en plantaciones forestales. In: Simposio Internacional Medición y Monitoreo del la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia-Chile, 2001. 18p.
- WALKLEY, A. & BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci., 37:29-38, 1934.
- WIGLEY, T.M.L. & SCHIMEL, D.S. The carbon cycle. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 292p. (Global Change Institute, 6)
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil: Comm. Soil Sci. Plant Anal., 19:1467-1476, 1988.
- ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERR, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T.M.; MILTNER, A. & SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. Geoderma, 79:69-116, 1997.