

Estoque de carbono na biomassa aérea florestal em
plantações comerciais de *Eucalyptus* spp.Carbon stock in aboveground forest biomass in
commercial *Eucalyptus* spp. plantationCarlos Alberto Silva¹, Carine Klauberg², Samuel de Pádua Chaves e Carvalho³,
Marisa de Cássia Piccolo⁴ e Luiz Carlos Estraviz Rodriguez⁵**Resumo**

O presente estudo teve como objetivo a quantificação do estoque de carbono em compartimentos aéreos da planta, e o uso da análise de regressão para a modelagem do estoque de carbono total (C_{total}), lenho comercial (C_{leco}) e parte residual (C_{rsd}) presentes na biomassa aérea em plantações de *Eucalyptus* spp. O estudo foi realizado em plantios florestais da região do Vale do Paraíba Paulista com idades entre 2,3 a 8 anos. No campo, foram coletados dados biométricos em parcelas convencionais de inventário e derrubadas árvores para a coleta de material que, posteriormente, em laboratório, teve o seu conteúdo de carbono determinado. Os modelos para a estimativa do carbono foram desenvolvidos com base nos logaritmos do diâmetro a altura do peito (DAP) e a altura total dos indivíduos arbóreos (H_t). De acordo com os resultados encontrados, o estoque de carbono total médio presente na parte aérea das árvores de eucaliptos foi de 38,98 kg.árv⁻¹, sendo lenho comercial e a parte residual responsável por 68,9% (27,11 kg.árv⁻¹) e 31,1% (12,33 kg.árv⁻¹), respectivamente. Os modelos ajustados e testados apresentaram-se precisos, com coeficientes de determinação ajustado (R^2_{ajd}) da ordem de 97,0%, coeficiente de correlação de Pearson (r) e Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE%) para os valores observados e estimados da ordem de 0,97 a 0,98 e 11,04 a 12,38%, respectivamente. Conclui-se que há um grande potencial de monitoramento de crescimento e de fixação de carbono em plantações de *Eucalyptus* spp. usando as equações ajustadas neste trabalho.

Palavras-chave: Carbono; Biomassa Aérea, Modelagem; *Eucalyptus*; Função Schumacher-Hall; Regressão linear múltipla.

Abstract

The aim of this study was to quantify the aboveground carbon stock in different compartments of the plant, and to adjust models for the aboveground carbon stock estimation in biomass total (C_{total}), commercial logs (C_{leco}) and harvest residuals (C_{rsd}) in *Eucalyptus* spp. plantations. The study was conducted in a forest plantation in the Paraíba Valley, State of São, with ages ranging from 2.3 to 8 years. Biometric field measurements were taken from conventional forest inventory plots where some trees were also cut to produce the sample disks from which the carbon content was precisely determined according to standardized laboratorial procedures. The models for estimating carbon were developed based on logarithm of the diameter at breast height (DBH) and total height of individual trees (H_t). According to the results, the mean of the aboveground carbon stock total for a eucalyptus tree was 38.98 kg.tree⁻¹, in which commercial logs and harvest residuals were responsible for 68.9% (27.11 kg.tree⁻¹) and 31.1% (12.33 kg.tree⁻¹), respectively. The adjusted and tested models were precise, with coefficients adjusted determination (R^2_{ajd}) of the order of 97.0%, correlation coefficient Pearson (r) and the Root-Mean-Square Error (RMSE%)

¹Mestre em Recursos Florestais. USP – Universidade de São Paulo / ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Departamento de Ciências Florestais. Av. Pádua Dias,11 – 13418-900 – Piracicaba, SP. E-mail: carlos_engflorestal@outlook.com.

²Doutoranda em Recursos Florestais. USP – Universidade de São Paulo / ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Departamento de Ciências Florestais. Av. Pádua Dias,11 – 13418-900 – Piracicaba. E-mail: arine_klauberg@hotmail.com.

³Professor Adjunto da Faculdade de Engenharia Florestal. UFMT – Universidade Federal do Mato Grosso. Av. Fernando Correa da Costa, 2367 – 78060-900- Cuiabá, MT. E-mail: sam.padua@gmail.com.

⁴Professora Associada do LCN - Laboratório de Ciclagem de Nutrientes. USP – Universidade de São Paulo / CENA - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, CENA/USP. Caixa Postal 96 – 13.400-970- Piracicaba, SP. E-mail: mpiccolo@cena.usp.br.

⁵Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais. USP – Universidade de São Paulo / ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Departamento de Ciências Florestais. Av. Pádua Dias,11 – 13418-900 – Piracicaba. E-mail: lcer@usp.br.

for the observed and estimated values of around 0.97 to 0.98 and from 11.04 to 12.38%, respectively. We conclude that there is a good potential to monitor growth and carbon sequestration in *Eucalyptus* spp. plantations using the models adjusted in this paper.

Keywords: Carbon content; above ground biomass; modeling; *Eucalyptus*; Schumacher-Hall function; multiple linear regression.

INTRODUÇÃO

No cenário atual, a busca pela sustentabilidade é cada vez mais crescente. O setor industrial, atento com a necessidade de redução de gases do efeito estufa, e da possibilidade das florestas exercerem um importante papel na mitigação das mudanças climáticas globais pela fixação do CO₂ atmosférico, buscam atingir um novo manejo florestal integrando floresta, indústria e mercado, a fim de maximizar o retorno financeiro e, ao mesmo tempo, garantir uma base sustentável na cadeia produtiva florestal. O mercado de créditos de carbono tem criado perspectivas otimistas de expansão do setor florestal brasileiro (PAIXÃO et al., 2006). Embora esse mercado pareça atraente, poucos são os estudos disponíveis com estimativas de estoque de carbono em florestas plantadas.

As plantações florestais com espécies de eucaliptos são as mais extensas no Brasil, com 5,1 milhões de hectares, estudos regionais sobre a quantidade de carbono armazenado nestes plantios comerciais é de extrema importância.

Os métodos de estimativa da biomassa e do estoque de carbono baseiam-se em métodos diretos, conhecidos por destrutivos, e indiretos, por não destrutivos (RIBEIRO et al., 2009). O método indireto tem sido o mais empregado para o estudo da biomassa e do carbono, pois consiste no uso de dados de inventário florestal para a elaboração de modelos alométricos (relações empíricas) que correlacionem o fator biomassa com variáveis de fácil obtenção (DAP, altura, volume) e um fator de correção para o carbono. Alguns dos principais trabalhos envolvendo o método indireto da estimativa de biomassa e carbono, aplicando equações logarítmicas, foram os publicados por Mello e Gonçalves (2008), Silva et al. (2008), Soares e Oliveira (2002) e Soares et al. (2005).

Segundo Reis et al. (1985) as equações logarítmicas são mais apropriadas para a estimativa da biomassa, pois apresentam a vantagem de reduzir a variância associada com o sucessivo aumento na altura da árvore. Desta forma, um dos modelos mais empregados para a estimativa da biomassa e do carbono é o proposto por Schumacher e Hall (1933), no qual utilizam-se os

logaritmos do diâmetro à altura do peito (DAP a 1,30m) e a altura total das árvores como variáveis independentes, e a biomassa ou carbono como variáveis dependentes. Por outro lado, na literatura encontram-se poucos trabalhos empregando o método direto. Este, por ser baseado em uma análise destrutiva das árvores, é um método mais trabalhoso e oneroso, porém é o método mais eficaz e acurado (TRUGILHO et al. 2010). Alguns dos trabalhos que utilizaram do método direto para estudo da biomassa florestal e do estoque de carbono foram os publicados por Paixão et al. (2006) e Trugilho et al. (2010).

Considerando a importância da quantificação e da modelagem do estoque de carbono em povoamentos de eucaliptos, este estudo objetivou a quantificação do estoque de carbono em compartimentos aéreo da planta e o uso da análise de regressão para a modelagem do estoque de carbono total, lenho comercial e parte residual (folha, casca, galhos e ponteiro do lenho) presente na biomassa arbórea acima do solo em plantações de *Eucalyptus* spp. através de uma análise destrutiva das árvores e dados biométricos convencionalmente utilizados em inventários de campo.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado a partir de dados coletados em um conjunto de parcelas permanentes de inventário florestal instaladas em áreas comerciais pertencentes à empresa Fibria Celulose S/A, situada no estado de São Paulo (latitude 23°00' - 23°30' S, longitude 45°00' - 46°00' W). As parcelas foram distribuídas em cinco fazendas, codificadas por: F987, F986, F849, F948 e F634. As fazendas estão localizadas no Vale do Paraíba Paulista, uma das mesorregiões do estado de São Paulo, próximas aos municípios de Jacareí, São Luiz do Paraitinga e Paraibuna.

O clima da região, segundo Köppen é do tipo Cwa, caracterizado por um clima subtropical úmido. As precipitações anuais encontram-se em torno de 1.200 mm e as temperaturas médias do ar oscilam entre 17,1 °C no mês mais frio (julho) e 23,9 °C em fevereiro.

As parcelas foram instaladas em plantios clonais de *Eucalyptus* spp., com idades que variam entre 2,3 e 8,0 anos, sob regimes de manejos silviculturais de alto fuste em espaçamento médio de 3,0 x 2,0 m (Tabela 1).

Coleta e processamento da biomassa aérea florestal

A coleta e processamento de dados obtidos em campo foram realizadas em duas etapas:

(i) Determinação da Variáveis Dendrométricas – Foram utilizadas 80 parcelas de formato circular com área de 400 m², sendo que em cada parcela foram contados e medidos o diâmetro à altura do peito (DAP) de todos os indivíduos (Tabela 1).

Tabela 1. Valores descritivos de parte das características biométricas da rede de parcelas inventariadas por área de estudo.

Table 1. Descriptive values of the biometric parameters in the inventory network of sample plots by study area.

Fazendas	Idade (Anos)	DAP (cm)	
		\bar{x}	s
F987_Santa Terezinha VI	2,3	9,10	1,63
F986_Santa Terezinha V	3,3	12,60	1,62
F849_São José III	4,7	13,94	2,33
F948_Jataí	6,8	13,61	1,99
F634_Patizal	8,0	16,02	2,82

DAP= diâmetro à altura do peito; \bar{x} = média ; s = desvio padrão.

(ii) Biomassa florestal – Em campo, a biomassa florestal foi avaliada em termos de unidades de massa de folhas (Fo), galhos (Ga), casca (Cc) e lenho (Le) por unidade de árvore, e expressa em kg · arv.⁻¹. Um total de 56 árvores foram selecionadas previamente por classes de diâmetro na proporção de dois indivíduos para o DAP médio e um indivíduo para cada um dos desvios padrões (dp): +1dp, +2dp, +3dp, -1dp, -2dp e -3dp, contabilizando oito indivíduos para as fazendas F986, F987 e F634, e 16 indivíduos para as fazendas F849 e F948. Em seguida, fez-se o abate, medição da altura total (ht) com fita métrica, separação e pesagem das partes dos componentes da árvore: Fo, Ga, Cc e Le com balança digital com 50 g de precisão. Ainda em campo foi realizada a coleta e pesagem com balança digital semi-analítica (precisão 0,1 g) de amostras representativas dos componentes da árvore para as análises do carbono em laboratório.

Processamento da biomassa e análise do carbono em laboratório

No laboratório, as amostras foram secas em estufa a 65 °C até atingirem massa constante. Nesse

estágio foi determinada a matéria seca da amostra de cada componente da árvore, bem como o seu teor de umidade em base úmida (U%). Em seguida, fez-se o cálculo da biomassa seca total (Bs), em kg, para cada componente da árvore.

Uma porção do material vegetal seco coletado em campo foi moído e peneirado a 10 mesh (partículas menores que 2 mm), e uma subamostra de 3 a 4 mg do material vegetal foi usada para a determinação do teor de carbono (%) por combustão a seco no analisador elementar LECO TruSpec® CHNS Micro no Laboratório de Ciclagem de Nutrientes (CENA-USP). Após as análises, o estoque de carbono para cada componente da árvore foi calculado pela multiplicação da Bs total de cada compartimento da árvore pelo teor de carbono determinado em laboratório para cada compartimento.

O estoque de carbono total (C_{total}), em kg, foi calculado pelo o somatório do estoque de carbono presente nos componentes da árvore, sendo que o carbono no lenho comercial (C_{leco}), em kg, foi calculado pela multiplicação do carbono no lenho total pelo fator de correção 0,93 ajustado em campo, e o carbono no resíduo da árvore (C_{rsd}), em kg, foi calculado pelo somatório do carbono nas folhas, nos galhos, na casca e nos ponteiros dos lenhos descartados em campo.

Ajuste dos modelos preditivos do estoque de carbono em nível de árvores

Para a modelagem do carbono total, lenho comercial e parte residual da árvore foi utilizado o modelo matemático linearizado de Schumacher e Hall (1933), pois este apresenta a vantagem de reduzir a variância associada com o sucessivo aumento na altura da árvore, e também este tem mostrado ser eficaz na modelagem do estoque de biomassa em áreas florestais nativas e plantadas (MELLO; GONÇALVES, 2008; SILVA et al. 2008; SOARES; OLIVEIRA, 2002; SOARES et al. 2005).

Os modelos desenvolvidos para a estimativa do estoque foram primeiramente avaliados estatisticamente através do Coeficiente de determinação ajustado (R² ajd), Erro-padrão residual (S_{yx}); Correlação linear de Pearson para os valores estimados e observados (r_{xy}); bem como ao pressuposto da normalidade e homogeneidade de variâncias pela análise gráfica dos resíduos percentuais (R%) e pelos testes estatísticos de Shapiro Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) e Breusch-Pagan (BREUSCH; PAGAN, 1979), respectivamente. A precisão e a estabi-

lidade dos modelos foram avaliadas pela Raiz quadrada do erro quadrático médio absoluto e percentual (RMSE, RMSE%); validação cruzada da regressão pelo procedimento "leave-one-out, bem como o teste de equivalência da regressão segundo Robinson et al. (2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise do teor de carbono na biomassa aérea

Para as 56 árvores abatidas neste estudo, verificou-se que o teor de carbono em termos médios presente na biomassa total seca da árvore foi de 46,3%. Os teores de carbono para os diferentes componentes das árvores e por fazendas podem ser visualizados na Tabela 2.

Como observado na Tabela 3, verificou-se que em termos médios, a folha foi o componente que apresentou o maior teor de carbono em sua biomassa seca, seguido do lenho, galhos vivos (GV), galhos secos (GS) e casca. Neves (2000), para plantações de *E. grandis* x *urophylla* na região litorânea do estado do Espírito Santo, verificou que os teores de carbono presente na biomassa florestal para os compartimentos folhas, casca, galhos e lenho em termos de porcentagem foram de 52,4; 47,9; 52,5 e 50,6%, respectivamente. Dallagnol et al. (2011), estudando os teores de carbono para indivíduos de *E. grandis* com idades entre 8 a 20 anos ao sul do Brasil, encontraram teores para os compartimentos casca, folhas,

galhos e lenho de 39,46, 48,17, 42,06, 42,61%, respectivamente. Os resultados de Alves (2007) para o estudo realizado em Araripina – PE em plantios de *Eucalyptus* spp. indicaram que os teores de carbono para os compartimentos do fuste (lenho + casca), folha, casca e galhos, foram de 46,97; 38,95; 35,64 e 34,74%, respectivamente. Trugilho et al. (2010) com base em metodologia tradicional e alternativa da coleta de disco para a análise do teor de carbono presente no lenho comercial de árvores de *E. grandis* para a região de Matinhos Campo – MG, observou teores de 50,14 % e 49,74, respectivamente.

De acordo com a Tabela 3, também se observou que os teores de carbono para os componentes da árvore avaliados pouco mudaram quando representados por classes diamétricas. Porém, a menor porcentagem média de carbono esteve associada com a menor classe diamétrica, como também encontrado por Trugilho et al. (2010).

Os teores de carbono encontrados neste trabalho, comparativamente com os outros trabalhos citados, confirmam que o compartimento folhas apresenta teores superiores aos encontrados nos outros compartimentos. De maneira geral, também foi possível observar que os teores de carbono dificilmente ultrapassam valores de 50%, exceto para o compartimento folhas. Conforme complementam os autores Taiz e Zeiger (2009), a rota de fixação normal entre os compartimentos seria: folhagem, galhos, madeira, raiz e casca.

Tabela 2. Teor de carbono (%) na biomassa seca dos compartimentos da árvore, para as 56 árvores abatidas por área de estudo.

Table 2. Carbon content (%) in the dry biomass of each tree compartment for the 56 felled trees by study area.

Fazenda	Idade (Anos)	Teor de carbono (%)					\bar{x}	s
		Lenho	Folha	GV	GS	Casca		
F987	2,3	46,56	50,49	45,92	44,94	43,71	46,28	2,56
F986	3,3	46,45	51,06	45,21	44,72	42,69	45,94	3,11
F849	4,7	46,69	49,75	45,85	44,85	43,78	46,08	2,25
F948	6,8	46,69	50,67	45,90	45,41	43,34	46,34	2,68
F634	8,0	46,33	50,27	46,18	44,97	43,27	46,18	2,58
\bar{x}	5,0	46,54	50,44	45,81	44,98	43,36	46,16	2,63

GV=galho vivo; GS= galho seco; \bar{x} = média e s = desvio padrão.

Tabela 3. Teor de carbono (%) na biomassa seca área por classe diamétrica para as 56 árvores abatidas por área de estudo.

Table 3. Carbon content (%) in dry biomass area by diameter class for 56 felled trees by study area.

Classes	DAP \bar{x}	Teor de carbono (%)					\bar{x}	s
		Folha	GV	GS	Casca	Lenho		
5,44 - 10,00	8,35	50,24	46,08	44,70	42,52	46,52	45,89	3,25
10,00 - 15,00	12,95	50,63	45,70	44,67	43,86	46,59	46,22	3,04
15,00 - 21,60	17,66	50,12	45,81	45,23	43,49	46,63	46,16	2,82
\bar{x}	12,99	50,33	45,86	44,87	43,29	46,58	46,09	3,04

DAP= diâmetro à altura do peito; GV=galho vivo; GS= galho seco; \bar{x} = média ; s = desvio padrão.

Neste estudo, o lenho foi o componente da árvore que mais contribuiu para a quantidade total de biomassa, e conseqüentemente carbono. Em termos médios para as árvores abatidas, o componente lenho contribuiu com 29,1 kg·árv⁻¹ (74,0%) do carbono presente na biomassa total mensurado, seguido da casca, com 6,5 kg·árv⁻¹ (17,3%), dos galhos vivos com 1,8 kg·árv⁻¹ (4,9%), dos galhos secos com 0,4 kg·árv⁻¹ (1,1%) e das folhas com 1,1 kg·árv⁻¹ (2,8%) (Tabela 4).

Os valores, em termos percentuais médios, para as contribuições dos componentes casca, lenho, folha e galhos, no estoque do carbono

total por indivíduo para as árvores abatidas nas cinco fazendas avaliadas, podem ser graficamente visualizados na Figura 1.

Neste estudo, confirmando resultados apresentados por Neves (2000) e Gatto et al. (2011), o lenho, como já verificado, foi o componente que mais contribuiu para o estoque de carbono total presente na biomassa área total. Além disso, verificou-se também na Figura 1 que quanto maior a idade do povoamento florestal, maior foi o acúmulo de lenho na biomassa, e maior a participação deste componente para o estoque de carbono total.

Tabela 4. Estoque de carbono (kg.árv⁻¹) na biomassa aérea em plantios de *Eucalyptus* spp., para as 56 árvores abatidas, por área de estudo.

Table 4. Carbon stock (kg.tree⁻¹) in aboveground biomass in *Eucalyptus* spp., for 56 felled trees by study area.

Faz.	Idade (Anos)	DAP x̄	Ht x̄	Estoque de carbono (kg.árv ⁻¹)						n
				Lenho	Folha	GV	GS	Casca	Total	
F987	2,3	9,1	13,3	10,93	1,36	1,38	0,71	2,33	16,71	8
F986	3,3	12,6	19,6	20,78	1,60	1,84	0,74	5,74	30,69	8
F849	4,7	14,0	22,1	30,81	1,13	2,18	0,63	8,02	42,77	16
F948	6,8	13,7	22,6	27,55	0,84	2,10	0,11	7,11	37,72	16
F634	8,0	15,4	26,9	55,30	0,78	1,58	0,02	9,34	67,02	8
	5,0	13,0	20,9	29,07	1,14	1,82	0,44	6,51	38,98	11,2

Faz= fazenda; DAP= diâmetro à altura do peito; Ht = Altura total; = média ; s = desvio padrão; GV=galho vivo; GS= galho seco e n = numero de árvores.

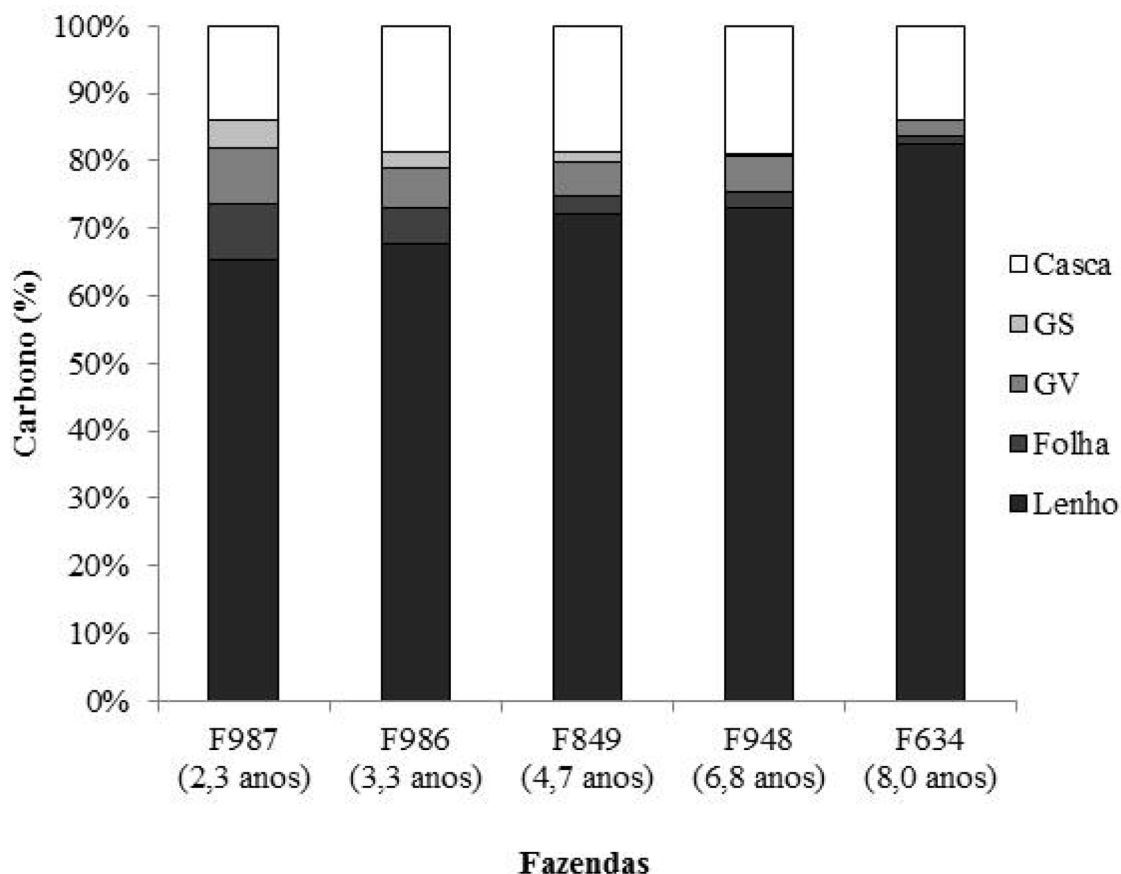


Figura 1. Teor de carbono (%) nos compartimentos arbóreos em povoamentos de *Eucalyptus* spp., nas áreas de estudo com diferentes idades.

Figure 1. Percentage of carbon content in compartments of *Eucalyptus* trees in different locations ordered by age.

Na fazenda F987, com aproximadamente dois anos de idade, o lenho contribuiu com 65,4% (10,93 kg·árv⁻¹) do carbono presente na biomassa total para um indivíduo arbóreo de eucalipto, enquanto que para as fazendas F849 com praticamente cinco anos e F634 com praticamente oito anos, as participações em termos percentuais de componente lenho para o estoque de carbono foram de 72,0% (30,8 kg·árv⁻¹) e 82,5% (55,3 kg·árv⁻¹), respectivamente. O comportamento apresentado para o lenho nos permite inferir que o percentual de carbono no lenho apresenta taxas maiores em povoamentos de eucaliptos com idades maiores.

Ao contrário do observado pelo componente lenho, nas fazendas F987, F849 e F634 as folhas contribuíram com 8,1% (1,3 kg·árv⁻¹), 2,6% (1,1 kg·árv⁻¹) e 1,2% (0,8 kg·árv⁻¹), para o estoque total de carbono médio, respectivamente.

Para o componente galho vivo, observaram-se também participações menores desse compartimento em povoamento mais velhos. Para as fazendas F987, F849 e F634 os galhos vivos contribuíram com 8,27% (1,4 kg·árv⁻¹), 5,1% (2,2 kg·árv⁻¹) e 2,4% (1,6 kg·árv⁻¹), respectivamente.

Os galhos secos, em função da sua biomassa reduzida, contribuíram menos para o estoque total de carbono médio em povoamentos de eucaliptos. Para as fazendas F987, F849 e F634 os galhos vivos contribuíram com 4,2% (0,7 kg·árv⁻¹), 1,5% (0,6 kg·árv⁻¹) e 0,03% (0,02 kg·árv⁻¹), respectivamente.

O componente casca teve um comportamento diferenciado dos demais componentes avaliados. Em termos gerais, para o estoque de carbono total médio, observou-se uma menor participação deste componente para o estoque de carbono em povoamentos com idades menores de cinco anos, uma maior participação em povoamentos com idades em torno cinco anos, e novamente uma menor participação

em povoamentos com idades superiores a cinco anos. Para a fazenda F987, a casca contribuiu com 13,9% (2,3 kg·árv⁻¹) do carbono presente na biomassa total mensurada, enquanto que para as fazendas F849 e F634 este compartimento contribuiu com 18,7% (8,0 kg·árv⁻¹) e 13,9% (9,3 kg·árv⁻¹), respectivamente.

A distribuição percentual da biomassa e o estoque total nos diferentes componentes das árvores estão fortemente associados ao tipo de espécie, idade, material genético, qualidade de sítio, densidade do plantio e fases de crescimento da planta (SCHUMACHER et al., 2011). Stape et al. (2008), em plantios localizados no sul da Bahia, verificaram que as folhas de *E. grandis* x *urophylla* armazenaram 8,8% do C total da árvore, os galhos 7,8% e o lenho 83,4%. Gatto et al. (2011), estudando a contribuição dos compartimentos da árvore para o estoque de biomassa total em um povoamento de *Eucalyptus* spp. ao Centro-Leste de Minas Gerais com 120 meses de idade, verificaram que o lenho, o componente de maior interesse comercial, correspondeu, em média, a 64,7% da biomassa total, seguida pelo sistema radicular com 13,5%, serapilheira com 9,7%, casca com 7,3%, galhos com 3,3 e folhas com 1,5%.

Schumacher e Caldeira (2001) estimaram a biomassa total acima do solo, em povoamento de *E. globulus*, com 4 anos de idade, e verificaram que o compartimento lenho contribuiu com 69% da biomassa total, seguida das folhas, galhos e casca. Em Alves (2007), em um experimento de clones de eucaliptos cultivados em Araripina, a biomassa distribuída ficou na seguinte ordem: fuste (70%), galhos (13%), casca (9%) e folhas (8%).

Para os principais componentes das árvores analisadas neste estudo (lenho comercial e parte residual), verificou-se que, em termos médios, o lenho comercial contribuiu com 68,9% (27,08 kg·árv⁻¹) e a parte residual contribuiu em média com 31,1% (11,9 kg·árv⁻¹) (Tabela 5).

Tabela 5. Estoque de carbono (kg·árv⁻¹) na biomassa seca do lenho comercial e parte residual em plantações de *Eucalyptus* spp. para as 56 árvores abatidas, nas áreas de estudo.

Table 5. Carbon stock (kg·tree⁻¹) in the dry biomass of commercial wood by residual compartment in the tree, for the 56 felled trees by study area.

Fazenda	Idade (Anos)	DAP \bar{x}	Ht \bar{x}	Estoque de carbono (kg·árv ⁻¹)						n
				Lenho comercial		Parte Residual		Total		
				\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
F987	2,3	9,1	13,3	10,18	4,64	6,53	4,22	16,71	8,61	8
F986	3,3	12,6	19,6	19,36	11,36	11,34	6,67	30,69	17,96	8
F849	4,7	14,0	22,1	28,70	14,66	14,07	7,28	42,62	22,31	16
F948	6,8	13,7	22,6	25,66	14,63	12,06	6,06	37,72	20,58	16
F634	8,0	15,4	26,9	51,52	32,50	15,50	9,64	67,02	42,10	8
\bar{x}	5,0	13,0	20,9	27,08	15,56	11,90	6,77	38,98	22,31	11,2

DAP = diâmetro à altura do peito; Ht = Altura total; \bar{x} = média; s = desvio padrão e n = número de árvores.

Os valores médios de estimativa de estoque de carbono total, no lenho comercial e parte residual, dispostos por classe diamétrica para as 56 árvores abatidas estão apresentados na Tabela 6. Observa-se que os valores de estoque de carbono estão associados às classes diamétricas, e que quanto maior a classe diamétrica, maior é o estoque de carbono presente na árvore.

Analisando os componentes lenho comercial e parte residual por uma perspectiva gráfica, observa-se uma crescente participação do lenho comercial no estoque de carbono total à medida que povoamentos envelhecem, devido ao fato deste componente estar presente em maior quantidade no lenho total. Por outro lado, o inverso foi observado pela parte residual, uma vez que

diminui à medida que a idade aumentou (Figura 2). O lenho comercial contribuiu para o estoque de carbono total em termos médios com 60,9% ($10,1 \text{ kg} \cdot \text{árv}^{-1}$) para a fazenda F987, 67,3% ($28,7 \text{ kg} \cdot \text{árv}^{-1}$) para a fazenda F849 e 76,8% ($51,5 \text{ kg} \cdot \text{árv}^{-1}$) para fazenda F634. Por outro lado, com um comportamento inverso a parte residual contribuiu com 39,1% ($6,5 \text{ kg} \cdot \text{árv}^{-1}$), 33,2% ($14,1 \text{ kg} \cdot \text{árv}^{-1}$), 23,1% ($15,5 \text{ kg} \cdot \text{árv}^{-1}$) para as fazendas F987, F849 e F634, respectivamente.

Modelos ajustados para as estimativas do estoque de carbono em nível de árvores

Analisando os parâmetros selecionados para avaliar a qualidade dos ajustes estatísticos apresentados na Tabela 7, verifica-se que as três

Tabela 6. Estoque de carbono ($\text{kg} \cdot \text{árv}^{-1}$) na biomassa seca do lenho comercial e parte residual em plantações de *Eucalyptus* spp., por classes diamétricas para as 56 árvores abatidas.

Table 6. Carbon stock ($\text{kg} \cdot \text{tree}^{-1}$) in dry biomass by residual compartment and residual compartment in the tree by diameter class, for 56 felled trees, by study area.

Classes	DAP	Estoque de carbono ($\text{kg} \cdot \text{árv}^{-1}$)						n
		Lenho comercial		Parte Residual		Total		
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
5,44-10,0	8,35	8,32	2,93	4,13	1,17	12,45	3,72	14
10,0-15,0	12,95	21,24	6,93	10,58	3,34	31,72	9,61	25
15,0-21,60	17,66	51,22	18,63	21,33	4,29	72,55	21,49	17
\bar{x}	12,99	26,93	9,50	12,01	2,93	38,91	11,61	11,2

DAP= diâmetro à altura do peito; \bar{x} = média; s = desvio padrão e n = número de árvores.

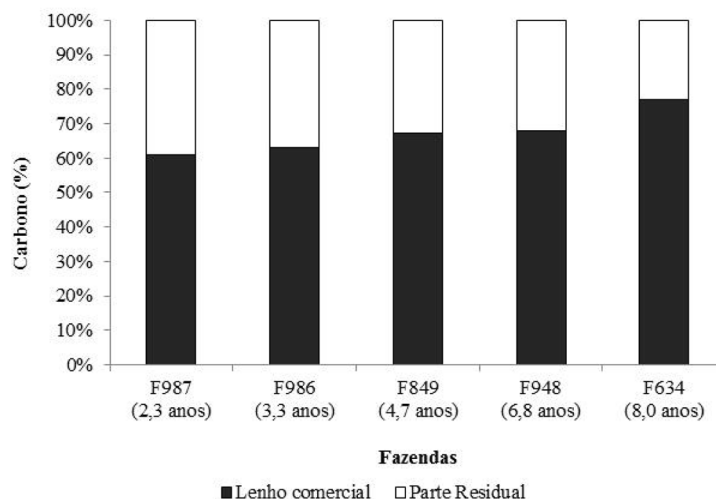


Figura 2. Percentual de carbono nos compartimentos arbóreos lenho comercial e parte residual em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em diferentes localidades ordenadas pela idade.

Figure 2. Percentage of carbon content in commercial logs and residuals part of the compartments of the *Eucalyptus* trees in different farms sorted by age.

Tabela 7. Modelos de regressões ajustados para a estimativa do estoque de carbono em cada compartimento (total, lenho comercial e resíduo) baseado na coleta destrutiva de amostras em 56 árvores.

Table 7. Regression models adjusted to above ground carbon stock estimation for each tree compartment (total, commercial logs and residual parts) based on a sample of 56 trees harvested for precise determination.

Modelos preditivos do carbono na árvore	R^2_{ajd}	r_{xy}	S_{yx}	RMSE ($\text{kg} \cdot \text{árv}^{-1}$)	RMSE (%)
$\text{Ln}(C_{\text{total}}) = -2,87 + 1,95 \text{ Ln}(\text{DAP}) + 0,44 \text{ Ln}(\text{Ht})$	0,97	0,98	0,12	4,57	12,38
$\text{Ln}(C_{\text{leco}}) = -3,89 + 1,72 \text{ Ln}(\text{DAP}) + 0,83 \text{ Ln}(\text{Ht})$	0,97	0,98	0,12	2,73	11,04
$\text{Ln}(C_{\text{resd}}) = -2,61 + 2,49 \text{ Ln}(\text{DAP}) - 0,47 \text{ Ln}(\text{Ht})$	0,97	0,97	0,12	1,44	11,24

DAP= diâmetro à altura do peito; Ht = Altura total; R^2_{ajd} = Coeficiente de determinação ajustado; r_{xy} = Correlação linear de Pearson; S_{yx} = Erro-padrão residual; RMSE=raiz quadrada do erro quadrático médio absoluto.

equações ajustaram bem aos dados observados. Segundo os R^2_{ajd} , o logaritmo das variáveis DAP e Ht apresentam um poder explicativo que varia em torno de 97% do comportamento da variável resposta carbono, o que favoravelmente compara-se com trabalhos desenvolvidos para a estimativa do carbono total do fuste (CF) e da madeira (CM) em plantios de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden (SOARES et al., 2005).

Os coeficientes que compõem os modelos ajustados foram todos significativos a um nível de 99% de probabilidade, pelo teste *t* de Stu-

dent, e os modelos foram todos aceitos quanto aos pressupostos da normalidade e homogeneidade de variâncias.

Verifica-se também um alto índice de correlação linear de Pearson entre os valores estimados e observados, bem como baixos RMSEs, que por sua vez, garante a precisão dos modelos ajustados.

Os valores preditos do estoque de carbono quando analisados segundo uma perspectiva gráfica através do teste de equivalência (item “a” e “b” nas Figuras 3, 4 e 5) também garantem

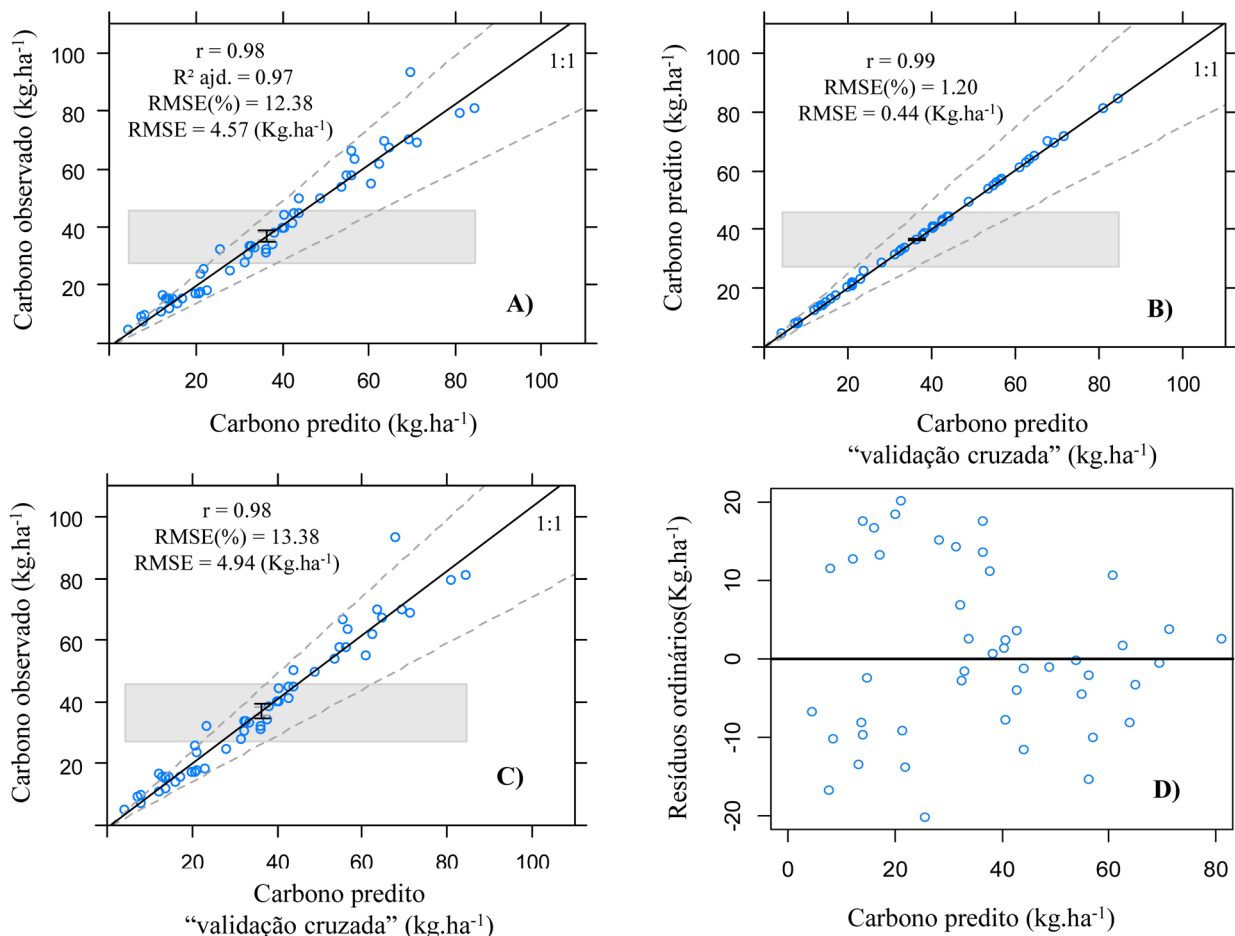


Figura 3. Valores observados versus estimados para carbono total (n=52): a) carbono observado versus estimado; b) carbono estimado pelo modelo versus carbono estimado na validação cruzada; c) carbono observado versus carbono estimado pela validação cruzada e d) resíduos ordinários versus carbono estimado. Segundo o teste de equivalência nos gráficos A), B) e C) a linha preta indica o melhor ajuste do modelo. A barra cinza sombreada define a região de semelhança para o intercepto. Se a barra de erro preta estiver dentro da região sombreada cinza, o intercepto do modelo linear não difere significativamente do seu intervalo de valores esperados. Se a barra de erro preta estiver entre as linhas pontilhadas, em seguida, o termo o coeficiente angular do modelo linear não difere significativamente do seu intervalo de valores esperados.

Figure 3. Observed value versus estimated value for the total carbon (C = 52): a) observed carbon versus estimated, b) estimated carbon by model versus the estimated carbon in the cross-validation c) observed carbon versus estimated by cross-validation d) ordinary residues versus estimated carbon. According to the Equivalence test in the A), B) and C) graphics, the black line indicates the line of the best fit model. The gray shaded bar defines the region of similarity in the intercept, and if the black error bar falls within the shaded gray region, then the intercept of the linear model does not significantly differ from its range of expected values. If the black error bar falls between the dotted lines, then the slope term of the linear model does not significantly differ from its range of expected values.

a precisão dos modelos, pois representam graficamente valores de r e RMSE coerentes com os apresentados na Tabela 7.

Nas relações entre os valores de carbono observados em campo versus estimados pela validação cruzada (item "c" nas Figuras 3, 4 e 5), verifica-se que os modelos, tanto para a estimativa do carbono total como para a estimativa do carbono no lenho comercial e nos resíduos da árvore, refletem coerência. A estabilidade dos modelos foi confirmada pela alta correlação de

Pearson e pelos baixos RMSE entre os valores preditos pelos modelos ajustados e pela validação cruzada, garantido a futura aplicação destes modelos em conjunto de dados diferentes, porém que apresentem a mesma amplitude de idade, DAP e Ht como descrita neste trabalho. Além disso, a precisão dos modelos foi confirmada pela amplitude dos resíduos aleatoriamente distribuídos ao longo de todo o intervalo de predição (item "d" nas Figuras 3,4 e 5), como também observado em Soares e Oliveira (2002).

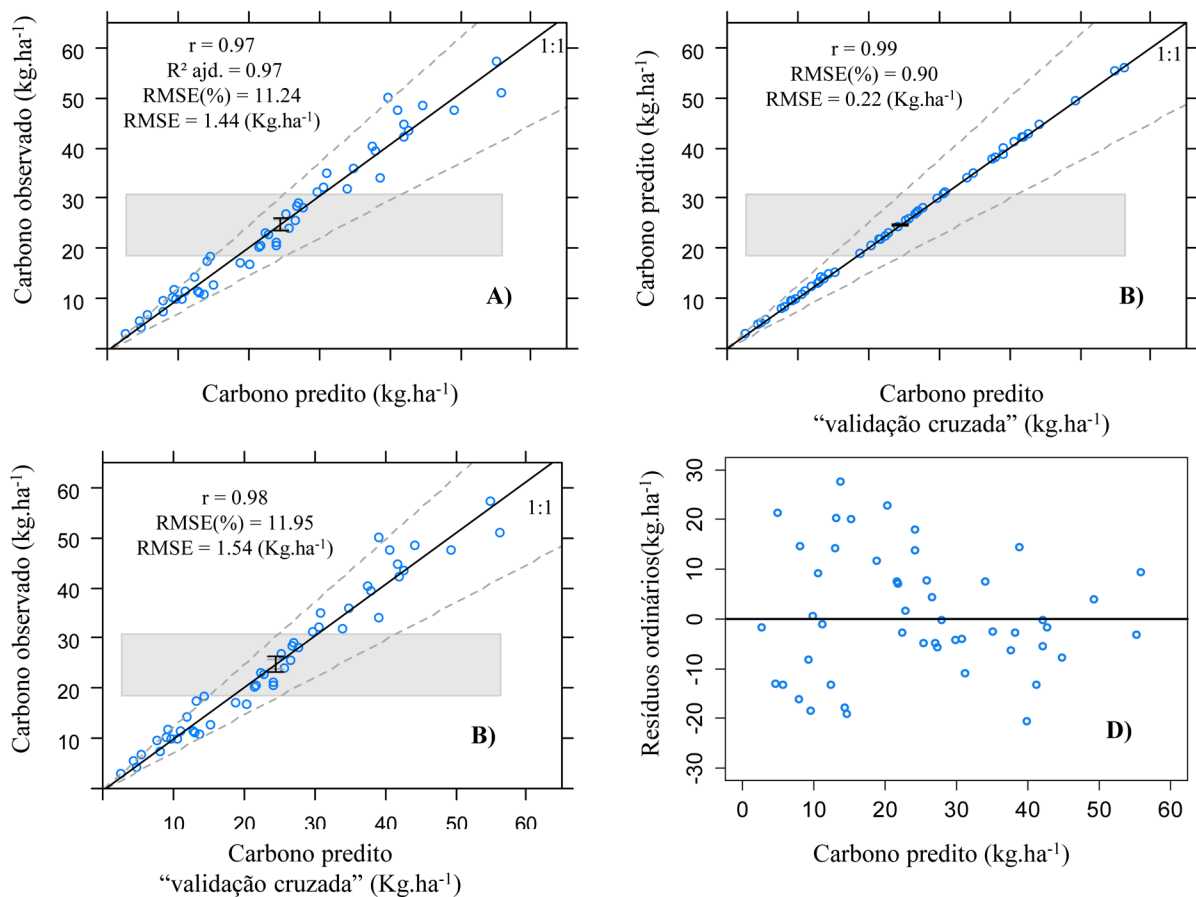


Figura 4. Valores observados versus estimados para carbono no lenho comercial (N=48): a) carbono observado versus estimado; b) carbono estimado pelo modelo versus carbono estimado na validação cruzada; c) carbono observado versus carbono estimado pela validação cruzada e d) resíduos ordinários versus carbono estimado. Segundo o teste de equivalência nos gráficos A), B) e C) a linha preta indica o melhor ajuste do modelo. A barra cinza sombreada define a região de semelhança para o intercepto. Se a barra de erro preta estiver dentro da região sombreada cinza, o intercepto do modelo linear não difere significativamente do seu intervalo de valores esperados. Se a barra de erro preta estiver entre as linhas pontilhadas, em seguida, o termo o coeficiente angular do modelo linear não difere significativamente do seu intervalo de valores esperados.

Figure 4. Observed value versus estimated value of carbon in commercial logs (C = 48): a) observed carbon versus estimated, b) estimated carbon by model versus the estimated carbon in the cross-validation c) observed carbon versus estimated by cross-validation d) ordinary residues versus estimated carbon. According to the Equivalence test in the A), B) and C) graphics, the black line indicates the line of the best fit model. The gray shaded bar defines the region of similarity in the intercept, and if the black error bar falls within the shaded gray region, then the intercept of the linear model does not significantly differ from its range of expected values. If the black error bar falls between the dotted lines, then the slope term of the linear model does not significantly differ from its range of expected values.

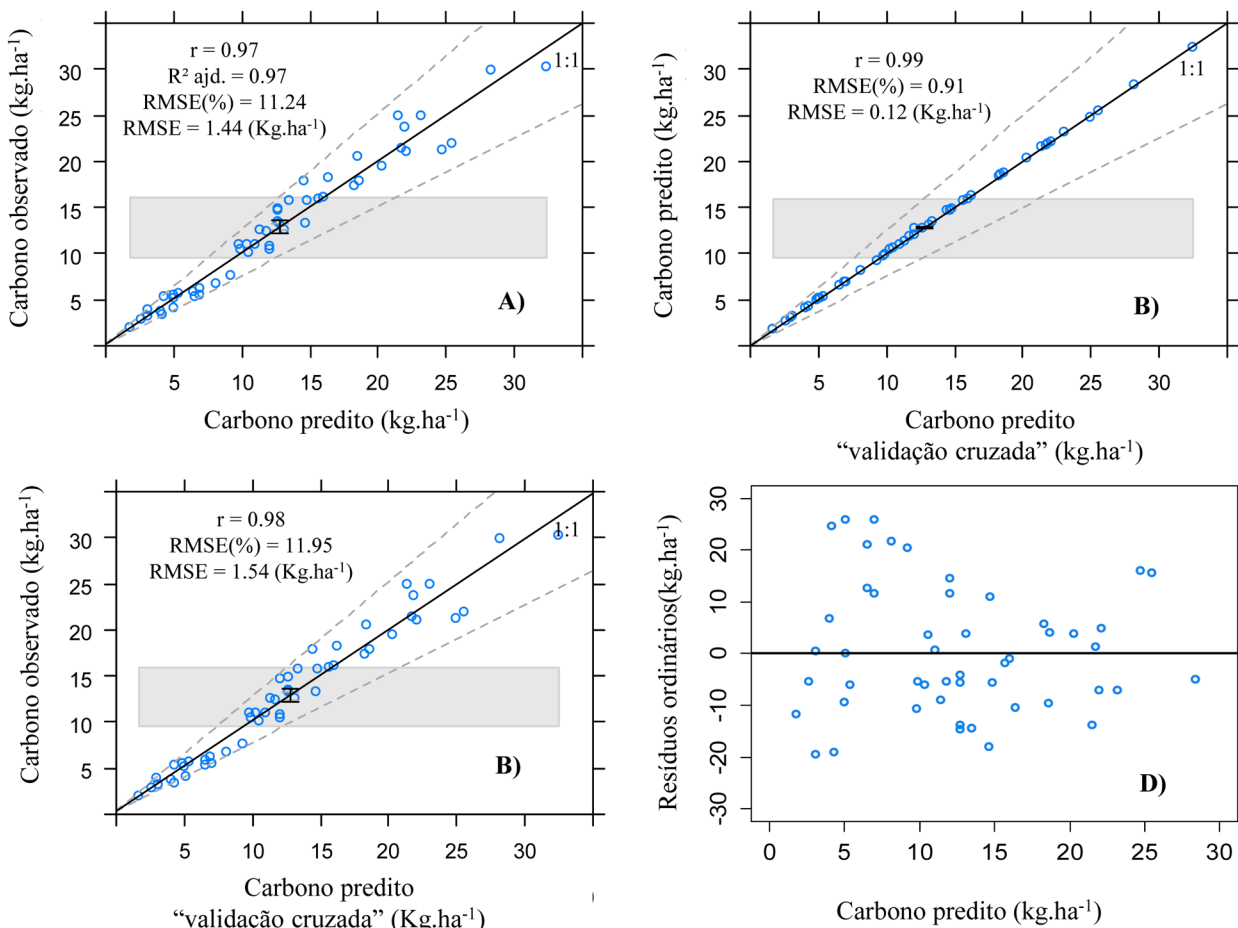


Figura 5. Valores observados versus estimados para carbono nos componentes residuais da árvore (N=52): a) carbono observado versus estimado; b) carbono estimado pelo modelo versus carbono estimado na validação cruzada; c) carbono observado versus carbono estimado pela validação cruzada e d) resíduos ordinários versus carbono estimado. Segundo o teste de equivalência nos gráficos A), B) e C) a linha preta indica o melhor ajuste do modelo. A barra cinza sombreada define a região de semelhança para o intercepto. Se a barra de erro preta estiver dentro da região sombreada cinza, o intercepto do modelo linear não difere significativamente do seu intervalo de valores esperados. Se a barra de erro preta estiver entre as linhas pontilhadas, em seguida, o termo o coeficiente angular do modelo linear não difere significativamente do seu intervalo de valores esperados.

Figure 5. Observed value versus estimated value of carbon in residual parts of the tree (C = 52): a) observed carbon versus estimated, b) estimated carbon by model versus the estimated carbon in the cross-validation c) observed carbon versus estimated by cross-validation d) ordinary residues versus estimated carbon. The black line indicates the line of the best fit model. According to the equivalence plots A), B) and C), the black line indicates the line of best fit of a simple linear model of observations regressed on predictions. The gray shaded bar defines the region of similarity in the intercept. If the error bar about the line of best fit falls within the shaded gray region, then the intercept of the linear model does not significantly differ from its range of expected values. If the black error bar falls between the dotted lines, then the slope of the linear model does not significantly differ from its range of expected values.

CONCLUSÕES

Após as análises, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- (i) O estoque de carbono total médio presente na parte aérea das árvores igual a $38,98 \text{ kg} \cdot \text{árv}^{-1}$, evidenciando-se a importância das plantações de eucaliptos para a fixação de carbono;
- (ii) O lenho comercial e a parte residual foram responsáveis por 68,9% ($27,11 \text{ kg} \cdot \text{árv}^{-1}$) e 31,1% ($12,33 \text{ kg} \cdot \text{árv}^{-1}$) do estoque de carbono total da parte aérea da árvore;

- (iii) Existe uma relação exponencial positiva entre a quantidade de carbono C_{total} , C_{leco} e C_{rsd} com os logaritmos do DAP e da Ht da árvore;
- (iv) Os modelos ajustados e testados apresentaram-se precisos, permitindo estimativas apropriadas para o estoque de C_{total} , C_{leco} e C_{rsd} em plantações de *Eucalyptus* spp.;
- (v) Há o potencial de monitoramento de crescimento e de fixação de carbono em plantações de *Eucalyptus* spp. com a utilização das equações ajustadas neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Fibria Celulose S/A pelo apoio na coleta de campo e pela cessão de dados de inventário. Ao Laboratório de Ciclagem de Nutrientes (LCN) do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA / USP), pelo apoio nas análises químicas do material vegetal. Ao Departamento de Ciências Florestais – LCF/ESALQ – USP, e ao Centro de Métodos Quantitativos – CMQ/ESALQ – USP, pelo suporte quanto à estrutura física e a FAPESP (2012/03176-0) pela bolsa de mestrado concedida durante o período do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, A. M. C. **Quantificação da produção de biomassa e do teor de carbono fixado por clones de eucalipto, no polo gesseiro do Araripe – PE.** 2009. 143 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 2007.
- BREUSCH, T. S.; PAGAN, A. R. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. *Econometrica*, Philadelphia, v. 47, n. 5, p. 1287-1294, set. 1979.
- DALLAGNOL, F. S.; MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. *Floresta e Ambiente*, Rio de Janeiro, v. 18, n. 4, p. 410-416. out./dez. 2011.
- GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R. D.; LEITE, H. G.; VILLANI, E. M. A. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 895-905, abr. 2011.
- MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 101-111, jan. 2008.
- NEVES, J. C. L. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo.** 2000. 191 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2000.
- PAIXÃO, F. A.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. Quantificação do estoque de carbono e análise econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 411-420, mai. 2006.
- REIS, M. G. E.; KIMMINS, J. P.; RESENDE, G. C.; BARROS, N. F. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no Cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 9, n. 2, p. 149-162, abr. 1985.
- RIBEIRO, S. C.; JACOVINEII, L. A. G.; SOARESII, C. P. B.; MARTINSII, S. V.; SOUZAIL, A. L.; NARDELLI, A. M. B. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma floresta madura no município de Viçosa, Minas Gerais. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 917-926, 2009.
- ROBINSON, A. P.; DUURSMA, R. A.; MARSHALL, J. D. A regression-based equivalence test for model validation: Shifting the burden of proof. *Tree Physiology*, Victoria, v. 25, p. 903-913. mai. 2005.
- SCHUMACHER, F.; HALL, F. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, Washington, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.
- SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, V. W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie *maidenii*. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 45-53, jan./mar. 2001.
- SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N. Biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. de pequenas propriedades rurais em Vera Cruz, RS. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 17-22, jan./mar. 2011.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, London, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, dez. 1965.
- SILVA, R. F.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, L. M.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. Projeção do estoque de carbono e análise da geração de créditos em povoamentos de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 979-992, out. 2008.

- SOARES, C. P. B., LEITE, H. G.; GÖRGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 711-718, set. 2005.
- SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 533-539, set. 2002.
- STAPE, J.L.; BINCLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.255, n.3/4, p. 920-930, Sept. 2008.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.
- TRUGILHO, P. F.; ARANTES, M. D. C.; PÁDUA, F. A.; ALMADO, R. P.; ANA, E. R. B. Estimativa de carbono na madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 33-40, jan. 2010.

Recebido em 27/11/2013
Aceito para publicação em 03/10/2014