

Modelagem da biomassa e do estoque de carbono em plantas jovens de *Eucalyptus*Modeling of biomass and carbon stock in young *Eucalyptus*Maíra Reis de Assis¹, Paulo Fernando Trugilho², Sebastião Carlos da Silva Rosado²,
Thiago de Paula Protasio³ e Selma Lopes Goulart⁴**Resumo**

O objetivo do trabalho foi ajustar modelos de regressão para estimativa de biomassa seca e estoque de carbono total, por material genético e idade em *Eucalyptus*, considerando diferentes estádios iniciais de desenvolvimento da planta. O experimento foi conduzido com sete materiais genéticos de *Eucalyptus*, sendo o *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis* e *Corymbia citriodora* provenientes de sementes e os clones GG100, AEC144, 7085 e 58. Foram realizadas avaliações nas plantas antes do plantio, aos dois, quatro, seis, oito e 12 meses de idade. Em todas as idades foram obtidos o diâmetro na altura do coleto e comprimento da parte aérea da planta. A biomassa de cada planta foi separada em tronco, folhas e raiz, sendo cada compartimento seco em estufa para determinação da massa seca e carbono total. Determinou-se o teor de carbono elementar, por compartimento da planta, e a densidade básica do caule. Foram testados modelos não lineares, lineares simples e múltiplos para a estimativa de biomassa seca e carbono total, por material genético e idade. As características avaliadas nas plantas apresentaram uma tendência de aumento com a idade, sendo observado um comportamento típico, de acordo com o material genético. Os modelos, para os diferentes materiais genéticos e idades, apresentaram altos ajustes e precisão. Verificou-se que cada material genético e cada idade apresentou comportamento particular de produção de biomassa seca e estoque de carbono total, não sendo possível selecionar um modelo comum que representasse todos eles. As diferenças identificadas quanto à produção de biomassa dos materiais genéticos de *Eucalyptus* no primeiro ano de cultivo sugerem a possibilidade de seleção de genótipos para condições distintas de plantio.

Palavras-chave: Modelos; Idade; Carbono; Reflorestamento.

Abstract

The aim of the present research was to test regression models in order to estimate the dry biomass and total carbon storage according to genetic material and age in *Eucalyptus*, at different initial development stages of the plant. The experiment was conducted with genetic materials of *Eucalyptus*, in which *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis* and *Corymbia citriodora* came from seeds and GG100, AEC144, 7085 and 58 were clones. Plants were evaluated before plantation, at two, four, six, eight and 12 months. The diameter at collar height and the length of the aerial part of the plant were obtained in all ages. The biomass of each plant was separated in bulk, leaves and root, and each compartment was dried in stove in order to determine the dry mass and total carbon. The content of elementary carbon was determined by part of the plant, as well as the basic density of the bulk. In order to estimate the dry biomass and total carbon per genetic material and age, non-linear models and simple and multiple linear models were tested. The characteristics evaluated on the plants tended to increase with age, and a typical behavior was observed according to the genetic material. Models fitted for different genetic materials and ages presented, in general, good adjustment and precision. When adjusting regression models each genetic material and age presented a singular behavior of dry biomass production and total carbon storage, thus it was not possible to select a common model that represented all of them. Differences identified in the production of biomass of genetic materials of *Eucalyptus* in the first year suggest the possibility of selecting genotypes for distinct conditions of plantation.

Keywords: Models; Age; Carbon; Reforestation.

¹Doutoranda em Ciência e Tecnologia da Madeira, UFPA - Universidade Federal de Lavras. Caixa Postal 3037 -37200-000, Lavras - MG. E-mail: maira1403@yahoo.com.br.

²Professor Doutor Associado, UFPA - Universidade Federal de Lavras. Caixa Postal 3037 -37200-000, Lavras - MG. E-mail: trugilho@dcf.ufpa.br; scrosado@ufpa.br.

³Mestre. Professor Temporário, UFPA - Universidade Federal de Goiás. Regional Jataí, Câmpus Jatobá. Caixa Postal 3 - Rodovia BR-364, km 192 - Parque Industrial -75801-615, Jataí - GO. E-mail: depaulaprotasio@gmail.com.

⁴Pós-Doutora em Ciência e Tecnologia da Madeira, UFPA - Universidade Federal de Lavras. Caixa Postal 3037 -37200-000, Lavras - MG. E-mail: lopesgoulart@yahoo.com.br.

INTRODUÇÃO

O aumento das áreas com florestas, desde o início das discussões acerca das mudanças climáticas, tem sido recomendado como alternativa de ação para frear ou minimizar os efeitos causados pelo aumento das concentrações de gases do efeito estufa, em especial o CO₂, na atmosfera terrestre.

Os ecossistemas florestais são os principais componentes do ciclo global do carbono (PAN et al., 2011) e destacam-se, pois são capazes de absorver e armazenar grandes quantidades deste elemento na parte aérea, raízes, camadas decompostas sobre o solo, no solo, entre outros, constituindo o maior reservatório de carbono de todos os ecossistemas terrestres (CAMPOS, 2001; RENNERT, 2004; SOARES; LEITE; GORGENS, 2005).

A absorção de carbono da atmosfera é maior em florestas secundárias e em plantações jovens, que apresentam altas taxas de crescimento quando comparado a florestas já maduras (AREVALO; ALEGRE; VILCAHUAMAN, 2002; RIBEIRO, 2007), pois é na sua fase de crescimento que as árvores removem e retêm quantidades significativas de carbono da atmosfera (FEARNSIDE; GUIMARÃES, 1996). A importância principal das florestas maduras para o efeito estufa é que elas guardam em suas árvores e no solo mais carbono que o existente atualmente na atmosfera, constituindo um enorme reservatório imobilizado de carbono (HOUGHTON, 1994; STEPHENSON et al., 2014). No entanto, se transformam em fonte de emissão quando ocorrem distúrbios naturais ou antrópicos, através da liberação rápida de carbono, seja pelas queimadas, ou gradativamente, pela decomposição (SCHNEIDER et al., 2005; RIBEIRO, 2007).

O eucalipto é a cultura mais utilizada em plantios florestais no Brasil, sendo de grande importância econômica e social para o país. Esta matéria-prima é utilizada no país especialmente nos segmentos de papel e celulose e na siderurgia a carvão vegetal, que juntos concentram cerca de 92% de toda área plantada com *Eucalyptus* (ABRAF, 2013). Entretanto, há grande variabilidade intra e interespecífica entre as espécies e clones de *Eucalyptus*, principalmente em relação às características da madeira, produção de biomassa e taxa de incremento.

Atualmente, várias empresas do setor florestal utilizam a informação da estimativa de massa de madeira para fazer previsão da quantidade de produtos a ser gerada por material genético

por área, além da quantidade de carbono fixado na planta e por idade. Estas informações dão suporte ao planejamento e tomada de decisão da necessidade ou não de aumento da área reflorestada, bem como para a obtenção de crédito de carbono. Além disso, uma estimativa acurada da biomassa, desde a fase jovem das plantas, é fundamental no entendimento do papel das florestas no ciclo do carbono (SILVA et al., 2007; SILVEIRA et al., 2008).

Para estimar, ao longo do tempo e/ou espaço, a biomassa e os estoques de carbono nas florestas são comumente aplicados modelos ou equações alométricas, que utilizam dados de inventário florestal ou de sensoriamento remoto (BOMBELLI et al., 2009). Atualmente, o desenvolvimento de modelos que quantifiquem o estoque de carbono presente em uma floresta tem se tornado uma tendência e necessidade, pois a partir destas informações serão elaborados novos projetos de florestamento ou reflorestamento (SOARES; LEITE; GORGENS, 2005). Modelos parcimoniosos, de fácil interpretação e de alta precisão em que são empregadas variáveis independentes relevantes que podem ser obtidas precisa e facilmente para a estimativa da biomassa, como a densidade básica da madeira e o DAP, devem ser escolhidos (RIBEIRO et al., 2011).

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi ajustar modelos de regressão para estimativa de biomassa seca e estoque de carbono total, por material genético e idade, em *Eucalyptus*, considerando diferentes estádios iniciais de desenvolvimento da planta.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em viveiro comercial, no município de Lavras, Minas Gerais (latitude 21° 14' 30" sul, longitude 44° 00' 10" oeste e altitude de 919 metros) (IBGE, 2011). A precipitação pluvial média anual em Lavras é de 1.460 mm, umidade relativa do ar média de 76,2% e temperatura média anual de 20,4 °C, variando de 17,1 °C em julho a 22,8 °C em fevereiro (BRASIL, 1992; DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007).

Foram cultivadas plantas de quatro clones de *Eucalyptus*, GG100 (híbrido do *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake), AEC144 (híbrido do *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake), 7085 (híbrido do *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake) e 58 (híbrido do *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.), sendo estes largamente utilizados em plantios comerciais

no estado de Minas Gerais. Além dos clones, foram utilizados materiais genéticos provenientes de sementes de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Corymbia citriodora* Hook.

As plantas, tanto clonais como seminais, foram produzidas em casa de vegetação em tubetes de polietileno de 50 cm³ e dimensões de 30 x 120 mm. Para mudas de sementes, os tubetes foram preenchidos com a mistura do substrato Bioplant®, acrescido do produto comercial para adubação de liberação lenta denominado Osmocote®, N-P-K com formulação 19-6-10, fibra de coco e água, na proporção 50 kg, 300g, 500g, 20 litros e 20 litros, respectivamente. Para mudas clonais, os tubetes continham o substrato Bioplant®, mas com composição diferenciada para mudas de estaquia, acrescido de Osmocote®, fibra de coco e água, na proporção 100 kg, 200 g, 20 litros e 30 litros, respectivamente. Após a fase de produção de mudas, estas foram transplantadas para recipientes plásticos com volume de 20 litros do mesmo substrato.

As mudas cresceram a pleno sol após o plantio nos recipientes plásticos. Para a fertirrigação foram dissolvidos 1000 g de nitrato de cálcio, 400g de nitrato de potássio, 200 g de MAP, 500 g de sulfato de magnésio, 12g de micronutrientes do produto ConMicros Standard® em 500 litros de água, sendo aproximadamente 3 litros de solução nutritiva por planta, dois dias por semana. A irrigação foi realizada quatro vezes ao dia, de forma automatizada.

A primeira avaliação foi realizada nas mudas antes do plantio, sendo considerada como a "Idade Zero". As avaliações subsequentes foram feitas nas idades pós-plantio de dois, quatro, seis, oito e 12 meses. Foram utilizadas três plantas de cada material genético por época de avaliação. Para todas as idades foram obtidos os dados de diâmetro na altura do coleto e comprimento da parte aérea da planta.

Os compartimentos da biomassa de cada planta foram separados em tronco, folhas e raiz, que foram separados e acondicionados no próprio local de instalação do experimento.

No laboratório, as amostras foram secas em estufa com circulação de ar à temperatura de 60°C até atingir massa constante. Após a secagem, as amostras foram pesadas para a determinação da massa seca.

Os valores de biomassa seca foram convertidos para massa de carbono, em cada compartimento das plantas, conforme a equação 1.

$$MSc = MS \times \frac{C}{100} \quad (1)$$

em que, MSc é o estoque de carbono (gramas) na massa seca da raiz, tronco ou folhas, MS é a massa seca (gramas) de cada compartimento e C é o teor de carbono em cada compartimento (%).

A biomassa seca e a massa de carbono total de cada planta foram obtidas pelo somatório das massas dos compartimentos.

Na madeira foram obtidas a densidade básica e o teor de carbono. A densidade básica foi determinada em amostras, de aproximadamente 2 cm de espessura, retiradas na altura do coleto das plantas, aos dois, quatro, seis, oito e 12 meses de idade. Os corpos-de-prova foram saturados para obtenção da densidade básica da madeira sem casca, segundo a norma analítica NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003).

O teor de carbono foi obtido no equipamento Vario Micro Cube. Os materiais, em cada uma das partes da planta (folha, tronco e raiz), foram moídos em moinhos tipo Willey, peneirados e a alíquota utilizada foi a que passou pela peneira de 200 mesh e ficou retida na de 270 mesh. Após peneiramento, os materiais foram secos em estufa convencional à temperatura de 65°C, por 24 horas.

Foram testados modelos de regressão para estimar a massa seca total e carbono total para os materiais genéticos e as idades consideradas. Nas Tabelas 1 e 2 encontram-se os modelos estatísticos propostos com as respectivas classificações, para os materiais genéticos e idades, respectivamente.

Os modelos lineares foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) e os modelos não lineares pelo método de Gauss Newton. O *software* estatístico utilizado para o ajuste dos modelos foi o R, versão 2.11.0 (R Core Team, 2013). Os critérios adotados para a seleção dos melhores modelos, por material genético e idade, foram a significância da regressão e dos seus coeficientes, o coeficiente de determinação ajustado (R^2), o erro padrão residual ($Sy_x\%$), em porcentagem, e análise gráfica dos resíduos padronizados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os genótipos de eucalipto diferiram na produção de biomassa e carbono total entre e dentro das idades (Tabela 3). Essas diferenças na produção de biomassa entre materiais genéticos de eucaliptos

Tabela 1. Modelos estatísticos testados por material genético para estimativa de biomassa seca e carbono total.
Table 1. Statistic models tried for each genetic material in order to estimate the dry biomass and total carbon.

Nº	Modelo	Classificação
1	$Y_i = \beta_0(e^{\beta_1 * I}) + \varepsilon$	não-linear
2	$\ln(Y_i) = \beta_0 + \beta_1(e^{\beta_2 * I}) + \varepsilon$	não-linear
3	$\ln(Y_i) = \beta_0 + \beta_1(I) + \beta_2(I^{1/3}) + \varepsilon$	linear múltiplo
4	$\ln(Y_i) = \beta_0 + \beta_1(I^{1/3}) + \varepsilon$	linear simples
5	$Z = \beta_0 + \beta_1(I) + \beta_2(\ln D_{\text{colete}}) + \varepsilon$	linear múltiplo
6	$Z = \beta_0 + \beta_1(I) + \beta_2(\ln C_{\text{pa}}) + \varepsilon$	linear múltiplo

Y_i ou Z é biomassa ou carbono total, em gramas; β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes dos modelos; \ln é o logaritmo natural; I é a idade, em meses; D_{colete} é o diâmetro na altura do coleto, em milímetros; C_{pa} é o comprimento da parte aérea, em metros; ε é o erro do modelo.

Y_i or Z is biomass or total carbon, in grams; β_0 , β_1 and β_2 are the coefficients of the models; \ln is the natural logarithm; I is the age, in months; D_{colete} is the diameter at collar height, in millimeters; C_{pa} is the length of aerial part, in meters; ε is the error of the model.

Tabela 2. Modelos estatísticos testados por idade para estimativa de biomassa seca e carbono total.

Table 2. Statistical models tried per age in order to estimate the dry biomass and total carbon.

Nº	Modelo	Autor
1	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * C_{\text{pa}} + \beta_2 * D_{\text{colete}} * \ln(C_{\text{pa}}^2) + \varepsilon$	Adaptado de Higuchi e Carvalho Júnior (1994)
2	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * D_{\text{colete}} + \beta_2 * DB_{\text{caule}} + \varepsilon$	-
3	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * C_{\text{pa}} + \beta_2 * DB_{\text{caule}} + \varepsilon$	-
4	$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * \ln(D_{\text{colete}}^2) + \beta_2 * D_{\text{colete}}^2 * C_{\text{pa}} + \beta_3 * DB_{\text{caule}} + \varepsilon$	-

Y_i é carbono total, em gramas; β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes dos modelos; \ln é o logaritmo natural; D_{colete} é o diâmetro na altura do coleto, em milímetros; C_{pa} é o comprimento da parte aérea, em metros; DB_{caule} é a densidade básica do caule, em g.cm^{-3} ; ε é o erro do modelo.

Y_i or Z is biomass or total carbon, in grams; β_0 , β_1 and β_2 are the coefficients of the models; \ln is the natural logarithm; I is the age, in months; D_{colete} is the diameter at collar height, in millimeters; C_{pa} is the length of aerial part, in meters; ε is the error of the model.

cultivados em condições controladas também foram identificadas por Pinto et al. (2011), as quais podem ser devido à eficiência de aquisição e/ou na utilização de nutrientes na produção de matéria seca, características estas genéticas de cada espécie e da interação genótipo-ambiente.

Nos estádios iniciais de crescimento e desenvolvimento do eucalipto, a alta eficiência na absorção de nutrientes, ou seja, um melhor aproveitamento dos fertilizantes aplicados e a capacidade de empregá-los na síntese da biomassa sugerem a possibilidade de seleção de genótipos dessa cultura para maior adaptação a condições distintas de solo, sobretudo aqueles de baixa fertilidade natural (BARROS et al., 1990). Vários trabalhos têm constatado diferenças na eficiência nutricional entre espécies de eucalipto (SCHUMACHER; POGGIANI, 1993; LADEIRA, 1999; SANTANA; BARROS; NEVES, 2002; FARIA et al., 2008).

O clone 58 apresentou, entre todos os materiais genéticos, maior produção de massa seca total aos 12 meses de idade e, conseqüentemente, maior estoque de carbono (Tabela 3), seguido pelo clone GG100. Bernardo (1995) verificou que a espécie *E. camaldulensis* foi mais eficiente em converter energia em madeira que as espécies *E. urophylla* e *E. pellita*, aos 41 meses de idade. Comportamento oposto foi apresentado pelo clone 7085, o que foi consistente com o seu menor crescimento em altura e diâmetro em relação aos demais materiais genéticos.

Na Tabela 4 encontram-se os resultados para os melhores modelos ajustados para cada variável dependente em questão, por material genético. Ao analisar os índices de ajuste e precisão dos modelos ajustados para estimar a biomassa seca e carbono total nas plantas de diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus*, verificou-se que as equações selecionadas apresentaram elevados coeficientes de determinação corrigidos. Dessa forma, o valor do erro padrão em porcentagem e a análise gráfica dos resíduos foram importantes na seleção dos melhores ajustes por material genético.

Verificou-se que cada material genético apresentou um comportamento particular de produção de biomassa seca e estoque de carbono total, não sendo possível selecionar o mesmo modelo para todos os materiais genéticos. Esse resultado é um indicativo do efeito específico do material genético na produção de biomassa e, conseqüentemente, de carbono. Dessa forma, verificou-se que o modelo mais adequado para as estimativas de biomassa seca e carbono total para o *E. urophylla* e *C. citriodora* foi o número 2, enquanto que o modelo 3 foi selecionado para o *E. grandis*.

Para os clones o comportamento foi diferente, ou seja, um mesmo modelo, o número 4, foi o mais adequado. Este resultado pode estar indicando que, apesar da variabilidade, a produção de massa seca e estoque de carbono apresentaram comportamento similar entre estes materiais genéticos. A escolha de um modelo alomé-

Tabela 3. Produção de massa seca e carbono total das plantas, por material genético, nas diferentes idades.**Table 3.** Dry biomass production and total carbon stock, in the different genetic materials, at different ages.

Idade (meses)	Material genético						
	<i>E. urophylla</i>	<i>E. grandis</i>	<i>C. citriodora</i>	Clone GG100	Clone AEC144	Clone 7085	Clone 58
	Biomassa seca total (g)						
0	1,09	0,96	1,39	1,56	1,85	1,59	1,84
2	26,41	45,62	13,82	30,58	36,48	44,49	55,91
4	160,03	147,22	112,73	153,88	123,7	127,61	206,78
6	298,85	154,52	251,00	334,92	304,99	238,95	340,11
8	438,68	410,08	414,66	431,35	404,51	392,07	620,85
12	760,39	827,29	968,42	985,78	807,73	759,34	1198,40
	Estoque de carbono total (g)						
0	0,47	0,41	0,60	0,69	0,82	0,70	0,82
2	11,18	19,40	5,94	12,99	15,66	18,95	23,43
4	71,44	65,64	50,28	70,16	55,89	57,19	93,30
6	137,94	88,64	113,18	155,03	141,17	110,17	156,99
8	204,33	189,5	187,95	202,03	186,26	180,98	281,97
12	345,98	373,45	431,92	447,19	365,73	342,85	543,49

Tabela 4. Modelos selecionados para estimativa de biomassa seca e carbono total para os diferentes materiais genéticos.**Table 4.** Selected models in order to estimate the dry biomass and total carbon in the different genetic materials.

Materiais genéticos	Modelo ajustado	R ² aj	Sxy (g)	Sxy (%)	GL erro	Fc
<i>E. urophylla</i>	$\ln(\text{Massa seca}) = 6,64195 - 6,5595 * (e^{-0,33565 * I})$	0,99	73,13	26,03	15	-
	$\ln(\text{Carb total}) = 5,88788 - 6,64428 * (e^{-0,33044 * I})$	0,99	31,93	24,84	15	-
<i>E. grandis</i>	$\ln(\text{Massa seca}) = -0,06065 - 0,05774 * (I) + 3,22465 * (I^{1/3})$	0,99	52,50	22,91	13	833 (<0,01)
	$\ln(\text{Carb total}) = -0,91549 - 0,05257 * (I) + 3,23537 * (I^{1/3})$	0,99	26,35	25,30	13	795,7
<i>C. citriodora</i>	$\ln(\text{Massa seca}) = 7,04596 - 6,79516 * (e^{-0,24265 * I})$	0,98	53,69	23,14	14	-
	$\ln(\text{Carb total}) = 6,25552 - 6,85224 * (e^{-0,24253 * I})$	0,98	24,85	23,86	14	-
Clone GG100	$\ln(\text{Massa seca}) = 0,24810 + 2,92700 * (I^{1/3})$	0,98	56,20	18,67	15	726,5
	$\ln(\text{Carb total}) = -0,59250 + 0,24176 * (I^{1/3})$	0,98	24,81	17,96	15	649,3
Clone AEC144	$\ln(\text{Massa seca}) = 0,48790 + 27,23500 * (I^{1/3})$	0,98	55,38	19,79	16	780,2 (<0,01)
	$\ln(\text{Carb total}) = -0,32960 + 27,37400 * (I^{1/3})$	0,98	26,17	20,51	16	712,5 (<0,01)
Clone 7085	$\ln(\text{Massa seca}) = 0,42058 + 2,75546 * (I^{1/3})$	0,99	47,96	20,01	15	1898 (<0,01)
	$\ln(\text{Carb total}) = -0,41418 + 2,77675 * (I^{1/3})$	0,99	22,73	20,85	15	1745 (<0,01)
Clone 58	$\ln(\text{Massa seca}) = 0,51742 + 2,92749 * (I^{1/3})$	0,99	63,58	16,77	15	1144 (<0,01)
	$\ln(\text{Carbono total}) = -0,31352 + 2,94469 * (I^{1/3})$	0,98	30,18	17,53	15	1044

R_{aj}: Coeficiente de determinação corrigido; Sxy: Erro padrão da estimativa, em gramas (g) e em porcentagem (%); GL: graus de liberdade; Fc: Valor de F calculado.

R_{aj}: Adjusted coefficient of determination; Sxy: Standard error of the estimative, in grams (g) and in percentage (%); GL: degrees of freedom; Fc: calculated value F.

trico único que mostre a evolução do estoque de carbono com a idade independentemente do material genético é de grande interesse, tendo em vista os plantios florestais clonais no Brasil.

Pela Tabela 4, observa-se que os modelos que melhor se ajustaram aos dados por materiais genéticos utilizaram somente a idade como variável independente. Os modelos lineares múltiplos, em que foi utilizado além do fator idade, o diâmetro na altura do coleto e o comprimento da parte aérea, não apresentaram resultados satisfatórios. Este fato ressalta a importância do efeito da idade na estimativa da biomassa seca e do carbono total por material genético. Resultado semelhante foi observado por Reis et al. (1985). Os autores destacaram a importância da inclusão da variável idade para a estimativa do acúmulo e

distribuição da biomassa dos compartimentos da parte aérea e do sistema radicular da árvore.

Santana et al. (2008) estabeleceram um modelo para estimar a produção de biomassa potencial média para eucalipto em diferentes regiões do Brasil. No ajuste, foi avaliado o efeito de características climáticas e diferentes idades sobre a produtividade. A variável independente que mais influenciou foi idade. O modelo ajustado evidenciou a importância desta, da temperatura e da disponibilidade de água nas diferentes regiões e na produção de biomassa.

A Tabela 5 apresenta a relação dos modelos selecionados para a estimativa da massa seca e carbono total para cada idade. Os modelos ajustados para as diferentes idades mostraram, de maneira geral, bons ajustes e precisão.

Tabela 5. Parâmetros e estatísticas dos modelos selecionados para estimativa de massa seca e carbono total das plantas dos diferentes materiais genéticos, para cada idade.
Table 5. Parameters and statistics of models selected in order to estimate the dry biomass and total carbon of plants of different genetic materials for each age.

Idade (meses)	Modelo selecionado	R ² aj	Sxy	Sxy (%)	GL erro	Fc
2	MS = -101,47 + 21,73*ln(Dcoleto ²) + 0,22*Dcoleto ² *Cpa + 84,13*Dbcaule	0,89	5,01	13,83	17	55,3 (<0,01)
	Ctotal = -44,64 + 9,60*ln(Dcoleto ²) + 0,09*Dcoleto ² *Cpa + 36,70*Dbcaule	0,89	2,14	13,91	17	53,40 (<0,01)
4	MS = -521,04 + 71,79*ln(Dcoleto ²) + 0,31*Dcoleto ² *Cpa + 476,34*Dbcaule	0,78	22,85	15,50	17	24,3 (<0,01)
	Ctotal = -235,13 + 32,93*ln(Dcoleto ²) + 0,14*Dcoleto ² *Cpa + 208,75*Dbcaule	0,77	10,47	15,80	17	23,6 (<0,01)
6	MS = 456,41 - 296,93*Cpa + 17,66*Dcoleto*ln(Cpa ²)	0,62	44,06	15,46	17	16,3 (<0,01)
	Ctotal = 216,60 - 143,11*Cpa + 8,36*Dcoleto*ln(Cpa ²)	0,61	20,92	15,96	17	15,8 (<0,01)
8	MS = 517,20 + 301,11*Cpa - 1302,9*DBcaule	0,65	57,46	12,92	18	19,3 (<0,01)
	Ctotal = 252,74 + 133,49*Cpa - 613,36*DBcaule	0,64	26,03	12,71	18	19,0 (<0,01)
12	MS = -2670,2 + 73,83*Dcoleto + 2445,57*DBcaule	0,73	107,60	12,35	17	26,3 (<0,01)
	Ctotal = -1186,9 + 33,45*Dcoleto + 1055,42*DBcaule	0,72	48,73	12,38	17	25,8 (<0,01)

R²aj: Coeficiente de determinação corrigido; Sxy: Erro padrão da estimativa, em gramas (g) e em porcentagem (%); GL: graus de liberdade; Fc: Valor de F calculado.

R²aj: Adjusted coefficient of determination; Sxy: Standard error of the estimative, in grams (g) and in percentage (%); GL: degrees of freedom; Fc: calculated value F.

Para a idade de dois e quatro meses, verificou-se que o modelo 4 foi o que melhor se ajustou na estimativa da massa seca e carbono total para todos os materiais genéticos conjuntamente de *Eucalyptus*, de acordo com os critérios de avaliação e seleção anteriormente citados. O modelo 1 foi o que melhor se ajustou para estimativa de carbono total na idade de seis meses. Aos oito meses, verificou-se que o modelo 3 foi o que melhor se ajustou na estimativa da variável em estudo. Entre os modelos ajustados, o modelo que melhor se adequou na estimativa de carbono total para a idade 12 meses foi o número 2.

Pela Tabela 5, observa-se que os modelos que melhor se ajustaram aos dados, por idade, utilizaram somente as variáveis independentes densidade básica, diâmetro na altura do coleto e comprimento da parte aérea.

Equações de regressão para estimar a biomassa e carbono dos compartimentos das árvores baseadas em relações empíricas entre o DAP e a altura, ou a sua combinação (DAP²H) se ajustam bem na grande maioria dos dados observados (SOARES et al., 1996; SCHUMACHER; CALDEIRA, 2001; LADEIRA et al., 2001; SILVA et al., 2004, 2008; SOARES; LEITE; GORGENS, 2005; PAIXÃO et al., 2006; MELLO; GONÇALVES, 2008). As variáveis independentes diâmetro na altura do coleto e comprimento da parte aérea são de mais simples determinação que a obtenção da densidade básica da madeira. En-

tretanto, Chave et al. (2005) enfatizam a importância da densidade básica como variável independente em modelos alométricos, sendo sua determinação mais precisa e menos dispendiosa que a determinação da altura.

Verificou-se que cada idade apresentou um comportamento particular de produção de biomassa seca e estoque de carbono total, não sendo possível selecionar um mesmo modelo que representasse todas as idades. Esse resultado é um indicativo do efeito específico da idade na produção de biomassa e, conseqüentemente, de carbono.

CONCLUSÕES

As características avaliadas nas plantas, biomassa seca e estoque de carbono, apresentaram tendência de aumento com a idade, sendo o comportamento distinto de acordo com o material genético. Os modelos testados para a predição destas apresentaram boa qualidade, permitindo estimativas apropriadas para as variáveis biomassa e carbono total em materiais genéticos de *Eucalyptus* em função da idade e por idade em função da densidade básica, comprimento da parte aérea e diâmetro na altura do coleto.

As diferenças identificadas quanto à produção de biomassa dos materiais genéticos de *Eucalyptus* no primeiro ano de cultivo, sugerem a possibilidade de seleção de genótipos para condições distintas de campo.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à Fapemig, pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa de estudos e financiamento do projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2013**: ano base 2012. Brasília, 2013. 148 p. Disponível em: < <http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 6 dez. 2013.

AREVALO, L. A.; ALEGRE, J. C.; VILCAHUAMAN, L. J. M. **Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002, 41 p. (Documentos, n. 73).

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p. 127-186.

BERNARDO, A. L. **Crescimento e eficiência nutricional de *Eucalyptus* spp. sob diferentes espaçamentos na região de Cerrado de Minas Gerais**. 1995. 102 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

BOMBELLI A.; AVITABILE V.; BELELLI MARCHESINI L.; BALZTER H.; BERNOUX M.; HALL R.; HENRY M.; LAW B. E.; MANLAY R.; MARKLUND L.G.; SHIMABUKURO Y.E. **Biomass: assessment of the status of the development of the standards for the terrestrial essential climate variables**. Rome: GTOS, 2009. 18 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas: 1961-1990**. Brasília: Embrapa-SPI, 1992. 84 p.

CAMPOS, C. P. **A conservação das florestas no Brasil, mudança do clima e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Kyoto**. 2001. 169 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J. P.; NELSON, B.W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIÉRA, B.; YAMAKURA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, Berlin, v. 145, n. 1, p. 87-99, jan. 2005.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, 2007.

FARIA, G. E. D.; BARROS, N. F. D.; CUNHA, V. L. P.; MARTINS, I. S.; MARTINS, R. D. C. C. Avaliação da produtividade, conteúdo e eficiência de utilização de nutrientes em genótipos de *Eucalyptus* spp. no Vale do Jequitinhonha, MG. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 363-373, jul./set. 2008.

FEARNSIDE, P. M.; GUIMARÃES, W. M. Carbon uptake by secondary forests in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 80, n. 1/3, p. 35-46, 1996.

HOUGHTON, R. A. As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. In: SEMINÁRIO EMISSÃO × SEQUESTRO DE CO₂: UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1., 1994, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: UFRJ, 1994. p. 38-76.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Cidades*. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br> >. Acesso em: 15 nov. 2011.

LADEIRA, B.; REIS, G.; REIS, M.; BARROS, N. Produção de biomassa de eucalipto sob três espaçamentos em uma seqüência de idade. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 69-78, 2001.

LADEIRA, B. C. **Crescimento, produção de biomassa e eficiência nutricional de *Eucalyptus* spp., sob três espaçamentos, em uma sequencia de idade**. 1999. 132 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

MELLO, S. L. M.; GONCALVES, 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./fev. 2008.

- PAIXÃO, F. A.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, M. L. D.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. D. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 411-420, mar./abr. 2006.
- PAN, Y.; BIRDSEY, R. A.; FANG, J.; HOUGHTON, R.; KAUPPI, P. E.; KURZ, W. A.; HAYES, D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, v. 333, n. 6045, p. 988-993, 2011.
- PINTO, S. I. C.; FURTINI NETO, A. E.; NEVES, J. C. L.; FAQUIN, V.; MORETTI, B. S. Eficiência nutricional de clones de eucalipto na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 523-533, mar./abr. 2011.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2013. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 14 jul. 2013.
- REIS, M. G. F.; KIMINS, J. P.; REZENDE, 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, mar./abr. 1985.
- RENNER, R. M. **Sequestro de carbono e a viabilização de novos reflorestamentos no Brasil**. 2004. 147 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- RIBEIRO, S. C. **Quantificação do estoque de biomassa e análise econômica da implementação de projetos visando à geração de créditos de carbono em pastagem, capoeira e floresta primária**. 2007. 139 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- RIBEIRO, S. C.; FEHRMANN, L.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; KLEINN, C.; GASPAS, R. O. Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 262, n. 3, p. 491-499, ago. 2011.
- SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B.; NOVAIS, R. F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 697-706, jul./ago. 2008.
- SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 447-457, jul./ago. 2002.
- SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; GIACOMELLI SOBRINHO, V.; SCHNEIDER, P. S. P. Determinação indireta do estoque de biomassa e carbono em povoamentos de Acácia-Negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 15, n. 4, p. 391-402, 2005.
- SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. 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, 2001.
- SCHUMACHER, M. V.; POGGIANI, F. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* hill ex Maiden e *Eucalyptus torelliana* F. Muell, plantados em Anhembí, SP. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 21-34, 1993.
- SILVA, C. J.; SANCHES, L.; BLEICH, M. E.; LOBO, F. A.; NOGUEIRA, J. S. Produção de serrapilheira no cerrado e floresta de transição Amazônia-Cerrado do Centro-Oeste Brasileiro. *Acta Amazônica*, Manaus, v. 37, n. 4, p. 543-548, 2007.
- SILVA, H. D.; FERREIRA, C. A.; CORRÊA, R. S.; BELLOTE, A. F. J.; TUSSOLINI, E. L. Alocação de biomassa e ajuste de equações para estimativa de biomassa em compartimentos aéreos de *Eucalyptus benthamii*. *Boletim Pesquisa Florestal*, Colombo, n. 49, p. 83-95, jul./dez. 2004.
- SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. *Floresta*, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 185-206, 2008.

- SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; GORGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no tronco de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 711-718, set./out. 2005.
- SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L.; LEITE, H. G. Modelos para estimar a biomassa da parte aérea em um povoamento de *Eucalyptus grandis* na região de Viçosa, Minas Gerais. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 179-189, mar./abr., 1996.
- STEPHENSON, N. L.; DAS, A. J.; CONDIT, R.; RUSSO, S. E.; BAKER, P. J.; BECKMAN, N. G.; COOMES, D. A.; LINES, E. R.; MORRIS, W. K.; RÜGER, N.; ÁLVAREZ, E.; BLUNDO, C.; BUNYAVEJCHEWIN, S.; CHUYONG, G.; DAVIES, S. J.; DUQUE, Á.; EWANGO, C. N.; FLORES, O.; FRANKLIN, J. F.; GRAU, H. R.; HAO, Z.; HARMON, M. E.; HUBBELL, S. P.; KENFACK, D.; LIN, Y.; MAKANA, J. R.; MALIZIA, A.; PABST, R. J.; PONGPATTANANURAK, N.; SU, S. H.; SUN, I. F.; TAN, S.; THOMAS, D.; VAN MANTGEM, P. J.; WANG, X.; WIZER, S. K.; ZAVALA, M. A. Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature*, v. 507, n. 7490, p. 90-93, 2014.

Recebido em 24/02/2014

Aceito para publicação em 16/12/2014

