

ESTIMATIVA DE BIOMASSA DE PLANTIOS DE EUCALIPTO NO BRASIL¹

Reynaldo Campos Santana², Nairam Felix de Barros³, Helio Garcia Leite⁴, Nicholas Brian Comerford⁵ e Roberto Ferreira de Novais³

RESUMO – O objetivo deste trabalho foi estimar a produção de biomassa de eucalipto, para diferentes regiões do Brasil. Foi avaliado o efeito de características climáticas sobre a produtividade de eucalipto utilizando-se o banco de dados do Programa de Pesquisa em Solos e Nutrição de Eucalipto do Departamento de Solos – UFV. Características climáticas e idade do povoamento foram importantes para obtenção do modelo. Houve variação na produção estimada de biomassa entre regiões, sendo a maior produtividade três vezes superior à menor. A produção de biomassa foi menor nas regiões com menor disponibilidade de água. A proporção de copa em relação ao tronco reduziu com a idade da plantação, de maneira acentuada até à idade de 3,6 anos, e de maneira mais lenta a partir desta idade.

Palavras-chave: Crescimento florestal, fatores de crescimento e modelo de produção

BIOMASS ESTIMATION OF BRAZILIAN EUCALYPT PLANTATIONS

ABSTRACT – *The aim of this work was to model growth of eucalypt plantations in Brazil. It was intended to evaluate influence of key climatic variables on eucalypt productivity. The database employed was obtained from the Soil and Eucalypt Nutrition Program of the Soil Department of the Federal University of Viçosa. Climatic characteristics and age were a model important component. The region with the highest productivity produced three times more aboveground biomass than the poorest region. Regions with low water availability exhibited the lowest biomass production. Strong reduced in canopy proportion was observed within 3.5 years following planting. After that the canopy proportion reduced more slowly.*

Keywords: Forest growth, growth factors, production model.

1. INTRODUÇÃO

O plantio de eucalipto no Brasil tem se estendido para regiões além daquelas tradicionais, como a Sul e Sudeste do país, o que levanta a necessidade de se obter informações sobre a produção esperada desses novos plantios.

A produção de uma floresta é determinada pela quantidade de radiação solar interceptada pela copa e pela eficiência de conversão dessa radiação em biomassa.

Essa eficiência é principalmente influenciada pela disponibilidade de água e de nutrientes. O aumento do fornecimento destes fatores, além do ponto de deficiência, tende a aumentar a produção (MARSCHNER, 1997) que é fortemente influenciada pelas interações dos mesmos até que se atinja um nível ótimo.

Os fatores de crescimento podem tornar-se limitantes para as plantas por poucos minutos (temperatura); outros podem limitar o crescimento por dias, semanas (água)

¹ Recebido em 21.03.2007 e aceito para publicação em 19.05.2008.

² Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina-MG. E-mail: <silviculturafvjm@yahoo.com.br>.

³ Departamento de Solos da UFV. E-mail: <nfbarrros@ufv.br>.

⁴ Departamento de Engenharia Florestal da UFV. E-mail: <hglete@gamil.com>.

⁵ University of Florida, 2169 McCarty Hall, 32611-0290 - Gainesville, - Estados Unidos - Caixa-Postal: 110290



ou até mesmo meses (nutrientes). A radiação solar e a concentração de CO₂ da atmosfera são fatores não manejáveis em condições normais e tendem a não limitar o crescimento nos trópicos. Nestas condições, água e nutrientes são os principais fatores que limitam a produtividade florestal (BARROS e COMERFORD, 2002) tornando-a inferior ao potencial máximo permitido pela disponibilidade de radiação (LINDER et al., 1996).

Evidências da interação entre água e nutrientes influenciando a produção de biomassa têm sido obtidas em experimentos de longa duração em *Pinus radiata* na Austrália (RAISON et al., 1992) e com *E. globulus* em Portugal (PEREIRA et al., 1994) e respostas positivas à adição de diferentes nutrientes e, ou, às suas interações com a água têm sido relatadas para plantios de eucalipto no Brasil (BARROS e COMERFORD, 2002; STAPE, et al. 2006). A produção de biomassa é também determinada pelas características genéticas da espécie (SANTANA et al., 2002). As interações entre os fatores de produção e tais características irão definir o padrão de crescimento de uma cultura.

Modelos que abordam a relação entre variáveis climáticas e produção são freqüentemente encontrados na literatura. O índice de CPV de Paterson foi desenvolvido para prever o potencial máximo de crescimento florestal em volume em grandes áreas (JOHNSTON et al., 1967), tendo como base a evapotranspiração, amplitude da temperatura anual, precipitação média anual, comprimento da estação de crescimento e temperatura média mensal do mês mais quente. Jarvis (1985) fez uma avaliação crítica de vários trabalhos e demonstrou existirem evidências sobre a correlação da produção em florestas de coníferas com água disponível no solo. Hingston e Galbraith (1998), trabalhando com 31 sítios de eucalipto na Austrália, concluíram que a idade e a precipitação anual média explicavam 85 % do crescimento em diâmetro e 89 % da altura média dos povoamentos.

O desenvolvimento de modelos capazes de prever o potencial produtivo de diferentes regiões é interessante não só para definir o grau de intervenção por meio de práticas de manejo silvicultural, como também na otimização do uso de recursos visando produção florestal e a proteção do meio ambiente.

Este estudo visou estabelecer um modelo para estimar a produção de biomassa potencial média para eucalipto em diferentes idades e regiões do Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, entre os anos de 1981 e 2000, formou um banco de dados sobre biomassa em plantios de eucalipto cultivados em várias condições edafoclimáticas brasileiras. Neste trabalho, foram mensuradas 1.217 árvores-amostras, em 20 regiões de cinco Estados (219 no Pará, 249 no Espírito Santo, 343 em Minas Gerais, 353 em São Paulo e 53 no Rio Grande do Sul) (Quadro 1). As espécies e os clones de eucalipto utilizados constituíam o melhor material genético disponível na época, para cada região. As práticas de manejo florestal podem ter variado, mas representaram o que melhor se conhecia na época. Em geral, o preparo do solo foi realizado por grade *bedding* ou arado de disco, nas linhas de plantio. A fertilização foi feita em faixa, sulco ou cova na época de plantio e em cobertura, aos 18 meses de idade.

A biomassa foi determinada em povoamentos de seis meses a 11 anos de idade, em parcelas (600 m², 20 x 30 m), em espaçamento 3 x 2 m, distribuídas aleatoriamente e representativas de cada região. Todas as árvores das parcelas tiveram seu diâmetro (a 1,3 m de altura do solo) e sua altura comercial medidos.

Em cada parcela, uma árvore média foi abatida e seus componentes (folha, galho, casca e lenho) foram pesados no campo. Subamostras foram coletadas, submetidas à secagem a 65 °C, em estufa com circulação forçada de ar, até peso constante, para determinação de matéria seca. A biomassa dos componentes das árvores, por hectare, foi obtida ao multiplicar a matéria seca de cada componente das árvores médias pelo número de árvores em um hectare.

O modelo apresentado foi ajustado para a biomassa da parte aérea (folha, galho, casca e lenho) e para a biomassa do tronco (casca e lenho), utilizando-se as 1.217 árvores-amostras, adotando-se o procedimento *stepwise*. O modelo empregado (*mod.1*) foi:

$$\ln Y_i = \beta_0 + \beta_1 DX/ID + \beta_2 \ln ID + \beta_3 \ln (W_i + 41) + \beta_4 \ln T_i + \beta_5 \ln PMS_i / \ln P_i + \varepsilon_i \text{ (mod.1)}$$

em que: Y = biomassa em t ha⁻¹; i = região, DX = variável *Dummy*, sendo $DX = 0$, para a estimativa da biomassa da parte aérea, ou $DX = 1$, para a estimativa da biomassa de tronco; ID = idade (ano, tendo-se 0,5 ano como idade mínima para o modelo de biomassa da parte aérea; 1,5 ano como idade mínima para o modelo de biomassa de tronco; e 11 anos como idade máxima para ambos os modelos);

W = disponibilidade potencial de água (mm). A constante 41 foi adicionada aos valores dessa variável, em razão da transformação Ln (logaritmo neperiano) e, também, pela presença de valores de W negativos, sendo o menor valor igual a -40 ; T = temperatura média anual ($^{\circ}C$); P = precipitação média anual (mm); e PMS = precipitação média acumulada nos seis meses secos (mm, definido em função da menor precipitação média, maior evaporação média e maior temperatura média).

A avaliação do relacionamento entre as variáveis dependente e independentes foi realizada no módulo *multiple regression* do software Statistica (STATSOFT, 1999), seguindo os seguintes critérios de significância estatística: linearidade e homogeneidade das variâncias dos erros (avaliadas pelo gráfico de resíduos, $Erro_i = Y - \hat{Y}$, em função do valor estimado) e normalidade de distribuição dos erros (análise visual do gráfico de probabilidade normal dos resíduos). Foram consideradas *outliers* os dados que, após o processamento das

equações, apresentaram resíduos maiores do que 2,5 unidades de desvio-padrão. Critério adotado para que as pressuposições da análise de regressão fossem atendidas, principalmente em relação à distribuição normal dos resíduos.

A validação do modelo foi realizada segundo o método *Split-Sample*, por meio do procedimento *stepwise* (HAIR et al., 1998). Primeiro, ajustou-se um modelo global (*mod. 1*), utilizando-se todos os dados. A seguir, estes dados foram divididos em duas subamostras, utilizando-se o procedimento *fill random values* do software Statistica. Esse procedimento permite a geração de uma coluna de dados onde, aproximadamente, 50% das informações recebem números de forma casualizada, entre 0 e 0,5 (subamostra 1), e os 50% restantes recebem números entre 0,5 e 1 (subamostra 2). Em cada subamostra foi aplicado o *mod. 1*, para comparação dos resultados entre as equações geradas.

Quadro 1 – Material genético, número de árvores-amostras e valores médios de características climáticas utilizadas no ajuste do modelo para produção de biomassa da parte aérea e do tronco, em eucalipto cultivado em diversas regiões do Brasil
Table 1 – Climatic characteristics, number of sampled trees, and genetic materials represented for fitting eucalypt aboveground biomass model at different regions of Brazil

Região	Material genético*	n	Característica climática				
			P	PMS	EVP	W	T
			mm			$^{\circ}C$	
Três Marias – MG	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	177	1.280	240	1.320	-40	23
Lençóis Paulista – SP	1	35	1.200	240	1.200	0	20
Luiz Antônio – SP	1, 2, 3, 5	207	1.440	240	1.380	60	20
Carbonita – MG	1	12	1.280	240	1.260	20	22
Itamarandiba – MG	10	23	1.280	240	1.260	20	22
Bom Despacho – MG	1	13	1.440	240	1.260	180	21
Paraopeba – MG	1	11	1.440	240	1.260	180	21
Itapetininga – SP	1, 2	13	1.280	320	1.080	200	20
Angatuba – SP	1, 2	16	1.280	320	1.080	200	20
Depressão Central – RS	2	53	1.440	720	780	660	14
Guanhães – MG	1	40	1.280	240	1.080	200	22
Viçosa – MG	1	11	1.360	240	900	460	21
Timóteo – MG	1, 4, 10	36	1.520	320	1.080	440	21
São Miguel Arcanjo – SP	1, 2	12	1.440	480	1.080	360	20
Itapeva – SP	1	18	1.440	480	1.080	360	20
Ipatinga – MG	1, 5	20	1.520	320	1.080	440	22
Litoral Norte – ES	1, 3	249	1.200	320	1.080	120	24
São José dos Campos – SP	1, 2	34	1.840	480	600	1.240	19
Paraibuna – SP	1, 2	18	1.840	480	540	1.300	20
Monte Dourado – PA	3	219	2.320	560	1.140	1.180	26

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (1999), resultados médios obtidos no período de 1931 a 1990; * 1 – *Eucalyptus grandis*, 2 – *E. saligna*, 3 – *E. grandis* x *E. urophylla*, 4 – *E. cloesiana*, 5 – *E. urophylla*, 6 – *E. camaldulensis*, 7 – *E. citriodora*, 8 – *E. tereticornis*, 9 – *E. pellita*, 10 – híbridos; n (nº de árvores-amostra); P (precipitação média anual); PMS (precipitação média acumulada nos seis meses secos, de abril a setembro foram os seis meses secos para todos os locais, exceto para Monte Dourado-PA, cujo período seco foi de julho a dezembro, e para a Depressão Central-RS, definido de novembro a abril); EVP (evaporação, tanque Classe A); W (P – EVP, disponibilidade potencial de água); e T (temperatura média anual).

Segundo autores anteriormente citados, esta metodologia é válida para efetuar a comparação subjetiva das variáveis independentes das equações, por meio dos coeficientes das regressões, dos coeficientes beta, dos valores t e de suas estatísticas (coeficiente de determinação, R^2 ; coeficiente de determinação ajustado, \overline{R}^2 ; e erro-padrão da estimativa, S_{xy}). Admitiu-se como um modelo de regressão válido, se os coeficientes, os valores t e as estatísticas das equações obtidas em cada subamostra forem semelhantes aos da equação global. Além disto, de modo complementar, foram obtidas outras 28 subamostras aleatórias, por meio do mesmo procedimento descrito. O modelo (*mod.1*) foi ajustado para cada uma dessas subamostras, sendo a média dos coeficientes das 30 equações (28 + subamostra 1 + subamostra 2) comparada, subjetivamente, com os coeficientes do modelo global.

Um segundo método foi utilizado na validação do modelo. Testou-se a identidade entre valores de biomassa aérea estimados pela equação global e os valores médios observados para uma mesma região, aplicando-se o procedimento estatístico proposto por Leite e Oliveira (2002).

A curva de tendência de alocação de biomassa da copa (folha e galho) em relação à biomassa da parte aérea (folha, galho, casca e lenho), por árvore, em função da idade e independente da região, foi obtida ao utilizar o *distance-weighted least squares* do software Statistica

(STATSOFT, 1999). Esse procedimento utilizou um algoritmo que foi útil para identificar padrões de desenvolvimento de modelos quantitativos que contêm informações interpretativas sobre o fenômeno estudado.

Ao contrário de outros processos, este não ajustou uma função (polinomial, logarítmica etc.), que pode ser facilmente descrita por uma simples fórmula e 'plotada' independentemente dos dados. Esse método utiliza algoritmos mais complexos, da seguinte maneira: uma regressão polinomial de segunda ordem foi calculada para cada valor da variável X (idade), para determinar o correspondente valor Y (% copa). A influência dos pontos individuais sobre a regressão decresceu com sua distância de um valor particular de X . Como a soma das percentagens da copa (folhas + galhos) e do tronco (casca + lenho) é 100 %, conhecendo-se a curva de percentagem da copa, por diferença, tem-se a do tronco.

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para todas as regiões, foi obtida uma equação global, capaz de estimar a biomassa da parte aérea e do tronco, utilizando uma variável *Dummy*, a idade e algumas características climáticas de forma individualizada ou em combinação com outras (Quadro 2). As pressuposições estatísticas quanto à linearidade, homocedasticidade da variância, independência dos resíduos e normalidade foram satisfatórias.

Quadro 2 – Coeficientes e estatísticas do modelo global de produção (MG) e dos modelos das subamostras 1 (SB1) e 2 (SB2)
Table 2 – *Statistics and coefficients of global (MG) and sub samples models 1 (SB1) e 2 (SB2)*

Componente do modelo	MG	SB1	SB2	MG	SB1	SB2	MG	SB1	SB2
	Coeficiente da regressão			Coeficiente beta			Valor "t"		
<i>Intercepto</i>	3,05053	3,00334	3,10932	-	-	-	-10,14	-6,96	-7,41
<i>DX/ID</i>	-0,4898	-0,4499	-0,5255	-0,0776	-0,0699	-0,0847	-8,39	-5,26	-6,59
<i>LnID</i>	1,36552	1,37131	1,3629	0,7823	0,7799	0,7861	79,56	55,25	57,3
<i>LnW</i>	0,12029	0,12744	0,11285	0,3111	0,3323	0,2895	29,41	21,81	19,68
<i>LnT</i>	0,90513	0,89776	0,91542	0,1429	0,1412	0,1451	14,57	10,04	10,61
<i>LnPMS/LnP</i>	2,43264	2,33712	2,52709	0,1073	0,1027	0,1119	9,63	6,41	7,22
R^2	0,845	0,839	0,851	-	-	-	-	-	-
R^2 ajustado	0,844	0,838	0,850	-	-	-	-	-	-
Erro padrão da estimativa	0,3427	0,3493	0,3362	-	-	-	-	-	-

Todos os coeficientes das equações foram significativos a 1 % de probabilidade; *DX* (variável *Dummy* - $DX = 0$, para a estimativa da biomassa da parte aérea, ou $DX = 1$, para a estimativa da biomassa de tronco); *ID* (idade, ano); *W* (disponibilidade potencial de água, mm); *T* (temperatura média anual, °C); *P* (precipitação média anual, mm); e *PMS* (precipitação média acumulada nos seis meses secos, mm).
 $Biomassa$ (t/ha) = $e^{(-3,05053 - 0,4898 DX/ID + 1,3655 LnID + 0,1203 Ln(W+41) + 0,9051 LnT + 2,4326 LnPMS/LnP)}$ $R^2 = 0,845$

Ao comparar os resultados da equação global de produção com as equações obtidas para as subamostras 1 e 2, observou-se um alto nível de similaridade dos resultados em termos de R^2 , \bar{R}^2 , S_{xy} e entre os parâmetros (Quadro 2). Conforme sugerido por Hair et al. (1998), quando esta similaridade ocorre, conclui-se que os resultados são generalizáveis para a população e não específicos para a amostra utilizada na estimativa da equação, ou seja, pode-se aceitar a equação global de produção para diferentes regiões do Brasil, desde

que não sejam extrapoladas as amplitudes dos valores de cada variável independente utilizada.

O alto nível de significância ($P < 0,01$) dos coeficientes da equação global de produção foi mantido em todas as 30 equações, ajustadas com amostras aleatórias do banco de dados, e, ao compará-la com a média das demais equações, verificou-se que as diferenças foram inferiores a 0,5 %, para todos os coeficientes (Quadro 3). Tal fato é mais um indicativo da alta estabilidade do modelo e que os resultados são generalizáveis.

Quadro 3 – Coeficientes das equações de biomassa obtidas de várias subamostras utilizando o modelo global de produção
Table 3 – Estimated parameters and determination coefficient from random samples using the proposed model

Modelos	β_0	DX/ID	$LnID$	LnW	LnT	$LnPMS/LnP$	N	\bar{R}^2 *
1	-2,6109	-0,4950	1,3798	0,1283	0,8172	2,1466	971	0,844
2	-3,7688	-0,5181	1,3851	0,1177	1,0483	2,7450	935	0,838
3	-3,0033	-0,4499	1,3713	0,1274	0,8978	2,3371	968	0,838
4	-2,6875	-0,4886	1,3813	0,1262	0,9036	1,9207	951	0,851
5	-2,9152	-0,5108	1,3825	0,1248	0,9304	2,0935	927	0,850
6	-3,3292	-0,5057	1,3534	0,1239	0,9697	2,5371	959	0,838
7	-2,5165	-0,4720	1,3668	0,1271	0,8454	1,9500	984	0,845
8	-2,9939	-0,4775	1,3543	0,1092	0,8041	2,8315	943	0,850
9	-3,2106	-0,5401	1,3362	0,1163	0,8985	2,7450	938	0,837
10	-3,0692	-0,5186	1,3633	0,1169	0,9272	2,4219	958	0,842
11	-2,7581	-0,4795	1,3913	0,1256	0,8573	2,1774	973	0,845
12	-3,0300	-0,4901	1,3677	0,1177	0,8707	2,5718	1019	0,845
13	-2,5947	-0,4925	1,3376	0,1162	0,8092	2,3003	948	0,838
14	-2,7650	-0,4893	1,3965	0,1191	0,8670	2,1793	1001	0,853
15	-3,5071	-0,4894	1,3546	0,1119	0,9940	2,7331	955	0,845
16	-2,4486	-0,4592	1,3484	0,1231	0,7780	2,1953	991	0,850
17	-2,4370	-0,4485	1,3413	0,1304	0,7862	2,1270	927	0,834
18	-3,3543	-0,4896	1,3511	0,1147	0,9111	2,8503	975	0,837
19	-3,1997	-0,4681	1,3455	0,1148	0,8672	2,8508	999	0,838
20	-2,7858	-0,4750	1,3759	0,1162	0,8350	2,3747	967	0,850
21	-3,6402	-0,5094	1,3666	0,1138	0,9749	2,9403	942	0,834
22	-3,1732	-0,5062	1,3806	0,1317	1,0146	2,0757	983	0,839
23	-2,9166	-0,4459	1,3904	0,1241	0,9061	2,1860	988	0,850
24	-3,0245	-0,4620	1,3660	0,1229	0,8806	2,4522	968	0,845
25	-3,3547	-0,5021	1,3391	0,1154	0,9480	2,7213	953	0,844
26	-3,0624	-0,4884	1,3646	0,1230	0,9386	2,2803	907	0,840
27	-3,4973	-0,4911	1,3966	0,1247	0,9973	2,5616	978	0,851
28	-3,3404	-0,4986	1,3291	0,1217	0,9480	2,6851	925	0,834
29	-3,0033	-0,4499	1,3713	0,1274	0,8978	2,3371	968	0,838
30	-3,1093	-0,5255	1,3629	0,1129	0,9154	2,5271	958	0,851
E.P.	0,0636	0,0044	0,0034	0,0011	0,0125	0,0533	4,641	0,0011
Média	-3,03691	-0,48788	1,36502	0,12083	0,90129	2,42850	962	0,843
Modelo global	-3,05053	-0,48977	1,36552	0,12029	0,90513	2,43264	1926	0,844

β_0 (intercepto); DX (variável Dummy - $DX = 0$, para a estimativa da biomassa da parte aérea, ou $DX = 1$, para a estimativa da biomassa de tronco); ID (idade, anos); W (disponibilidade potencial de água, mm); T (temperatura média anual, °C); P (precipitação média anual, mm); e PMS (precipitação média acumulada nos seis meses secos, mm); N (N^0 de dados utilizadas em cada equação); Todas as estimativas dos parâmetros das equações, incluindo o intercepto, foram significativas ao nível de 1% de probabilidade; \bar{R}^2 * coeficiente de determinação ajustado; E.P. - Erro Padrão

Ao aplicar o método de validação de modelos proposto por Leite e Oliveira (2002) aos dados do Quadro 4, observou-se a igualdade estatística entre os valores observados e estimados, para seis das oito regiões avaliadas (Quadro 5). Na região de Guanhães e Itapeva, não foram observadas identidades entre os valores observados e os estimados. Por causa do caráter genérico do modelo e pelo fato de este trabalho ter sido realizado em nível de campo, abrangendo cinco Estados brasileiros, a existência de alguns desvios era esperada.

Todas as variáveis independentes utilizadas relacionaram positivamente com a biomassa da parte aérea, exceção foi observada para variável *Dummy* (Quadro 2). Assim, pode-se concluir que a biomassa aumentou com a idade, com a disponibilidade potencial de água, com a temperatura média anual e com o aumento da proporção da quantidade média de água disponível nos meses secos, em relação à precipitação anual.

Entretanto, a variável independente que mais influenciou a biomassa foi a idade, o que é observado pelo maior coeficiente beta.

Apesar da menor contribuição das demais variáveis independentes em relação à idade, o uso destas foi de fundamental importância para obter uma estimativa mais precisa da produtividade do eucalipto, para as diferentes regiões. Há, ainda, aproximadamente, 15 % da variação na biomassa de eucalipto que não é explicada pelas variações que compõem o modelo. Além da composição genética, outras características, como as edáficas e fisiográficas, podem ser responsáveis por este desvio. A despeito deste fato, o modelo fornece uma estimativa satisfatória da produção de biomassa potencial média de eucalipto em diferentes idades no Brasil, bastando para isto ter os dados climáticos constantes no modelo, dados estes que são facilmente obtidos em estações climatológicas.

Quadro 4 – Biomassa observada e estimada pelo uso da equação global, para eucalipto, em algumas regiões
Table 4 – Observed and estimated biomass of eucalypt by the proposed model for different regions

	Biomassa da parte aérea (t ha ⁻¹)										
	Idade (ano)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Três Marias – MG											
Observada	5,5	22,2	26,5	41,1	47,8	57,4	58,4	-	-	-	-
Estimada	5,3	13,6	23,6	34,9	47,4	60,8	75,0	-	-	-	-
Luiz Antônio – SP											
Observada	7,1	39,2	41,3	57,9	64,5	-	-	-	-	-	-
Estimada	7,8	20,0	34,8	51,5	69,9	-	-	-	-	-	-
Depressão Central – RS											
Observada	-	-	-	-	-	-	157,4	175,4	171,2	210,1	220,7
Estimada	-	-	-	-	-	-	148,5	178,2	209,3	241,6	275,2
Guanhães – MG											
Observada	4,7	28,3	50,5	103,3	-	136,0	196,5	-	-	-	-
Estimada	9,6	24,7	43,0	63,6	-	110,7	136,6	-	-	-	-
Bom Despacho – MG											
Observada	9,6	31,3	47,9	82,3	82,3	85,3	-	-	-	-	-
Estimada	9,0	23,2	40,4	59,8	81,1	104,1	-	-	-	-	-
Itapeva – SP											
Observada	8,7	41,7	77,7	108,1	-	172,4	-	-	-	-	-
Estimada	11,3	29,1	50,6	75,0	-	130,4	-	-	-	-	-
Litoral Norte – ES											
Observada	9,7	23,3	58,0	98,7	129,9	171,4	142,8	207,4	221,8	-	267,5
Estimada	11,2	28,9	50,2	74,4	100,9	129,4	159,7	191,7	225,2	-	296,1
São José dos Campos – SP											
Observada	6,0	-	55,3	144,9	-	109,1	212,1	-	-	-	-
Estimada	12,0	-	53,8	79,7	-	138,6	171,1	-	-	-	-

Quadro 5 – Resultados obtidos ao aplicar o teste de validação¹ aos dados observados (Y_j) e estimados (Y_j), em diferentes regiões

Table 5 – Observed (Y_j) and estimated (Y_j) results of the validation test¹ at different regions

Região	$r_{Y_j X_t}$ ²	\bar{e} ³	F(H ₀) ⁴	t _e ⁵	$r_{Y_j X_t} \geq (1 - \bar{e})$?	Conclusão
Três Marias – MG	0,964	0,051	1,24 ^{ns}	-0,65 ^{ns}	Sim	$Y_{-j} = X_{-1}$
Luiz Antônio – SP	0,927	-0,115	0,59 ^{ns}	-1,07 ^{ns}	Sim	$Y_{-j} = X_{-1}$
Depressão Central – RS	0,946	0,116	6,24 ^{ns}	1,96 ^{ns}	Sim	$Y_{-j} = X_{-1}$
Guanhães – MG	0,987	-0,019	34,31 ^{**}	-0,09 ^{ns}	Sim	$Y_{-j} \neq X_{-1}$
Bom Despacho – MG	0,928	-0,091	0,19 ^{ns}	-1,21 ^{ns}	Sim	$Y_{-j} = X_{-1}$
Itapeva – SP	0,994	-0,181	55,59 ^{**}	-1,49 ^{ns}	Sim	$Y_{-j} \neq X_{-1}$
Litoral Norte – ES	0,972	0,029	0,45 ^{ns}	-0,51 ^{ns}	Sim	$Y_{-j} = X_{-1}$
São José dos Campos – SP	0,882	0,120	1,30 ^{ns}	0,48 ^{ns}	Sim	$Y_{-j} = X_{-1}$

¹ Segundo LEITE e OLIVEIRA (2000), aplicados aos dados do Quadro 4; ² coeficiente de correlação; ³ erro médio; ⁴ F de Graybill; ⁵ teste t para o erro médio; e ** e ns, significativo e não-significativo a 1%

O R² de 0,85 obtido para a equação de biomassa (Quadro 2) pode ser considerado elevado em um modelo tão amplo. A mesma tendência foi observada por Hingston e Galbraith (1998), que verificaram que 89 e 85 % da variação de crescimento em diâmetro e em altura, respectivamente, de *Eucalyptus globulus*, na Austrália, ocorreram em virtude da idade e da precipitação média anual. Esses autores encontraram valores de incremento médio anual (IMA) de tronco de 5,1 t ha⁻¹ ano⁻¹ no sítio menos produtivo, aos seis anos de idade, até 25,9 t ha⁻¹ ano⁻¹ no melhor sítio, aos sete anos. No presente trabalho, considerando essas mesmas idades, foram obtidas 9,3 t ha⁻¹ ano⁻¹ na região de Três Marias – MG e 29,7 t ha⁻¹ ano⁻¹ em Monte Dourado – PA.

Ao analisar os dados do Quadro 4, observa-se que as produções de biomassa estimada continuam crescentes em todas as faixas de idade abrangidas. Tal observação é importante, pois as florestas de eucalipto no Brasil, na faixa de idade estudada, ainda não atingiram o ponto de máxima produção de biomassa. Isto sugere que o ciclo de corte entre 6 e 7 anos, como observado por Silva e Ribeiro (2006), ao avaliarem modelos matemáticos para determinar a rotação econômica, pode não ser a melhor alternativa para a sustentabilidade da produção do ecossistema. Decisões relacionadas ao crescimento da floresta podem ser substancialmente modificadas ao alterar o ciclo de corte. Entretanto, a definição do ponto de corte da floresta deve considerar características ecológicas do ecossistema dentro de um contexto econômico. Cromer e Williams (1982), ao avaliarem a produção de tronco de *E. globulus* até

a idade de 10 anos na Austrália, também observaram que até esta idade a curva de crescimento ainda encontrava-se na fase crescente.

O modelo evidenciou a importância da idade, da temperatura e da disponibilidade de água, nas diferentes regiões, na produção de biomassa. Os efeitos da idade sobre o aumento da biomassa são óbvios, embora não necessariamente sempre tão acentuados se um fator de crescimento for fortemente limitante, e não requerem maiores explicações.

As respostas às variações de temperatura são muito complexas (TAIZ e ZEIGER, 1998) e difíceis de serem isoladas na interpretação do modelo. Estes autores enfatizam que a temperatura afeta todas as reações bioquímicas da fotossíntese e que o seu valor ótimo para o crescimento vegetal pode variar de acordo com o ambiente em que a planta cresce, o que dificulta a estimativa do efeito da temperatura sobre o crescimento. Como observado no Quadro 1, a temperatura média anual variou de 14 a 26 °C, da Região Sul à Norte do Brasil. Quando se compara a produção de biomassa estimada do eucalipto cultivado na região da Timóteo - MG (148,5 t ha⁻¹ aos 7 anos) com a da região da Depressão Central – RS (149,9 t ha⁻¹ aos 7 anos), por exemplo, observa-se similaridade entre elas, apesar de a temperatura média entre ambas diferir em 7 °C, indicando que outros fatores compensam essa diferença.

Segundo Taiz e Zeiger (1998), as plantas podem realizar fotossíntese em diferentes faixas de temperatura e, também, passar significativo período de tempo

realizando este processo a temperaturas abaixo ou acima do ótimo, o que pode levar à limitação da produtividade. Esses resultados mostram a grande plasticidade de adaptação do eucalipto às diferentes condições de temperatura no Brasil, mantendo elevada produtividade se não houver limitação por outros fatores de crescimento, reforçando a afirmativa que nas regiões tropicais, água e nutrientes seriam os dois principais fatores a limitar a produção florestal (BARROS e COMERFORD, 2002).

A biomassa estimada variou bastante entre regiões. Ao comparar a biomassa da parte aérea entre a região de maior com a de menor produtividade, a diferença foi de 146 t ha⁻¹, ou três vezes, aos sete anos de idade. Conforme esperado, a produtividade foi menor nas regiões de menor disponibilidade de água. A região de Três Marias - MG apresentou a menor disponibilidade de água e a mais alta demanda evaporativa, ocasionando *deficits* hídricos e, conseqüentemente, redução da produtividade.

Existem muitos trabalhos na literatura que ilustram a influência do stress por falta de água causando redução na produção de biomassa em espécies de rápido crescimento (STAPE et al. 2004). Santana et al. (2002) observaram maior produtividade nas regiões de maior precipitação e menor déficit hídrico ao avaliarem a produção de biomassa de eucalipto em cinco regiões do estado de São Paulo. Reis et al. (2006), observaram maior crescimento em diâmetro e volume em híbridos de eucalipto submetidos à irrigação em relação à não irrigação. Segundo Jarvis e Leverenz (1983), a limitação por água reduz a eficiência de conversão de energia solar em biomassa ou reduz a quantidade de luz interceptada pela copa, devido à redução de área foliar, resultando em menor produtividade florestal. Mas o principal mecanismo responsável pelo menor crescimento observado nas regiões com maior restrição hídrica é o fechamento dos estômatos, que contribui para a manutenção da umidade com conseqüente redução na absorção de CO₂ (BLAKE e TSCHAPLINSKI, 1992).

Segundo estes autores, as árvores possuem vários mecanismos que ajudam a minimizar o efeito do estresse por falta de água. Observaram que o *E. grandis* reduz a condutância estomática e apresenta maior redução na transpiração do que na absorção de CO₂, ou seja, reduz a transpiração mais do que a fotossíntese, aumentando a eficiência de utilização de água. Esta é uma das razões para o eucalipto apresentar boa

produtividade em condições onde o estresse por falta de água não é muito pronunciado.

O conhecimento da alocação de biomassa florestal é importante para o entendimento dos processos de ciclagem de nutrientes e é essencial para definições das estratégias de manejo a serem adotadas, como a aplicação de fertilizantes e a intervenção por meio de desbaste. Observou-se que a distribuição relativa de biomassa da copa foi reduzida com o aumento da idade (Quadro 6) e, conseqüentemente, a do tronco aumentou.

O ponto de interseção entre a proporção de biomassa da copa e do tronco ocorreu à idade de um ano e quatro meses (Quadro 6). De modo geral, nessa idade ainda não se atingiu a fase de fechamento de copa, uma das mais importantes para o crescimento da floresta, pois a área foliar tende para o máximo e a demanda nutricional é elevada. Até essa fase, o ciclo geoquímico é mais importante, a demanda por nutrientes do solo é grande e, ainda, a ciclagem de nutrientes não contribui significativamente para atender à demanda da planta. O déficit de água ou nutrientes, nesse período, pode comprometer o crescimento futuro do povoamento.

Entre seis meses e três anos e seis meses de idade, observou-se uma forte queda na percentagem de copa. A partir de três anos e seis meses, a proporção de copa reduziu mais lentamente, até os cinco anos, tornando-se ainda mais estável a partir do sexto ano (Quadro 6).

Quadro 6 – Alocação relativa de biomassa média para a copa de eucalipto, estimada¹¹ em função da idade

Table 6 – Proportion of canopy to biomass of eucalypt plantations at different ages

Idade ano	Copa %	Idade ano	Copa %	Idade ano	Copa %	Idade ano	Copa %
0,50	73,0	3,00	20,0	5,75	9,2	8,50	7,3
0,75	65,5	3,25	17,7	6,00	9,0	8,75	7,3
1,00	58,0	3,50	15,6	6,25	8,5	9,00	7,3
1,25	52,4	3,75	14,5	6,50	8,3	9,25	7,3
1,34	50,0	4,00	13,0	6,75	8,3	9,50	7,3
1,50	42,2	4,25	12,3	7,00	8,0	9,75	7,3
1,75	40,5	4,50	11,4	7,25	8,0	10,00	7,3
2,00	35,3	4,75	10,8	7,50	7,5	10,25	7,3
2,25	30,3	5,00	10,4	7,75	7,5	10,50	7,5
2,50	26,0	5,25	10,0	8,00	7,5	10,75	7,7
2,75	23,0	5,50	10,0	8,25	7,3	11,00	7,7

¹¹ % de copa estimada conforme o procedimento *distance-weighted least squares*

Após a fase de fechamento de copas, grande parte da demanda nutricional para os nutrientes considerados móveis pode ser suprida pela ciclagem bioquímica (MILLER, 1995). Assim, espera-se que respostas a intervenções por meio de técnicas de manejo, como a fertilização, sejam maiores em idades mais jovens.

4. CONCLUSÃO

A equação obtida forneceu boas estimativas da produção de eucalipto no Brasil.

A inclusão das características climáticas no modelo foi fundamental para distinguir o acúmulo de biomassa entre as diferentes regiões. Essas características relacionaram-se positivamente com a produção de biomassa.

A produção de biomassa foi menor nas regiões com menor disponibilidade de água.

5. AGRADECIMENTOS

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos para realização deste trabalho.

À Universidade da Flórida (UFL), em particular ao Departamento de Solos e da Água, por possibilitar a realização deste trabalho na referida universidade.

Ao Programa de Pesquisa em Solos e Nutrição de Eucalipto do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, pela cessão dos dados utilizados neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- BARROS, N.F. e COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Folha de Viçosa, 2002. v.2. p.487-592.
- BLAKE, T.J.; TSCHAPLINSKI, T.J. Water relations. In: MITCHELL, J.B.; ROBERTSON, F.; HINCKLEY, T.; FORSSE, L.S. (Ed.). **Ecophysiology of short rotation forest crops**. New York, Elsevier Applied Science, 1992. p.66-94.
- CROMER, R.N.; WILLIAMS, E.R. Biomass and nutrient accumulation in a planted *E. globulus* (Labill.) fertilizer trial. **Australian Journal of Botany**, n.30, p.265-278, 1982.
- HAIR, J.J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAN, R.L.; WILLIAM, C.B. **Multivariate data analysis**. Fifth edition. New Jersey, Prentice-Hall Inc. 1998. 730p.
- HINGSTON F.J.; GALBRAITH J.H. Application of the process-based model BIOMASS to *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* plantations on ex-farmland in southwestern Australia II. Stemwood production and seasonal growth. **Forest Ecology and Management**, n.106, p.157-168, 1998.
- INMET. Instituto nacional de meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.br> 1999>. Acesso em: 15 de mar. 1999.
- JARVIS, P. G. Increasing productivity and value of temperate coniferous forest by manipulating site water balance. In: BALLARD, R.; FARNUM, P.; RITCHIE, G.A.; WINJUM, J.K. (Ed.). **Forest potentials-productivity and value**. Tacoma (USA), Proceedings Weyerhaeuser Sci. Symp.. 1985. p.39-74.
- JARVIS, P.G.; LEVERENZ, J.W. Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. **Encyclopedia of Plant Physiology** (New Series), n.12D, p.233-280, 1983.
- JOHNSTON, D.R.; GRAYSON, A.J.; BRADLEY, R.T. **Forest planning**. London, Faber and Faber. 1967. 541p.
- LEITE, H.G., OLIVEIRA, F.L.T. Statistical procedure to test the identity of analytical methods. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.33, issue 7 e 8, 2002.
- LINDER, S.; MCMURTRIE, R.E.; LANDSBERG, J.J. Global change impacts on managed forests. In: WALKER, B.; STEFFEN, W. (Ed.), **Global Change and Terrestrial Ecosystems**. Cambridge, IGBP Book Series N°2, Cambridge University Press, 1996. p.275-290.



- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Second Edition. San Diego, Academic Press Inc.. 1997. 889p.
- MILLER, H. G. The influence of stand development on nutrient demand, growth and allocation. **Plant and Soil**, n.168-169, p.225-232, 1995.
- PEREIRA, J.S.; MADEIRA, M.V.; LINDER, S.; ERICSSON, T.; TOMEÂ, M.; ARAUÂ J.M.C. Biomass production with optimised nutrition in *Eucalyptus globulus* plantations. In: PERIERA, J.S.; PEREIRA, H. (Ed.), **Eucalyptus for Biomass Production**. Brussels, Commission of the European Communities, p.13-30, 1994.
- RAISON, R.J.; MYERS, B.J.; BENSON, M.L. Dynamics of *Pinus radiata* foliage in relation to water and nitrogen stress I. Needle production and properties. **Forest Ecology and Management**, n.2, p.139-158, 1992.
- REIS, G.G.; REIS, M.G.F.; FONTAN, I.C.I.; MONTE, A.M.; GOMES, A.N.; OLIVEIRA, C.H.R. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus spp* submetidos a dois regimes de irrigação no campo. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.6, p. 921-931, 2006.
- SANTANA, R.C.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Eficiência nutricional e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.26, n.4, p. 447-457, 2002.
- SILVA, M.L.; RIBEIRO, C.A.Á.S. Estabelecimento de rotação econômica para uma floresta regulada. **Revista Árvore**, v.30, n.1, p.65-73, 2006.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; JACOB, W.S.; TAKAHASHI, E.N. A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential productivity in *Eucalyptus* plantations at landscape scales in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.223, p.358-362, 2006.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 17-31, 2004
- STATSOFT, INC. (1999). **Statistica for Windows** [Computer program manual]. Tulsa, OK: StatSoft, Inc., 2300 East 14th Street, Tulsa, OK 74104
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Second edition. Massachusetts, Publishers Sunderland, Sinauer Associates, Inc.. 1998. 792p.