

Equação de Volume Total, Volume Percentual e de Perfil do Tronco para *Eucalyptus globulus* Labill. em Portugal

Margarida Tomé*, José Tomé, Fernanda Ribeiro*** e Sónia Faias*****

*Professora Catedrática

**Professor Auxiliar

***Engenheira Florestal

Instituto Superior de Agronomia, Departamento de Engenharia Florestal, Tapada da Ajuda, 1349-017 LISBOA

Sumário. Apresentam-se equações para determinação do volume de árvores de *Eucalyptus globulus* Labill., passíveis de serem utilizadas em todo o país. Ajustaram-se três tipos de equações: equações de volume total, equações de volume percentual e equações de perfil do tronco. Em todos os tipos de equações referidos foram ajustadas equações para estimativas com e sem casca e para as equações de volume total e percentual foram também efectuados ajustamentos com e sem contabilização do volume do cepo. Foi ainda estudado o efeito da qualidade da estação, do regime de condução (alto-fuste ou talhadia), da densidade à plantação ou após a monda das varas das touças e das regiões climáticas, nas estimativas dos parâmetros dos modelos.

Palavras-chave: *Eucalyptus globulus* Labill.; equação de volume total; equação de volume percentual; equação de perfil do tronco

Total Volume, Volume Ratio and Taper Equation for *Eucalyptus globulus* Labill. in Portugal

Abstract. A total volume equation, ratio volume equations and a taper equation were fitted using data from trees of *Eucalyptus globulus* Labill. felled over much of its range in Portugal. The models for each type of equation were selected from several possible candidate functions using fit and predictive ability statistics. Data analysis showed no effect of stand density, site index and tree age on parameter values. However, climatic regions where the data came from had a significant impact on some of the parameter values of those equations. Some of them were also significantly different between data coming from stands in first rotation and from coppiced stands. The same selected functional forms for each type of equation were fitted to data inside and outside bark and for total and ratio volume equations, models for the estimation of volumes including or not stump volume were also fitted.

Key words: *Eucalyptus globulus* Labill.; total volume equation; ratio volume equation; taper equation

Équation du Volume du Tronc, du Pourcentage du Volume et du Défilement du Tronc pour l'*Eucalyptus globulus* Labill. au Portugal

Résumé. Ce travail présente trois types d'équations pour déterminer le volume de l'arbre du *Eucalyptus globulus* Labill.: l'équation du volume du tronc, l'équation de pourcentage du volume, l'équation de défilement du tronc (variation en diamètre de la tige). Ces équations ont été calibrées avec des données représentant l'ensemble de la superficie plantée en eucalyptus au Portugal. Deux versions du modèle sélectionné sont estimées pour chaque équation, avec et sans écorce. De plus, les équations du volume total et pourcentage du volume du tronc font l'objet d'une estimation, avec et sans la souche. Pour l'estimation des paramètres de ces modèles, l'effet des variables du peuplement et des conditions environnementales a été pris en compte.

Mots clés: *Eucalyptus globulus* Labill.; équation du volume du tronc; équation de pourcentage du volume; équation de défilement du tronc

Introdução

As plantações de eucalipto cobrem uma grande percentagem da área florestal de Portugal Continental, sendo a principal espécie encontrada a *Eucalyptus globulus* Labill.. Esta espécie é de grande importância para as indústrias de pasta de papel e papeleira, devido ao seu rápido crescimento e à qualidade das suas fibras. Os seus povoamentos são geridos de forma intensiva sob um regime de talhadia com rotações curtas.

É importante dispor de métodos para a determinação do volume de lenho existente num povoamento. Assim, foram desenvolvidas, para todo o país, equações para predição do volume total de lenho ou volume de lenho mercantil de árvores de *Eucalyptus globulus* Labill..

Estas equações, para avaliação do volume ao nível da árvore de eucalipto, apresentam vantagens quando comparadas com os modelos existentes, pois foram ajustadas com dados de todo o país, com uma representatividade razoável das regiões climáticas definidas por RIBEIRO e TOMÉ (2000) com áreas de eucalipto importantes. Testaram-se ainda as possíveis influências de factores climáticos através da localização do povoamento onde os dados foram

obtidos nas regiões acima referidas, da idade dos povoamentos, da sua densidade e da qualidade da estação nas estimativas dos parâmetros dos modelos.

Material e métodos*Dados*

Os dados utilizados no desenvolvimento das equações, para determinação do volume de árvores de eucalipto, são provenientes do abate de árvores em ensaios, parcelas permanentes e parcelas de inventário contínuo das empresas de celulose.

A cubagem rigorosa das árvores foi realizada considerando cada uma das porções da árvore como formas geométricas aproximadas: o cepoⁱ foi cubado como um cilindro, a bicada como um cone e cada uma das secções intermédias como um parabolóide ordinário de acordo com a fórmula de Smalian. Foram também calculados os volumes mercantis, com e sem casca, considerando diâmetros de despona entre 5 e 10 cm.

Os dados disponíveis foram verificados com o objectivo de eliminar erros grosseiros de medição e/ou de digitação.

Em seguida, constituíram-se dois conjuntos de dados: um com 3945 observações ao nível da árvore, a ser utilizado no ajustamento de equações de volume total; e o outro com 47880 observações ao nível das secções de cubagem (ou toros), para ajustamento de equações de perfil do tronco e de volume percentual.

Nos Quadros 1 e 2 caracterizam-se sumariamente, para povoamentos em alto-fuste e talhadia, respectivamente, e por região climática de acordo com a zonagem proposta por RIBEIRO e TOMÉ (2000), o conjunto de dados utilizado no desenvolvimento das equações de volume total.

Quadro 1 - Caracterização do conjunto de dados utilizado no desenvolvimento das equações de volume total (1ª rotação)

Variável	REGIÃO							
	Norte Litoral	Norte Centro	Centro Litoral	Sul Litoral	Norte Interior	Vale do Tejo	Sul Interior	Vale do Douro
Nº de Árvores	150	230	1641	124	37	192	19	-
A								
Min	8,7	7,0	5,0	8,0	9,0	7,0	9,0	
Média	8,7	9,2	14,0	9,6	9,6	9,8	9,0	
Max	8,7	12,0	35,0	10,0	11,0	11,0	9,0	
Iqe								
Min	25,9	18,4	10,1	10,3	11,4	11,9	11,6	
Média	26,4	21,1	20,0	17,3	16,4	15,7	12,7	
Max	27,1	23,5	30,3	19,3	23,5	26,3	13,7	
N								
Min	1111	1075	500	875	1100	925	975	
Média	2722	1170	1891	1107	1246	1351	1188	
Max	5000	1325	2841	1425	1550	1750	1425	
d								
Min	4,65	4,90	3,20	5,75	5,85	5,35	7,80	
Média	13,17	14,47	14,84	13,59	13,12	11,02	11,40	
Max	23,60	28,00	31,30	22,25	23,80	26,3	15,50	
h								
Min	9,85	6,50	4,30	5,76	6,78	6,28	9,69	
Média	20,24	17,85	19,02	16,00	14,60	25,53	12,16	
Max	28,58	29,20	36,25	24,00	21,80	12,52	17,40	

A - idade da árvore (anos); Iqe - índice de qualidade da estação (m), definido como a altura dominante do povoamento aos 10 anos estimada com o modelo GLOBULUS 2.1 (TOMÉ *et. al.*, 2001); N - número de árvores à plantação; d - diâmetro com casca a 1,30 m do solo (cm); h - altura total da árvore (m)

Quadro 2 - Caracterização do conjunto de dados utilizado no desenvolvimento das equações de volume total (talhadia)*

Variável	REGIÃO							
	Norte Litoral	Norte Centro	Centro Litoral	Sul Litoral	Norte Interior	Vale do Tejo	Sul Interior	Vale do Douro
Nº de Árvores	-	327	1096	30	-	99	-	-
A								
Min		9,0	1,0	10,0		4,0		
Média		9,3	10,8	10,0		9,1		
Max		11,0	17,5	10,0		10,0		
Iqe								
Min		19,0	17,0	13,3		12,4		
Média		21,0	21,2	14,9		14,8		
Max		23,3	27,1	16,9		19,9		
N								
Min		2000	1379	1600		1200		
Média		2402	2025	1725		1577		
Max		2850	2532	1925		2200		
d								
Min		3,50	0,60	6,30		5,00		
Média		10,97	10,74	10,14		9,08		
Max		25,10	28,80	17,10		15,20		
h								
Min		6,05	1,65	11,65		6,37		
Média		16,37	16,10	14,97		11,60		
Max		25,60	33,17	20,90		18,06		

*Os símbolos têm o significado referido no quadro anterior, com excepção de N, que significa o número de varas por ha após a monda das touças

Modelos testados

Para a determinação do volume de árvores e conforme o objectivo, pode-se recorrer a vários tipos de equações.

As equações de volume total (EVT) predizem o volume com ou sem casca (incluindo ou não o volume do cepo) em função, habitualmente, do diâmetro à altura do peito (d) e da altura da árvore (h).

As equações de volume percentual (EVP) permitem estimar a proporção do volume total (r) abaixo de um determinado diâmetro de despona (d_i) ou altura mercantil (h_i) pretendidos.

Assim, a utilização de equações de volume percentual, em conjugação com uma EVT, permitem obter estimativas bastante precisas do volume de lenho existente entre dois quaisquer níveis no tronco, definidos por um par de diâmetros ou alturas acima do solo.

As equações do perfil do tronco (EPT) permitem estimar diâmetros ao longo do tronco (d_i) em função do diâmetro à altura do peito e da altura da árvore (TOMÉ, 1990). Por integração de uma equação de perfil do tronco entre dois níveis de altura na árvore, podemos determinar o volume de lenho compreendido entre essas duas secções.

Numa fase inicial, seleccionaram-se da bibliografia, para cada um dos tipos de equações, um conjunto de modelos candidatos, que constam do Quadro 3.

Com a finalidade de assegurar a aplicabilidade extensiva das equações ajustadas, testou-se, de acordo com a metodologia à frente descrita, a influência da idade do povoamento, da rotação, da densidade à plantação ou após a monda das varas nas talhadias, do índice da qualidade da estação e das regiões climaticamente homogêneas

definidas por RIBEIRO e TOMÉ (2000).

Todas as equações seleccionadas foram ajustadas para estimação de volumes com e sem casca, sendo, sempre que se considere necessário, as variáveis acompanhadas pela designação cc e sc, respectivamente. Além disso, as equações de volume total e percentual terão outras duas variantes: uma primeira em que é quantificado o volume do cepo, e uma segunda, em que o cepo não é incluído, para determinação do volume do tronco potencialmente utilizável.

Quadro 3 - Modelos candidatos seleccionados

Referência	Função	
Equações de volume total		
EVT1	$v = \beta_1 d^{\beta_2} h^{\beta_3}$	SCHUMACHER e HALL, 1933
EVT2	$v = \beta_1 + \beta_2(d^2h)$	SPURR, 1952
EVT3	$v = \beta_1(d^2h)^{\beta_2}$	SPURR, 1952
EVT4	$v = \beta_1 + \beta_2(d^2h) + \beta_3(dh^2)$	TOMÉ, 1990
Equações de volume percentual		
- função do diâmetro (di)		
EVPD1	$r = e^{-\beta_1 \left(\frac{d_i}{d}\right)^{\beta_2}}$	DEUSEN <i>et al.</i> , 1981
EVPD2	$r = e^{-\beta_1 \left(\frac{d_i^{\beta_2}}{d^{\beta_3}}\right)}$	PARRESOL, 1987
- função da altura (hi)		
EVPH1	$r = 1 + \beta_1 \frac{(h - h_i)^{\beta_2}}{h^{\beta_3}}$	CAO <i>et al.</i> , 1980
Equações do perfil do tronco		
EPT1	$d_i = d \left[\frac{\beta_1 (h - h_i)^{\beta_2}}{\beta_3 h^{\beta_2 + 1} + \beta_4 h^{\beta_2}} \right]$	DEMAERSCHALK, 1973
EPT2	$d_i = d \left[\frac{1}{\beta_1 + \beta_2 \ln(1 - (h_i / h)^{\beta_3})} \frac{-\beta_1}{(1 - e^{-\beta_2})} \right]$	BIGING, 1984
EPT3	$d_i = d \left[\beta_1 \left(\frac{h_i}{h} - 1\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i^2}{h^2} - 1\right) \right]^{0.5}$	KOZACK, 1969

d - diâmetro a 1.30 m de altura em cm; d_i - diâmetro de desponta em cm; h - altura total em m; h_i - altura de desponta em m; v - volume total em m³; r - percentagem do volume total; β₁, β₂, β₃ - parâmetros do modelo

Ajustamento e validação

O ajustamento dos modelos foi feito recorrendo aos procedimentos PROC NLIN e PROC REG do SAS para os modelos não lineares e lineares, respectivamente.

Numa fase inicial, estudou-se a possível influência das variáveis densidade à plantação ou densidade das varas após a monda na talhadia, índice de qualidade da estação, idade e rotação, com os dados provenientes da região Centro Litoral (3CL), tal como definida por RIBEIRO e TOMÉ (2000), por ser aquela região com maior número de dados e maior representatividade em termos daquelas variáveis. Limitámo-nos a trabalhar nesta fase apenas com a versão dos modelos para a previsão das variáveis resposta com casca e, exceptuando obviamente o caso das EPT, englobando o volume do cepo. Esta análise, apresentada em TOMÉ *et al.* (2001), levou-nos a considerar apenas o efeito da rotação e a testar de seguida o efeito da região. O efeito da rotação foi estudado através de uma variável indicatriz binária (rot), que assumiu o valor zero se o povoamento de onde provinha a árvore se encontrasse na primeira rotação e o valor um se estivesse em regime de talhadia.

As regiões climáticas foram codificadas com base numa estrutura hierárquica das regiões, recorrendo a variáveis qualitativas binárias, tal como definidas e designadas em RIBEIRO e TOMÉ (2000). No entanto, só se recorreu às variáveis reg1, reg2, reg3 e reg5. A não utilização das outras variáveis significa que não se usou a resolução espacial mais fina na definição das regiões, o que se justifica pelo pequeno conjunto ou mesmo ausência de dados provenientes

de algumas delas (quadro 1).

Utilizando a totalidade dos dados procedeu-se ao ajustamento dos modelos de EVT candidatos na sua variante com casca e incluindo o volume do cepo. Para cada modelo considerou-se o modelo simples ao qual se adicionaram as variáveis qualitativas associadas à rotação e as variáveis qualitativas associadas às regiões, que foram adicionadas sequencialmente de acordo com a sua estrutura hierárquica. Os parâmetros das EVT foram expressos como combinações lineares daquelas variáveis qualitativas associadas às regiões e só foram considerados os coeficientes destas variáveis indicatrizes cujo intervalo de confiança ao nível de 5% ou, no caso dos modelos não lineares, o intervalo assintótico de confiança, não continha o valor zero. O modelo final foi seleccionado por avaliação da capacidade preditiva dos modelos que atingiram esta fase, recorrendo aos resíduos PRESS, dados por $e_{i,-i} = y_i - \hat{y}_{i,-i}$, onde y_i é a observação i ($i=1, \dots, n$) da variável resposta do modelo de regressão e $\hat{y}_{i,-i}$ é o valor estimado pelo modelo quando ajustado sem aquela observação.

Calcularam-se os valores das seguintes estatísticas para avaliar a eficiência do modelo, assim como o seu enviesamento e precisão:

- eficiência de modelação ou proporção da variação explicada pelo modelo

$$ef. mod. = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_{i,-i}^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i,-i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

onde \bar{y} é o valor médio dos valores observados da variável resposta.

A eficiência de modelação deve ser próxima de 1.

- média dos resíduos PRESS, a qual avalia o enviesamento dos modelos

$$Mr_{PRESS} = \frac{\sum_{i=1}^n e_{i,-i}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i,-i})}{n}$$

A média dos resíduos PRESS deve ser próxima de zero.

- média do valor absoluto dos resíduos PRESS, a qual avalia a precisão dos modelos

$$MAR_{PRESS} = \frac{\sum_{i=1}^n |e_{i,-i}|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_{i,-i}|}{n}$$

A média do valor absoluto dos resíduos PRESS deve ser pequena.

- Estatísticas descritivas de localização: percentis 99 (P99), 95 (P95), 5 (P5) e 1 (P1).

Estes percentis dão-nos uma ideia da grandeza e distribuição dos resíduos de predição.

Recorreu-se ainda à análise gráfica das médias dos resíduos PRESS e dos respectivos valores absolutos em função da região, que permitem detectar enviesamento e/ou falta de precisão e, deste modo, dão a indicação sobre a necessidade de ajustar modelos específicos para cada região. O modelo final foi seleccionado tendo em conta os resultados obtidos nos diversos critérios explicados.

O modelo escolhido foi posteriormente reajustado para predição do volume sem casca, com e sem volume do cepo e para a variante sem casca e sem cepo.

Para predição da razão (r) entre o volume mercantil e o volume total, foram ajustados dois tipos de equações, uma em que a razão é expressa em função do diâmetro de despona d_i (EVPD), e outra em função da altura h_i (EVPH).

A fim de garantir um valor de $r=1$, quando se considera um diâmetro de despona zero ou uma altura de despona igual à altura total, utilizou-se na formulação para cada uma das equações referidas, a razão entre o volume mercantil com casca e sem cepo e o volume total com casca e sem cepo, ou

seja: $r = \frac{v_i - v_{cepo}}{v - v_{cepo}}$, onde v_i é o volume

mercantil, v o volume total e v_{cepo} o volume do cepo. O processo de selecção foi em tudo idêntico ao referido para as EVT, trabalhando apenas com os modelos de predição do volume com casca e sem cepo, que depois de seleccionado o modelo final foi reajustado na sua versão para estimativa do volume sem casca e sem cepo.

Todo o processo descrito foi repetido para as EPT, trabalhando-se na selecção do modelo com os dados com casca, e uma vez escolhido o modelo, procedeu-se ao seu ajustamento com os dados sem casca.

Na última fase, os ajustamentos dos modelos seleccionados foram feitos com recurso a regressão ponderada com o estimador de Huber, (MEYERS, 1986) sempre que os resíduos studentizados apresentassem uma distribuição não normal, devido à existência de "pontas pesadas".

Resultados e discussão

Equações de volume total (EVT)

No ajustamento das equações de volume total, na sua variante com casca e incluindo o cepo, primeiro ajustaram-se os modelos na forma constante do Quadro 3, adicionando-se depois e sequencialmente, a rotação e o efeito das regiões, expresso com base nas variáveis

indicatrizes definidas por RIBEIRO e TOMÉ (2000).

No Quadro 4, apresenta-se o resultado do ajustamento dos modelos candidatos na sua versão com casca e com cepo. A função que apresenta melhores qualidades de ajustamento é o modelo EVT1. A função EVT4, apesar de apresentar boas potencialidades ao nível do ajustamento, não foi considerada para consideração posterior, em virtude de problemas de multicolinearidade, avaliada através dos factores de inflação da variância. As funções EVT2 e EVT3, são aquelas que apresentaram piores características em termos de qualidade de ajustamento.

Na fase de validação, a função EVT1 foi testada na sua formulação mais complexa, com inclusão das variáveis rot, reg1, reg2, reg3 e reg5, considerando apenas os efeitos da rotação e da variável

reg1, que divide entre o Norte e o Sul do país, e na sua forma simples sem qualquer inclusão dos efeitos das regiões ou rotação. No Quadro 5 encontram-se as medidas de precisão e enviesamento para estas variantes do modelo.

Analisando as variantes do modelo EVT1, conclui-se que a sua formulação mais complexa é a mais precisa e o modelo simples o menos enviesado, mas as diferenças em termos de precisão e enviesamento não são muito nítidas. Nas Figuras 1 e 2 apresenta-se a distribuição dos resíduos de predição e resíduos de predição em valor absoluto por região e rotação, considerando as diferentes formulações do modelo EVT1. A análise destas figuras confirma não existirem vantagens, em termos preditivos, em adoptar uma equação de volume total diferenciada por região ou rotação.

Quadro 4 - Estatísticas de ajustamento para as equações de volume total com casca incluindo o cepo, utilizando conjunto total de dados (n=3 945)

Variante	Variáveis Indicatrizes no Modelo *					
	Simple	rot	rot,reg1	rot,reg1,reg2	rot,reg1,reg2,reg3	rot,reg1,reg3,reg5
Função EVT1						
SQR**	740740	739734	732957	731590	716489	713428
R ² ***	0,992	0,992	0,992	0,993	0,993	0,993
Função EVT2						
SQR	871560	866568	862822	862076	841040	840110
R ²	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991
Função EVT3						
SQR	785249	782917	781730	781536	772938	771340
R ²	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992
Função EVT4						
SQR	789542	782659	769094	766923	737663	735176
R ²	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992

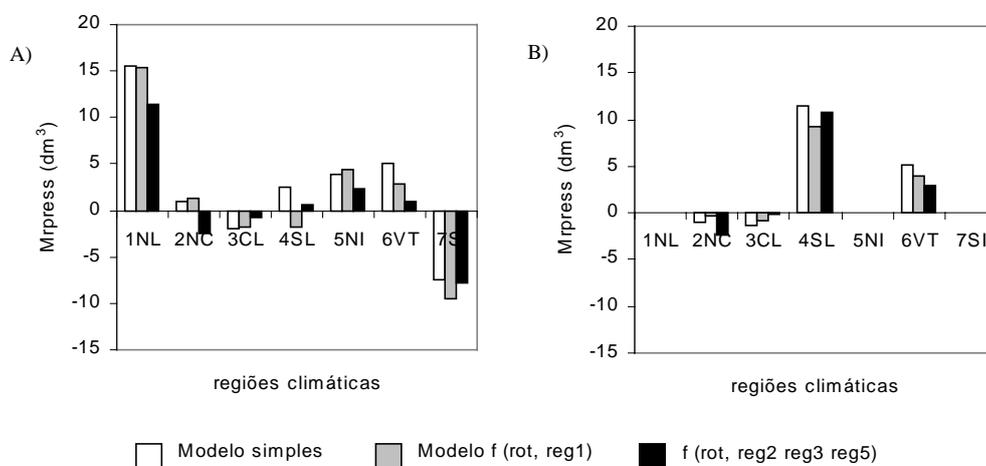
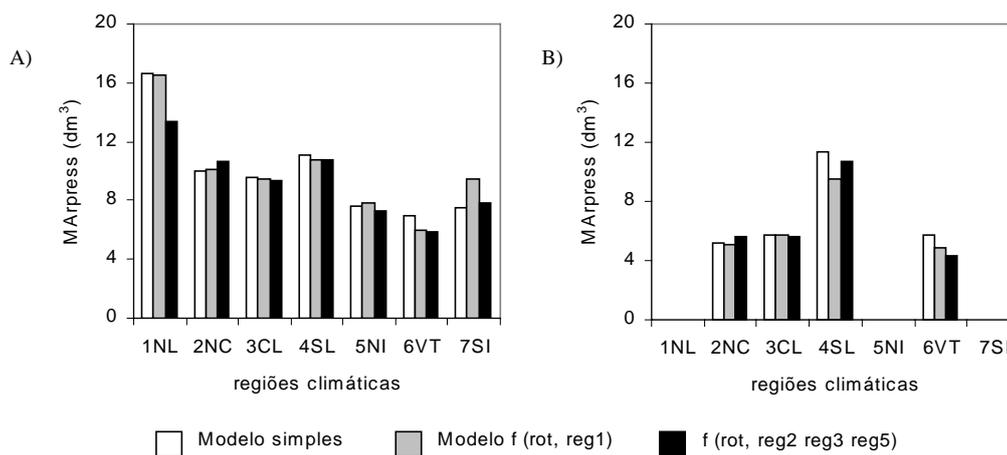
* Veja-se TOMÉ *et al.* (2001) para especificação de parâmetro ou parâmetros como funções lineares destas variáveis.

** Soma dos quadrados dos desvios residual

*** Os valores de R² aqui referidos, e em todas as equações subsequentes, são baseados na soma dos quadrados dos desvios total (SQT) e calculados como (SQT-SQR)/SQT.

Quadro 5 - Valor das estatísticas de validação das variantes do modelo EVT1 para a estimação do volume total com casca, incluindo o cepo e r_{press} em dm^3 . (n=3 945)

Variante Modelo	Mr_{press}	MAr_{press}	P99	P95	P5	P1	ef.mod.
simples	-0,0033	8,2336	41,9522	20,9185	-19,3914	-36,9245	0,9922
rot, reg1	-0,0774	8,1206	41,7892	20,9684	-19,1793	-37,6748	0,9923
rot, reg1 reg2, reg3 reg5	-0,0615	7,9842	40,6613	20,5019	-19,0705	-37,9015	0,9924

**Figura 1** - Média dos resíduos PRESS para várias formulações do modelo EVT1 com casca e com cepo, por região e para 1ª rotação (A) e talhadia (B)**Figura 2** - Média dos resíduos PRESS em valor absoluto para várias formulações do modelo EVT1 com casca e com cepo, por região e para 1ª rotação (A) e talhadia (B)

Assim, para estimação do volume total foi seleccionado o modelo alométrico simples, o qual foi ajustado para as predições com casca e sem casca, e para as variantes com e sem cepo. As equações ajustadas apresentam-se no Quadro 9.

Equações de volume percentual (EVP)

No Quadro 3, a equação de volume percentual em função do diâmetro de desponta (EVPD) apresenta dois modelos candidatos. No entanto, o modelo EVPD1 quando ajustado, considerando $d_i = d_{ap}$ como limite de desponta, tende a estimar volumes percentuais constantes ($r = \exp(\beta_1)$), independentemente das dimensões da árvore.

Assim, ajustaram-se os modelos EVPD2 e EVPDH1, na sua variante com casca e sem cepo, adicionando-se gradualmente o efeito da rotação e região. Passaram à fase de validação, em

ambos os modelos, a formulação mais simples, a formulação com o efeito da rotação e da indicatriz reg1 e a forma mais complexa.

A análise dos Quadros 6 e 7 revela não existirem diferenças nítidas entre os modelos na sua formulação simples e naquelas que consideram o efeito da rotação e das regiões climáticas. Os acréscimos em precisão são mínimos nos modelos com maior complexidade e em termos de enviesamento não existem quaisquer diferenças.

Nas Figuras 3 a 6 apresentam-se a média dos resíduos de predição e a média dos resíduos de predição em valor absoluto por região climática e rotação.

Analisando as Figuras 3 e 4, verifica-se que as diferenças em termos de precisão e enviesamento são tão pequenas que não se justifica a utilização de equações de volume percentual em função do diâmetro que considerem o efeito da região.

Quadro 6 - Valor das estatísticas de validação das várias formulações do modelo EVPD2 com casca e sem cepo e r_{press} em dm^3 . (n=42 562)

Variantes Modelo	Mr_{press}	MAr_{press}	P99	P95	P5	P1	ef. mod.
simples	-0,003402	0,029499	0,13622	0,074358	-0,07225	-0,11482	0,9735
rot, reg1	-0,003412	0,028571	0,12739	0,071808	-0,06947	-0,11371	0,9752
rot, reg1, reg2, reg3	-0,003359	0,028310	0,12731	0,071518	-0,06841	-0,11096	0,9757

Quadro 7 - Valor das estatísticas de validação das várias formulações do modelo EVPH1 com casca e sem cepo e r_{press} em dm^3 . (n=42 562)

Variantes Modelo	Mr_{press}	MAr_{press}	P99	P95	P5	P1	ef. mod.
simples	-0,000269	0,014003	0,074122	0,035632	-0,03168	-0,04986	0,99392
rot, reg1	0,000171	0,013118	0,066537	0,032543	-0,03023	-0,04808	0,99486
rot, reg1, reg2, reg3	0,000301	0,012559	0,060913	0,030731	-0,02878	-0,04624	0,99538

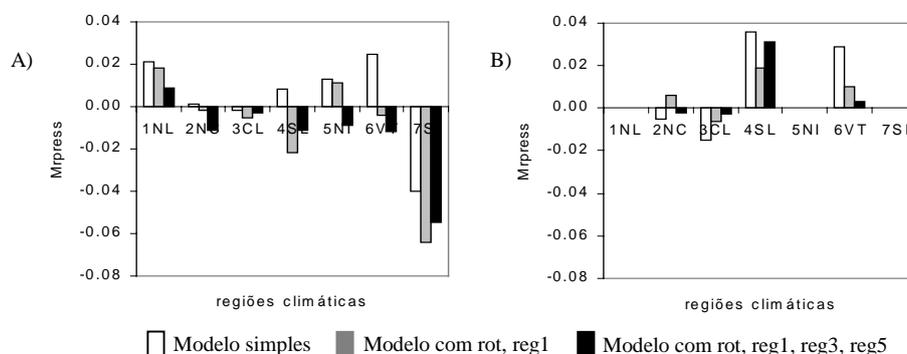


Figura 3 - Média dos resíduos PRESS para várias formulações do modelo EVPD2 com casca e sem cepo por região e para 1ª rotação (A) e talhadia (B)

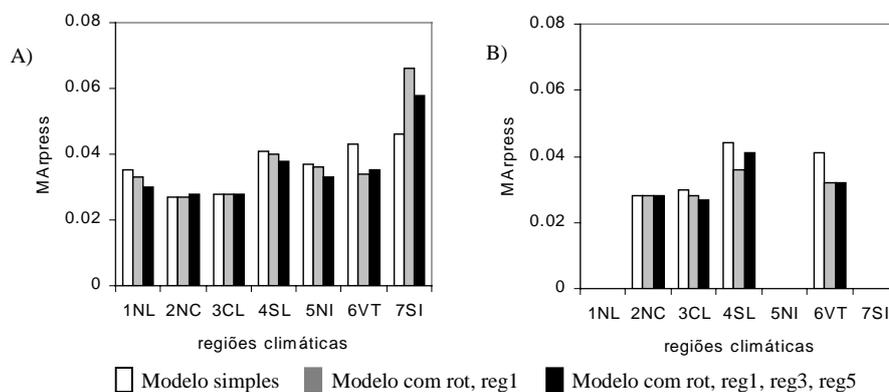


Figura 4 - Média dos resíduos PRESS em valor absoluto para várias formulações do modelo EVPD2 com casca e sem cepo por região e para 1ª rotação (A) e talhadia (B)

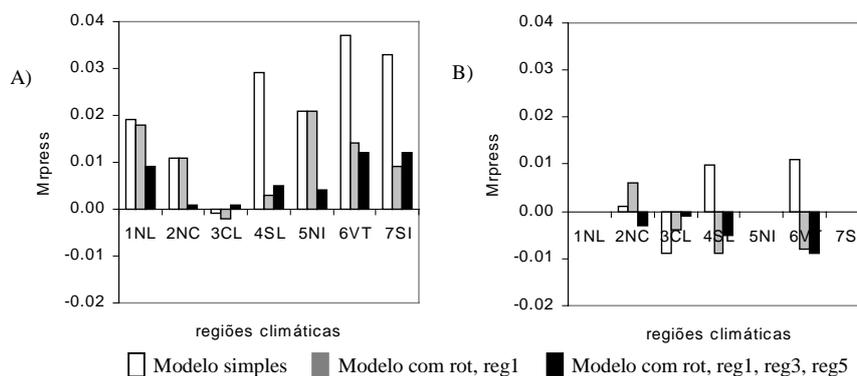


Figura 5 - Média dos resíduos PRESS para várias formulações do modelo EVPH1 com casca e com cepo por região e para 1ª rotação (A) e talhadia (B)

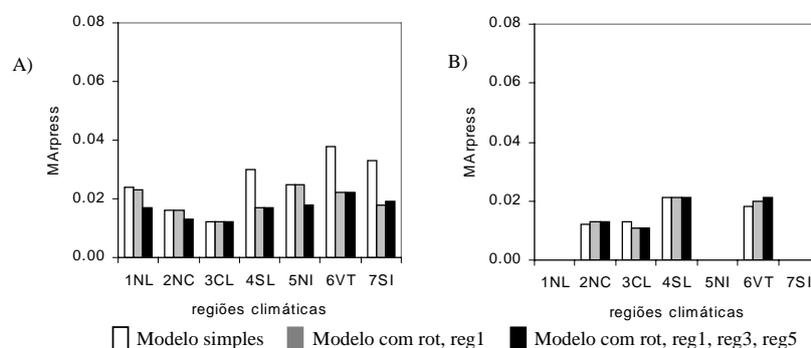


Figura 6 - Média dos resíduos PRESS em valor absoluto para várias formulações do modelo EVPH1 com casca e com cepo por região e para 1ª rotação (A) e talhadia (B)

Para as variantes do modelo EVPH1, a observação das Figuras 5 e 6 sugere que a utilização de um modelo simples parece desadequada quando consideramos as regiões 4SL, 6VT e 7SI, especialmente nos povoamentos em 1ª rotação. Nesta categoria de modelos, o modelo que inclui as variáveis indicatrizes *rot* e *reg1* parece ser aquele que apresenta maior constância da sua capacidade preditiva quando aplicado às diferentes regiões climáticas. A parametrização das variantes com casca e sem cepo, e sem casca e sem cepo, para as equações de volume percentual seleccionadas, encontra-se no Quadro 9.

Equações do perfil do tronco (EPT)

Dos modelos candidatos apresentados no quadro 3, não se conseguiu a convergência da equação EPT1 quando ajustada ao conjunto de dados, enquanto que a equação EPT2 apresentou um melhor ajustamento em relação à EPT3, na sua variante para estimar diâmetros com casca. Tal como anteriormente, passaram para a fase de validação a formulação simples, a formulação com o efeito das variáveis *rot* e *reg1* e a formulação com maior complexidade

com o efeito das variáveis *rot* e região *reg1*, *reg2*, *reg3* e *reg5*. Os resultados da validação encontram-se no Quadro 8.

Nas Figuras 7 e 8, pode observar-se a média dos resíduos de predição e a média em valor absoluto dos resíduos de predição, respectivamente.

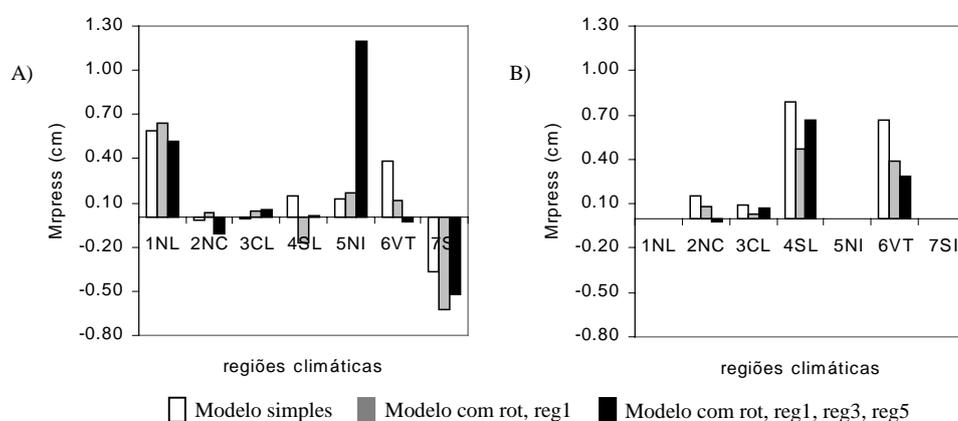
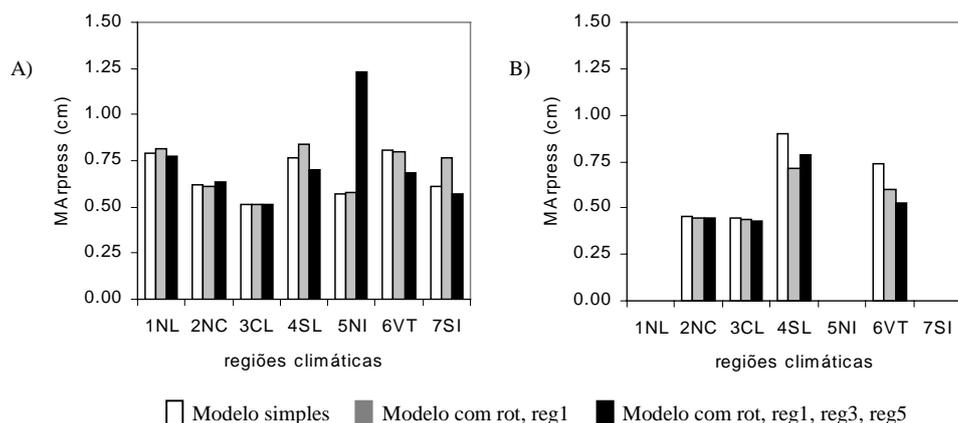
A análise destas figuras e do Quadro 8 sugere não existirem diferenças nítidas entre as várias formulações do modelo EPT2 para a maior parte das regiões, embora o modelo mais complexo tenha, em algumas regiões, um comportamento pior. O comportamento das outras versões é semelhante, embora com ligeira superioridade, pouco importante em termos práticos, do modelo que inclui as variáveis *rot* e *reg1*. Assim, considera-se como modelo final a sua formulação simples. No Quadro 9, apresenta-se a parametrização da equação de perfil do tronco seleccionada nas suas variantes com e sem casca.

Conclusões

No Quadro 9 apresenta-se o conjunto final de equações para avaliação do volume de lenho da árvore em eucaliptos desenvolvidas neste trabalho.

Quadro 8 - Valor das estatísticas de validação das várias formulações do modelo EPT2 com casca e r_{press} em cm (n= 47 880)

Variantes Modelo	Mr_{press}	MAr_{press}	P99	P95	P5	P1	ef.mo.
simples	0,071616	0,522299	2,50626	1,12915	-1,14589	-1,97743	0,98354
rot, reg1	0,063998	0,51967	2,41080	1,12952	-1,14627	-1,98421	0,98380
rot, reg1, reg2, reg3, reg5	0,063865	0,51462	2,33041	1,14011	-1,12398	-1,92723	0,98439

**Figura 7** - Média dos resíduos PRESS para várias formulações do modelo EPT2 com casca por região e para 1ª rotação (A) e talhadia (B)**Figura 8** - Média dos resíduos PRESS em valor absoluto para várias formulações do modelo EPT2 com casca por região e para 1ª rotação (A) e talhadia (B)

Quadro 9 - Equações seleccionadas para avaliação do volume das árvores de eucaliptos para cada um dos tipos de modelos considerados

Expressão matemática		Variante
<u>Equações de volume total</u>		
$v = 0,2105 (d / 100)^{1,8191} h^{1,0703}$		- com casca e com cepo
$vu = 0,1311 (d / 100)^{1,7866} h^{1,1451}$		- sem casca e com cepo
$v_st = 0,1984 (d / 100)^{1,8159} h^{1,0827}$		- com casca e sem cepo
$vu_st = 0,1241 (d / 100)^{1,7829} h^{1,1564}$		- sem casca e sem cepo
<u>Equações de volume percentual em função do diâmetro</u>		
$v_st \times r$	$r = e^{-0,5649 \left(\frac{d_i^{4,7073}}{d^{4,3313}} \right)}$	- com casca e sem cepo
$vu_st \times r$	$r = e^{-0,6022 \left(\frac{d_i^{4,7767}}{d^{4,4125}} \right)}$	- sem casca e sem cepo
<u>Equações de volume percentual em função da altura</u>		
$v_st \times r$	$r = 1 + \left[(-0,7398 - 0,0137 \text{ rot} - 0,0831 \text{ reg1}) \frac{(h - h_i)^{2,4157}}{h^{2,3578}} \right]$	- com casca e sem cepo
$vu_st \times r$	$r = 1 + \left[(-0,7819 - 0,0155 \text{ rot} - 0,0794 \text{ reg1}) \frac{(h - h_i)^{2,4157}}{h^{2,3578}} \right]$	- sem casca e sem cepo
<u>Equações de perfil do tronco</u>		
$d_i = d \left[1,4409 + 0,3535 \ln(1 - (h_i / h)^{\frac{1}{2,7840}} (1 - e^{\frac{-1,4409}{0,3535}})) \right]$		- com casca
$d_i = d \left[1,0988 + 0,3869 \ln(1 - (h_i / h)^{\frac{1}{2,8461}} (1 - e^{\frac{-1,0988}{0,3869}})) \right]$		- sem casca

d - diâmetro a 1,30 m de altura (cm); d_i - diâmetro de despona (cm); h - altura total (m); h_i - altura de despona (m); v - volume total com casca e com cepo (m^3); vu - volume total sem casca e com cepo (m^3); v_st - volume total com casca e sem cepo (m^3); vu_st - volume total sem casca e sem cepo (m^3); vst - volume do cepo com casca (m^3); vust - volume do cepo sem casca (m^3); r - percentagem do volume totalⁱⁱ; rot - rotação; reg1 - variavel indicatriz que separa as zonas a Norte e a Sul do Tejo (RIBEIRO e TOMÉ, 2000)

Agradecimentos

Este artigo resulta do trabalho desenvolvido no âmbito do projecto de investigação PAMAF 4026 - *Desenvolvimento de um sistema de apoio à avaliação da madeira em pé em povoamentos de eucalipto.*

Bibliografia

- BIGING, G.S., 1984. Taper Equations for Second Growth Mixed Conifers of Northern California. *For. Sci.* **30** : 1103-1117.
- CAO, Q.V., BURKHART, H.E., MAX T.A., 1980. Evaluation for Two Methods for Cubic Volume Prediction of Loblolly Pine to Any Merchantable Limit. *For. Sci.* **26** : 71-80.

- DEMAERSCHALK, J.P., 1973. Integrated Systems for the Estimation of Tree Taper and Volume. *Can. J. For. Res.* **3** : 90-94.
- DEUSEN, P.C.V., SULLIVAN, A.D., MATNEY, T.G., 1981. A Prediction System for Cubic Foot Volume of Loblolly Pine Applicable Through Much of Its Range. *South Jor. Appl. For.* **5** : 186-189.
- KOZAK, A., MUNRO, D.D., SMITH, J.H.G., 1969. Taper Functions and their Application in Forest Inventory. *For. Chron.* **45** : 278-283.
- MYERS, RAYMOND H., 1986. *Classical and Modern Regression with Applications*, Duxbury Press, Boston, Massachusetts.
- PARRESOL, B.R., HOTVEDT, J.E., CAO Q.V., 1987. A Volume and Taper Prediction System for Bald Cypress. *Can. J. For. Res.* **17** : 250-259.
- RIBEIRO, F., TOMÉ, R., 2000. Classificação Climática de Portugal Continental, baseada em informação do Atlas do Ambiente, *Revista Ciências Agrárias* Vol. XXIII, nº2.
- SCHUMACHER F.X., HALL F., 1933. Logarithmic Expression of Timber-tree Volume. *J. Ag. Res.* **47** : 719-734.
- SPURR, H., 1952. *Forest Inventory*. Ronald Press, New York.
- TOMÉ, J., 1990. *Modelação de volume total, de volumes mercantis e do perfil de tronco em Eucalyptus globulus Labill. no centro do país*. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- TOMÉ, M., TOMÉ, J., RIBEIRO, F.E, FAIAS, S., 2001. Equações para estimação de volumes totais e mercantis da árvore para *Eucalyptus globulus* Labill. em Portugal. *Relatórios Técnico-científicos do GIMREF*, nº 4. Grupo de Inventariação e Modelação de Recursos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- TOMÉ, M., RIBEIRO, F., SOARES, P., 2001. O modelo GLOBULUS 2.1. *Relatórios Técnico-Científicos do GIMREF*, nº 1. Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.

Entregue para publicação em Outubro de 2005
Aceite para publicação em Maio de 2006

ⁱ Referimo-nos quer à touça que fica após o abate no fim da primeira rotação, quer às porções das varas que ficam sobre a touça após o seu corte nas rotações seguintes.

ⁱⁱ $r = \frac{v_i - vst}{v - vst}$ ou $r = \frac{vu_i - vust}{vu - vust}$

