

1. Introdução

O volume tem sido a variável dendrométrica mais utilizada para avaliar o quantitativo lenhoso. A sua determinação está quase sempre subjacente aos objectivos do Inventário Florestal. Diferentes países e regiões, tradicionalmente, têm adoptado diferentes definições para o volume da árvore individual (Päivinen and Köhl, 2005). O volume da árvore pode referir-se ao volume total do tronco ou à parte mercantil do fuste definida de acordo com um diâmetro mínimo ou uma altura máxima. Por outro lado, o cálculo do volume total pode ou não incluir o volume do cepo e, para além disso, os diferentes tipos de volume podem ser expressos com ou sem casca.

Na prática florestal actual existem essencialmente duas abordagens para a estimação do volume até um limite mercantil definido por um diâmetro ou uma altura. Uma dessas abordagens consiste em utilizar equações de volumes percentuais (Tomé et al. 2001, 2007; Barrio-Anta et al. 2007), as quais estimam uma percentagem do volume total abaixo do limite estabelecido. A outra abordagem consiste no uso de equações de perfil do tronco que permitem estimar o volume entre quaisquer duas alturas do tronco por integração.

Num contexto de globalização de mercados, as metodologias que permitam uma normalização do uso das diferentes definições do volume da árvore são cruciais para uma adequada comparação e/ou combinação dos resultados de inventários florestais de diferentes regiões ou países.

Desenvolveu-se um sistema de equações que facilita a conversão e subsequente comparação dos resultados de inventários que utilizem diferentes definições de volume, assegurando a compatibilidade entre equações de perfil do tronco, equações de volume percentual e equações de volume total.

2. Material e Métodos

2.1 Especificação do Sistema

O sistema de equações desenvolvido segue a lógica descrita na Fig. 1. O volume total da árvore (V) divide-se nas componentes volume do tronco acima do cepo e volume do cepo. O volume acima do cepo divide-se ainda em volume do tronco com e sem casca (v_{st} e vu_{st}) e volume da casca (vb_{st}), que é obtido da diferença entre v_{st} e vu_{st} . O volume total é obtido pela soma $v_{st} + vst$, onde vst é o volume do cepo.

As equações que compõem o sistema são apresentadas na Fig. 2. A equação Schumacher e Hall (1933) foi usada para estimar o volume total do tronco sem casca excluindo o cepo (eq. 3).

A eq. 1 é uma equação de perfil do tronco que estima o diâmetro sem casca acima do cepo até uma altura limite hi_{st} (Demaershalk 1973). Quando integrada para a altura total da árvore acima do cepo, a eq. 1 dá origem à eq. 3 e quando integrada desde o nível do cepo até uma altura limite hi_{st} , dá origem à eq. 8. Nesta última equação, o volume percentual sem casca até uma altura parcial é dado pela expressão:

$$\left[1 - \left(\frac{h_{st} - h - h_{st}}{h_{st}} \right)^n \right]$$

Assumiu-se que o diâmetro a uma determinada altura acima do cepo é obtido pela adição da espessura da casca ao diâmetro sem casca (eq. 2), sendo a espessura da casca igualmente modelada pela equação de Demershalk. Tal como anteriormente, por integração da eq. 2 para a altura total ou para uma altura parcial acima do cepo, vamos obter as equações 4 e 9, respectivamente.

Os volumes de casca total ou parcial (eqs. 5 e 10) são obtidos por diferença entre os respectivos volumes com e sem casca. Dado que o sistema garante que $di_{st} > di$, não existe o risco de obter valores negativos para as estimativas.

2.2 Ajustamento do Sistema

O sistema desenvolvido foi aplicado a dados de Pinheiro bravo. Para ajustar o sistema foram utilizados dados de 1387 árvores abatidas (11284 pares altura-diâmetro) representando adequadamente a área de distribuição do Pinheiro bravo em Portugal. O conjunto de dados incluiu árvores com diâmetros à altura do peito na classe 5 cm até à classe >65 cm onde se incluíram também algumas árvores das classes 70 e 75 cm. Garantiu-se a existência de um mínimo de 20 árvores em cada classe de diâmetro.

Utilizou-se o método dos mínimos quadrados não lineares generalizados para o ajustamento do sistema. Para tal recorreu-se ao software SAS/ETS, tendo-se optado pelo método ITSUR do PROC MODEL. Atribuiu-se a cada árvore um peso idêntico na análise, ponderando-se os dados com o factor $(1/ni)$, onde ni é o número de observações por árvore. Este procedimento corrigiu alguma heterocedasticidade observada nos gráficos dos resíduos. A ausência de normalidade dos erros foi corrigida com recurso à função de Huber.

2.3 Validação

Para a validação foram utilizados dados de 308 árvores abatidas pertencentes às classes de diâmetro 5 cm a >65 cm, assegurando também um mínimo de 20 árvores por classe diamétrica à excepção da classe >65 que continha 17 árvores.

O erro do modelo foi caracterizado através das estatísticas: $(\sum (y_i - \hat{y}_i) / N)$ e $(\sum |y_i - \hat{y}_i| / N)$

A primeira dá uma indicação do enviesamento do modelo e a segunda é indicadora da precisão do modelo. Para além destas duas estatísticas foram ainda observados os percentis 5% e 95% da distribuição dos resíduos de predição, bem como a estatística eficiência de modelação dada pela expressão:

$$EF = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

(y_i - valores observados; \hat{y}_i - valores estimados; \bar{y} - média global)

Através de uma análise gráfica, observou-se a dependência entre os erros do modelo e características individuais das árvores.

3. Resultados e Discussão

O sistema de equações demonstrou uma boa performance quando aplicado a dados de Pinheiro bravo em Portugal. A qualidade de ajustamento é bastante boa sendo as equações que estimam o volume da casca (eqs. 5 e 10) aquelas que apresentam menor valor de R^2 ajustado (Fig. 3).

Todas as estimativas dos parâmetros se mostraram altamente significativas ($p < 0.0001$).

Equação/Variável resposta	Viés				Eficiência modelação EF
	$\sum (y_i - \hat{y}_i) / N$	$\sum y_i - \hat{y}_i / N$	p5	p95	
[1] diu	-0.58	1.93	-4.07	3.62	0.967
[2] di	-0.14	2.09	-3.98	4.75	0.969
[3] vu_{st}	-0.017	0.110	-0.256	0.292	0.983
[4] v_{st}	-0.006	0.100	-0.241	0.277	0.991
[5] vb_{st}	0.011	0.057	-0.121	0.185	0.935
[6] vst	-0.001	0.004	-0.010	0.007	0.984
[7] v	-0.007	0.101	-0.246	0.273	0.991
[8] vhi_{st}	-0.011	0.068	-0.176	0.185	0.987
[9] vhi_{st}	-0.008	0.062	-0.167	0.163	0.993
[10] vhi_{st}	0.004	0.041	-0.120	0.113	0.943
IFN95	-0.153	0.168	-0.513	0.668	0.979
IFN05	-0.058	0.113	-0.136	0.376	0.986

Fig. 4. Estatísticas de avaliação da capacidade preditiva do sistema p5 e p95 são os percentis da distribuição dos resíduos de predição

Equação/Variável	Estatísticas	
	RMSE	R^2
[1] diu	2.03	0.964
[2] di	2.53	0.960
[3] vu_{st}	0.109	0.987
[4] v_{st}	0.106	0.992
[5] vb_{st}	0.055	0.956
[6] vst	0.003	0.992
[7] v	0.106	0.993
[8] vhi_{st}	0.105	0.977
[9] vhi_{st}	0.126	0.979
[10] vhi_{st}	0.044	0.954

Fig. 3. Estatísticas de avaliação da qualidade de ajustamento do sistema RMSE - desvio padrão das estimativas; R^2 - Coeficiente de determinação ajustado

À excepção das equações que estimam o volume da casca, todas as restantes equações do sistema apresentam um viés negativo, indicador de uma certa tendência geral para sobrestimar as variáveis resposta associadas (Fig. 4). Contudo, esse enviesamento é muito reduzido. Os valores da eficiência de modelação são bastante altos, indicando uma boa capacidade preditiva do sistema.

Na Fig. 5 caracterizam-se os resíduos da equação que estima o diâmetro do fuste a um nível acima do cepo (eq. 2). A análise dos resíduos foi feita em função dos diâmetros e alturas relativas. A equação subestima o diâmetro na parte inferior do tronco mas, no geral, tende a sobrestimar ligeiramente o diâmetro, especialmente na parte superior do fuste. Globalmente, a equação produz estimativas pouco enviesadas e bastante precisas.

Na Fig. 6 podemos observar a distribuição dos resíduos da equação que estima o volume total, por classe de di e altura. Também aqui se verifica uma boa qualidade das estimativas produzidas. Quanto ao diâmetro, é a partir da classe de diâmetro dos 40 cm que se verifica um ligeiro aumento do enviesamento e um decréscimo na precisão. Quanto à altura, o aumento de enviesamento acontece acima da classe 22 m acompanhado de ligeiro decréscimo da precisão.

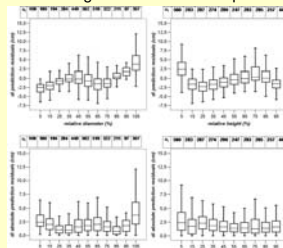


Fig. 5. Viés e precisão dos resíduos da equação que estima di por percentagem do diâmetro e da altura

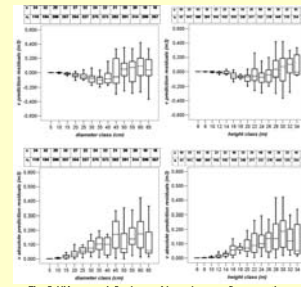


Fig. 6. Viés e precisão dos resíduos da equação que estima o volume total (v) por classe de diâmetro e de altura

Utilizando o conjunto de dados de validação, comparou-se o enviesamento e a precisão das estimativas da equação de volume total (eq. 7) com as estimativas produzidas pelas equações de volume total utilizadas nos Inventários Florestais de 1995 e 2005 (IFN 95 e IFN 05) (Fig. 7). Nesta comparação, a eq. 7 obteve uma performance muito boa, podendo-se afirmar que esta equação faz previsões adequadas do volume total em Pinheiro bravo a nível nacional.

Fig. 7. Comparação da capacidade preditiva entre a equação que estima o volume total (eq. 7) e as equações de volume total utilizadas nos IFN de 1995 e 2005

4. Considerações Finais

Desenvolveu-se um sistema de equações capaz de estimar o volume de acordo com diferentes definições desta variável. A compatibilidade algébrica entre equações de perfil do tronco, equações de volume total e equações de volumes percentual foi assegurada através da adequada integração da equação de perfil do tronco para a altura total ou uma altura parcial. O método de estimação adoptado garantiu consistência numérica entre as equações que compõem o sistema. A grande vantagem deste sistema é a sua facilidade em compatibilizar e comparar resultados de inventários de diferentes regiões/países. Esta metodologia foi bem sucedida na sua aplicação a dados de Pinheiro bravo em Portugal

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado pelo projecto FP6 EFORWOOD IP project (contract 518128) e pelo projecto CarbWoodCork (POCI/AGR/57279/2004) da FCT. Um especial agradecimento ao Prof. Fernando Páscoa da ESAC pela cedência de dados históricos da Mata Nacional de Leiria, utilizados na fase de validação.