

**MODELAGEM ESTATÍSTICA DA SECAGEM AO AR LIVRE DE TORAS DE
Eucalyptus sp COM FINS ENERGÉTICOS**

RAPHAEL NOGUEIRA REZENDE¹, JOSÉ TARCÍSIO LIMA², LUANA ELIS DE RAMOS E
PAULA³, LAURENN BORGES DE MACEDO⁴

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estabelecer ajustes e selecionar um modelo estatístico para estimativa da umidade de toras de *Eucalyptus* sp em função do número de dias de secagem e diâmetro das toras, visando à sua aplicação no processo de carbonização. Normalmente, após o corte, a madeira para fins energéticos permanece ao ar livre por 90 dias, desejando-se que as toras atinjam 30% de umidade média. Porém, nem sempre a madeira está suficientemente seca após este período. Modelos estatísticos podem ser úteis para estimativa da umidade de toras, antes de serem enfiadas e carbonizadas. Para este estudo, utilizou-se uma madeira proveniente de um plantio clonal da V&M Florestal LTDA, com oito anos de idade e espaçamento de 3,0 m x 3,0 m, em Paraopeba, MG. Dez árvores foram abatidas, descascadas e seccionadas em toras de 3,60 m. Determinou-se a umidade, densidade básica e diâmetro das toras sem casca. Duas pilhas de secagem ao ar livre foram formadas e a secagem foi monitorada durante 190 dias por meio de pesagens periódicas de toras controladoras de umidade. Com base nas informações de umidade, tempo de secagem e diâmetro os ajustes foram realizados. O modelo estatístico ajustado que proporcionou as melhores estimativas da umidade em função do tempo de secagem e diâmetro médio das toras foi o não linear adaptado, com um coeficiente de determinação corrigido ($R^2_{\text{ajust.}}$) de 97,44%, erro padrão residual de 4,0% e distribuição de resíduos mais adequada, representado por $U = 5,0216 \times - 0,000458067^{\text{dias} \times \text{diâmetro}} \times \text{dias}^{-0,216805}$ e que pode ser aplicado no processo de carbonização.

Palavras-chave: Modelo estatístico, Estimativa, Umidade, Toras de *Eucalyptus* sp, Carbonização

INTRODUÇÃO

A secagem é um processo de grande importância na agregação de valor às peças serradas e roliças de madeira (PONCE & WATAI, 1985).

Dentre os diferentes métodos, pode-se citar a secagem ao ar livre, que consiste em expor a madeira à ação dos fatores climáticos de um determinado local. É um método bastante empregado no Brasil devido às condições ambientais favoráveis (KLITZKE, 2003). No entanto, apesar de exigir baixo investimento, é um processo que pode demandar um longo período de tempo dependendo do uso final da madeira (ROSSO, 2006).

No caso da madeira destinada à carbonização, a secagem ao ar livre é uma das etapas; a umidade deve ser em parte removida antes de a madeira ser enfiada, pois elevados teores podem afetar o poder calorífico, tempo de carbonização, friabilidade do carvão, rendimento gravimétrico, taxa de aquecimento dos fornos, dentre outros (CARNEIRO, 2007).

Normalmente, nas empresas produtoras de carvão, após o corte, as toras são empilhadas nos talhões ou próximas aos fornos, permanecendo ao ar livre por três meses, quando se deseja atingir 30% de umidade média (JUVILAR, 1979; RAAD, 2004). Mas nem sempre, após este tempo, a madeira está suficientemente seca para ser enfiada.

¹ Doutorando em Ciência e Tecnologia da Madeira, DCF/ UFLA, raphaelfloresta@hotmail.com

² Professor Associado II, DCF/UFLA, jtlima@dcf.ufla.br

³ Doutoranda em Ciência e Tecnologia da Madeira, DCF/ UFLA, luanafloresta@hotmail.com

⁴ Graduanda em Engenharia Florestal, DCF/ UFLA, laurenmmacedo@hotmail.com

Uma das alternativas para se prever o comportamento da madeira em função do tempo de secagem e de outras variáveis é por meio da utilização de modelos estatísticos ajustados.

Para materiais porosos como a madeira, os modelos de secagem podem utilizar um conjunto de equações de transporte de calor e massa e relações termodinâmicas para descreverem fisicamente o processo, com diferentes graus de complexidade (RAAD, 2004).

Modelos com menor grau de complexidade podem ser utilizados para se obter uma estimativa da umidade da madeira, conhecendo-se o diâmetro das peças e o tempo em que estas ficarão expostas ao ar.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi de estabelecer ajustes e selecionar um modelo estatístico para estimativa da umidade de toras de *Eucalyptus* sp em função do número de dias de secagem e diâmetro das toras, visando à sua aplicação no processo de carbonização.

MATERIAL E MÉTODOS

Dados coletados

Para a realização deste estudo, utilizou-se a madeira de um plantio clonal de *Eucalyptus* sp pertencente à V&M Florestal LTDA, com oito anos de idade, espaçamento de 3,0 m x 3,0 m, no município de Paraopeba, MG.

Dez árvores foram abatidas, descascadas e seccionadas em toras de 3,60 m de comprimento.

Em cada extremidade das toras sem casca, retirou-se um disco com 3,5 cm de espessura, seccionando-o em quatro cunhas. A umidade inicial foi determinada conforme a Norma NBR11941/2003, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2003). Determinou-se também a densidade básica, uma vez que esta é uma das propriedades que afeta a saída de água da madeira e conseqüentemente a secagem e a espécie do material não era conhecida.

Os diâmetros em cada extremidade das toras foram medidos com suta. Posteriormente toras de quatro árvores (controladoras de umidade) foram pesadas em balança eletrônica de capacidade de 500 kg e precisão 0,2 kg para a obtenção de massa inicial. A partir das umidades e massas iniciais, estimaram-se os valores de massa final (massa seca).

Dois pilhas em formato retangular foram instaladas (Figura 1) e as toras controladoras foram pesadas periodicamente. A secagem foi monitorada durante 190 dias e por meio dos dados de massa úmida e massa seca, calculou-se a umidade média das toras ao longo do tempo.



Figura 1 - Pilhas de secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus* sp.

Ajuste de modelos estatísticos

As informações de umidade, diâmetro das toras e tempo de secagem coletadas foram utilizadas para o ajuste de modelos estatísticos, que relacionam variações de umidade em função do número de dias de secagem e diâmetro médio das toras.

Três modelos foram empregados: não linear adaptado ao utilizado por Vital et al., 1985 (I), linear (II) e exponencial (III).

$$I. \quad U = \beta_0 \times \beta_1^{\text{dias} \times \text{diâmetro}} \times \text{dias}^{\beta_2}$$

II. $U = \beta_0 + \beta_1 \times \text{dias} + \beta_2 \times \text{diâmetro} + \beta_3 \times \text{dias} \times \text{diâmetro}$

III. $U = \beta_0 e^{\beta_1 \times \text{dias} \times \text{diâmetro}}$

A comparação e seleção do melhor ajuste foram realizadas com base em algumas medidas, conforme Pires & Calegario (2007): erro padrão residual (Syx), que representa, em média, o quanto os valores reais de uma característica estão variando em relação aos estimados; gráfico de distribuição de resíduos, que relaciona os erros em função do tempo; gráfico da umidade real e estimada em função do tempo de secagem e coeficiente de determinação corrigido para “n” graus de liberdade ($R^2_{\text{ajust.}}$), o qual indica que determinado percentual de variação de uma variável dependente em função das independentes é explicado por um modelo ajustado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de densidade básica encontrados variaram de 0,477 g/cm³ a 0,504 g/cm³ e estão próximos aos obtidos por Evangelista (2007), que foram de 0,450 a 0,500 g/cm³, para clones de *Eucalyptus* spp. Segundo Klitzke (2003), a densidade básica está fortemente relacionada com a secagem, visto que a saída de água da madeira ocorre mais rapidamente em materiais menos densos do que em outros de maiores densidades.

Os diâmetros das toras estavam compreendidos entre 4,0 e 18,0 cm, com uma média de 10,6 cm e desvio de 3,4 cm.

Os resultados obtidos dos ajustes e medidas de acurácia para os três modelos de estimativa da umidade em função do tempo de secagem e diâmetro das toras encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1- Ajuste de modelos para estimativa da umidade em função do tempo de secagem ao ar livre e diâmetro de toras sem casca de *Eucalyptus* em Paraopeba, MG, erro padrão residual (Syx) e coeficiente de determinação corrigido ($R^2_{\text{ajust.}}$)

Modelo	Ajuste	Syx (%)	$R^2_{\text{ajust.}}$ (%)
I	$U = 5,0216 \times -0,000458067^{\text{dias} \times \text{diâmetro}} \times \text{dias}^{-0,216805}$	4,0	97,44
II	$U = 91,0205 - 0,760992 \times \text{dias} + 0,368391 \times \text{diâmetro} + 0,0235574 \times \text{dias} \times \text{diâmetro}$	13,6	79,50
III	$U = 107,5470e^{-0,00121164 \times \text{dias} \times \text{diâmetro}}$	7,7	93,40

Com base nas medidas de comparação, o modelo mais adequado aos dados e que melhor descreveu as variações de umidade em função do tempo de secagem ao ar livre e diâmetro médio das toras foi o modelo I (não linear adaptado). Este apresentou o maior $R^2_{\text{ajust.}}$, menor erro padrão, melhor distribuição gráfica dos resíduos (Figura 2a) e um comportamento da umidade estimada x tempo mais próximo do real (Figura 2b). Desta forma, torna-se possível prever o comportamento das toras durante a secagem antes mesmo de serem carbonizadas, estimando-se valores de umidade para diferentes períodos de tempo e diâmetros.

Os modelos linear (II) e exponencial (III) apresentaram desempenhos inferiores, superestimando os valores de umidade.

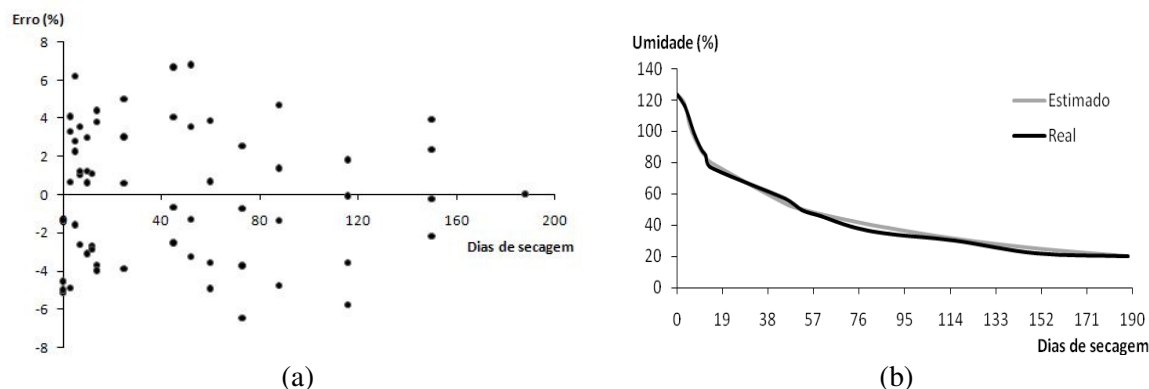


Figura 2 - a) Distribuição gráfica de resíduos em função do tempo de secagem e b) Comportamento da umidade real e estimada em função do tempo de secagem ao ar livre para o modelo não linear (I).

Vale ressaltar que, além de apresentar melhores “performances” em relação aos demais modelos, modelos como o representado por I possuem características desejáveis para um ajuste: possibilidade de se evitar excesso de parâmetros, parâmetros interpretáveis e extrapolação com maior segurança para outro conjunto de dados (PIRES & CALEGARIO, 2007).

CONCLUSÃO

O modelo estatístico não linear adaptado e ajustado proporcionou as melhores estimativas da umidade em função do tempo de secagem ao ar livre e diâmetro médio das toras, com um coeficiente de determinação corrigido de 97,44%, erro padrão residual de 4,0% e distribuição de resíduos mais adequada, representado por: $U = 5,0216 \times -0,000458067^{\text{dias} \times \text{diâmetro}} \times \text{dias}^{-0,216805}$ e que pode ser aplicado no processo de carbonização.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras e à V&M Florestal LTDA.

REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO

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

CARNEIRO, A. de C. Qualidade da madeira e tecnologias para produção de carvão vegetal. In: SEMINÁRIO FLORESTAS PLANTADAS DO MS, 1., 2007, Campo Grande. **Anais...** Disponível em: <<http://www.reflore.org.br/palestras/QualidadeDaMadeiraeTecnologiasParaProducaoDeCarvaoVegetal.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2008.

EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blakie, oriunda de consórcio agrossilvopastoril.** 2007. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

JUVILLAR, J. B. **O carvoejamento da madeira e seus reflexos na qualidade do carvão:** qualidade da madeira. Piracicaba: IPEF, 1979. 6 p. (IPEF. Circular Técnica, 64). Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr064.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2010.

KLITZKE, R. J. **Secagem da madeira.** Curitiba: UFPR, 2003. 98 p.

PIRES, L. M.; CALEGARIO, N. Ajuste de modelos estocásticos lineares e não-lineares para a descrição do perfil longitudinal de árvores. **Rev. Árvore**, Viçosa, v.31, n.5, p.845-852, 2007.

XIX CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA
27 de setembro a 01 de outubro de 2010

PONCE, R. H.; WATAI, L. T. **Manual de secagem da madeira**. Brasília: STI/IPT, 1985, 72 p.

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do *Eucalyptus* spp.** 2004. 114 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

ROSSO, S. **Qualidade da madeira de três espécies de *Eucalyptus* resultante da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional.** 2006. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; VALENTE, O. F. Estimativa do teor de umidade de lenha para carvão em função do tempo de secagem. **Rev. Árvore**, Viçosa, v.9, n.1, p.10-27, 1985.