

ANÁLISE COMPARATIVA DAS EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA ESTIMAR A UMIDADE DE EQUILÍBRIO DA MADEIRA

Lourival Marin Mendes¹, Julio E. Arce²

(Recebido: 25 de janeiro de 2000; aceito: 20 de novembro de 2003)

RESUMO: O presente trabalho consiste de uma análise comparativa dos resultados obtidos pela aplicação das equações de Hailwood & Harrobin, Bradley e BET. Tais equações, baseadas nas teorias de sorção, são empregadas com a finalidade de estimar a umidade de equilíbrio da madeira. Para a realização desta comparação, partiu-se de uma estimativa de umidades de equilíbrio para as condições brasileiras, com base nos dados de temperatura e umidade relativa do ar, correspondentes às normais climatológicas do período 1961/1990, fornecidas pelo Ministério da Agricultura, de 206 cidades, distribuídas em 26 estados. A partir dos dados gerados pelas referidas equações, constatou-se que os valores correspondentes à de Hailwood & Harrobin de um e dois hidratos estimam, em média, valores intermediários entre as de Bradley e BET que, respectivamente, geraram valores inferiores e superiores, ao longo do ano, para as condições climáticas brasileiras. Portanto, as equações empregadas fornecem referenciais consistentes para as operações de secagem da madeira ao ar livre. Contudo, visando uma melhor precisão de dados, deve-se proceder estudos de determinação prática das umidades reais de equilíbrio nas localidades de interesse, utilizando, então, a equação que gerar valores mais próximos da realidade.

Palavras-chave: madeira, umidade de equilíbrio, secagem

COMPARATIVE ANALYSIS OF EQUATIONS USED TO ESTIMATE WOOD EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT

ABSTRACT: *This research analyzes comparatively Hailwood & Harrobin, Bradley and BET equations for estimating wood equilibrium moisture content. Estimative equilibrium moisture content data based on temperature and relative air humidity, corresponding to the Brazilian conditions, were used thorough meteorological information obtained from 206 cities in 26 Brazilian states by the Ministry of Agriculture in the period 1961/1990. It was noticed that the Hailwood & Harrobin equations of 1 and 2 hydrates values estimate, on average, intermediate values between Bradley and BET that, respectively, generated inferior and superior yearly values to Brazilian meteorological conditions. The applied equations provided a consistent referential to the wood air drying activities. However, in order to achieve higher accuracy, a practical determination of the real equilibrium moisture content from specific places should be done.*

Keywords: wood, equilibrium moisture content, drying

¹ Professor do Departamento de Ciências Florestais, UFPA. C.P. 37, CEP 37.200-000, Lavras-MG. E-mail: lourival@ufla.br

² Professor do Departamento de Ciências Florestais, UFPR, Av. Prof. Lothário Meissner, 3400, Jd. Botânico. CEP 80.210-170, Curitiba-PR. E-mail: jarce@floresta.ufpr.br

1 INTRODUÇÃO

Quando a madeira é seca até para umidades abaixo do ponto de saturação das fibras, que esta em torno de 30% (Kollman & Cote, 1968), suas dimensões diminuem e, como resultado, ela pode rachar-se. Quando adsorve água na faixa de 0% a 30% de umidade, há um aumento dimensional, tendo como conseqüência, uma depreciação na utilização da madeira. Assim, é necessário que, antes da fabricação, a estabilidade dimensional da peça seja alcançada, o que acontece por meio da secagem até a umidade de equilíbrio.

A umidade de equilíbrio da madeira varia com a umidade relativa da atmosfera que a circunda, entre as diferentes espécies, entre cerne e alborno da mesma espécie e com teor de extrativos. É afetada também pela temperatura, tensões mecânicas e pela história da exposição da madeira (Skaar, 1972). Assim, a umidade de equilíbrio deve ser determinada para o local onde a madeira será empregada, por meio da determinação da umidade das peças ou amostras de madeira expostas às condições ambientais de temperatura e umidade relativa ou estimada por meio de equações.

Umidades de equilíbrio estimadas por fórmulas consistem em uma referência interessante no processo de secagem da madeira, principalmente no controle do processo de secagem ao ar livre (Mendes et al., 1996b e Mendes et al., 1999).

Silva et al. (1998) relatam que, com a utilização de um simples psicrômetro de parede de baixo custo, é possível determinar com precisão, em relação aos psicrômetros aspirados, de custo maior, valores de temperatura e umidade relativa de uma localidade e, a partir destes, estimar a umidade de equilíbrio da madeira.

As teorias existentes para previsão da umidade de equilíbrio da madeira foram

descritas por Skaar (1972), tendo Simpson (1971, 1973, 1981) determinado os coeficientes originais das equações baseadas nestas teorias.

A teoria mais utilizada é a de Hailwood e Harrobin e vários autores vem empregando-a para estimar a umidade de equilíbrio em várias localidades (Galvão, 1975 e 1981; Santini, 1984; Lima et al., 1994; Lima et al., 1995; Lima & Mendes, 1995a; b e Mendes et al., 1996a). Utilizando a teoria de Hailwood e Harrobin, têm sido desenvolvido programas para calcular a umidade de equilíbrio da madeira, como realizado por Eleotério et al. (1998).

Segundo Lima et al. (1995), é importante considerar que eventuais diferenças entre valores de umidade de equilíbrio estimados e os valores observados (reais) devem ser determinadas e que, para isso, necessita-se conhecer a umidade de equilíbrio real para as principais madeiras utilizadas nas cidades brasileiras. Simpson (1971) constatou, ao comparar valores estimados com valores listados na tabela 38 do Wood Handbook (USDA, 1955), desvio de 0,13%.

É importante considerar que existem as outras equações que, obviamente, são baseadas em outras teorias e que podem ser testadas para as condições brasileiras.

O objetivo do presente trabalho é estabelecer comparações entre quatro equações na estimativa de umidade de equilíbrio da madeira, dentro da faixa de variação de umidade relativa e temperatura do Brasil.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a estimativa da umidade de equilíbrio são empregados neste trabalho os valores de temperaturas e umidades relativas que abrangeram o período de 1961 a 1990 e referem-se às "Normais Climatológicas -Série 1961 a 1990", determinados pelo MARA/

DNM (1992) para 206 cidades brasileiras, de acordo com as fórmulas $T = (T_{12} + 2T_{00} + T_{\max} + T_{\min})/5$ e $U = (U_{12} + U_{18} + 2U_{00})/4$, onde os índices se referem às horas de observações: 12:00, 18:00 e 0:00 TMG (Tempo Médio de Greenwich) e T_{\max} e T_{\min} são, respectivamente, a temperatura máxima e mínima de cada dia.

As equações a serem comparadas foram desenvolvidas a partir das teorias de sorção de Hailwood e Harrobin, Bradley, BET (Brunauer, Emmet & Teller), que foram descritas por Skaar (1972). Simpson, em comunicação pessoal, determinou os coeficientes originais das equações baseadas nas teorias.

As equações são apresentadas a seguir:

Hailwood e Harrobin (equação de um hidrato)

$$UE = \left[\frac{K1 \cdot K2 \cdot H}{1 + K1 \cdot K2 \cdot H} + \frac{K2 \cdot H}{1 - K2 \cdot H} \right] \frac{1800}{W}$$

em que:

UE = umidade de equilíbrio da madeira (%);
 $K1 = 3,730 + 0,03642 T - 0,000154 T^2$;
 $K2 = 0,6740 + 0,001053 T - 0,000001714 T^2$;
 $W = 216,9 + 0,01961 T + 0,005720 T^2$;
 T = temperatura em graus Fahrenheit;
 H = pressão relativa de vapor d'água (U / 100)

Hailwood e Harrobin (equação de dois hidratos)

$$UE = \left[\frac{K \cdot H}{1 - K \cdot H} + \frac{K \cdot H \cdot K1 + 2K1 \cdot K2 \cdot K^2 \cdot H^2}{1 + K \cdot H \cdot K1 + K1 \cdot K2 \cdot K^2 \cdot H^2} \right] \frac{1800}{W}$$

em que:

UE = umidade de equilíbrio da madeira (%);
 $K = 0,791 + 0,000463 T - 0,000000844 T^2$;
 $K1 = 6,34 + 0,000775 T - 0,0000935 T^2$;
 $K2 = 1,09 + 0,0284 T - 0,0000904 T^2$;
 $W = 330 + 0,452 T + 0,00415 T^2$;
 T = temperatura em graus Fahrenheit;
 H = pressão relativa de vapor d'água (U/100).

Bradley

$$\ln\left(\frac{1}{H}\right) = K2 \cdot K1^{UE} + K3$$

em que:

UE = umidade de equilíbrio da madeira (%);
 $K1 = 0,849 - 0,000236 T$;
 $K2 = 3,64 + 0,00316 T - 0,0000482 T^2$;
 $K3 = 0,00949 - 0,0000456 T$;
 T = temperatura em graus Fahrenheit;
 H = pressão relativa de vapor d'água (U/100).

BET

$$UE = \left[\left(\frac{Wm \cdot C \cdot H}{1 - H} \right) \cdot \left(\frac{1 - [n+1] \cdot H^n + n \cdot H^{n+1}}{1 + [C-1] \cdot H - C \cdot H^{n+1}} \right) \right]$$

em que:

UE = umidade de equilíbrio da madeira (%);
 $Wm = 7,4 - 0,020 T$ (teor de umidade quando o teor de adsorção monomolecular esta completo);
 $C = 6$ (constante relacionada com a energia de adsorção);
 $n = 4,6 + 0,020 T$ (número de camadas por sítio de adsorção);
 T = temperatura em graus Fahrenheit;
 H = pressão relativa de vapor d'água (U / 100).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Tabelas 1, 2, 3 e 4 apresentam a estimativa das umidades de equilíbrio médias da madeira para 26 estados brasileiros, calculada por meio das equações de Hailwood e Harrobin de um e dois hidratos; Bradley e BET, respectivamente.

A Figura 1 ilustra a flutuação das médias, mínimas e máximas umidades de equilíbrio ao longo do ano no Brasil, calculadas por meio das equações de Hailwood e Harrobin de um e dois hidratos: Bradley e BET, respectivamente.

Tabela 1. Estimativa das umidades de equilíbrio médias da madeira para 26 estados brasileiros, por meio da equação desenvolvida pela teoria de sorção de Hailwood e Harrobin de um hidrato.

Table 1. Estimate of average equilibrium moisture content of wood, for 26 Brazilian states, by Hailwood and Harrobin one hydrate sorption theory equation.

Local	N*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máx.	Mín.	Ampl	Méd.	Ano
AM	5	18,17	18,43	18,96	19,15	19,17	18,28	17,56	16,81	16,51	16,51	16,49	17,69	19,17	16,49	2,67	17,81	17,86
AC	2	19,18	19,19	19,18	19,19	18,53	17,55	16,84	16,49	16,83	17,49	18,07	19,18	19,19	16,49	2,70	18,14	18,11
RO	1	19,66	19,17	17,45	16,34	18,30	19,24	16,06	16,72	17,45	18,27	18,70	16,70	19,66	16,06	3,60	17,84	17,87
PA	15	18,68	19,49	19,50	19,46	19,00	18,10	17,41	16,74	16,33	16,06	16,53	17,68	19,50	16,06	3,44	17,92	17,68
AP	1	18,26	18,70	19,16	19,62	19,14	18,25	17,83	16,28	14,62	14,30	14,61	15,92	19,62	14,30	5,32	17,22	17,02
TO	3	16,37	16,86	16,87	15,47	13,21	11,48	10,28	9,10	9,68	13,15	15,03	16,13	16,87	9,10	7,77	13,63	13,27
MA	8	17,14	18,04	18,31	18,01	16,98	15,38	14,03	12,89	12,68	13,47	14,18	15,27	18,31	12,68	5,63	15,53	15,06
PI	6	14,05	14,96	15,77	15,32	13,64	11,67	10,44	9,46	9,00	9,84	10,86	12,15	15,77	9,00	6,76	12,26	11,93
CE	11	12,84	14,32	16,19	16,48	14,97	14,01	12,63	11,09	10,50	10,81	10,69	11,20	16,48	10,50	5,99	12,98	12,74
RN	6	12,18	13,06	14,42	14,86	14,66	13,84	13,01	12,10	11,45	11,42	11,36	12,09	14,86	11,36	3,50	12,87	12,80
PB	4	13,27	13,25	15,56	15,88	15,96	16,04	16,08	13,82	12,90	12,43	11,96	12,59	16,08	11,96	4,11	14,14	13,98
PE	9	12,54	12,99	14,36	15,06	15,44	15,71	15,55	14,61	12,55	11,96	11,66	12,15	15,71	11,66	4,05	13,71	13,57
AL	2	13,18	14,00	14,67	16,14	17,16	17,07	17,58	16,56	15,46	13,93	13,19	13,37	17,58	13,18	4,39	15,19	15,04
SE	1	15,29	14,82	15,25	15,79	15,18	15,13	15,44	15,44	15,38	15,54	15,56	15,61	15,79	14,82	0,98	15,37	15,37
BA	28	13,91	13,95	14,19	15,01	15,15	15,15	14,69	13,62	12,94	12,93	13,40	13,72	15,15	12,93	2,22	14,05	13,97
ES	4	15,85	15,50	15,85	16,16	16,60	16,84	16,87	16,23	16,19	16,39	16,44	16,58	16,87	15,50	1,37	16,29	16,28
RJ	10	15,98	15,94	16,24	16,42	16,74	16,66	16,16	15,73	15,89	16,28	16,19	16,42	16,74	15,73	1,00	16,22	16,23
SP	9	16,14	15,69	15,64	15,50	15,63	15,10	14,08	13,17	13,86	14,98	14,84	15,59	16,14	13,17	2,97	15,02	14,91
MG	32	15,84	15,19	15,38	15,41	15,15	14,81	13,93	12,81	13,01	13,96	15,14	16,18	16,18	12,81	3,36	14,74	14,61
PR	10	14,79	15,13	15,29	15,34	15,82	15,80	15,30	14,55	14,16	14,73	13,50	14,21	15,82	13,50	2,32	14,88	14,79
SC	5	15,52	16,10	16,28	16,50	16,86	16,79	16,46	15,72	15,93	15,36	14,95	15,06	16,86	14,95	1,91	15,96	15,98
RS	11	14,14	15,02	15,41	15,66	16,66	16,56	16,32	15,72	15,47	14,66	13,96	14,18	16,66	13,96	2,70	15,31	15,30
MS	8	15,99	15,63	16,18	16,17	15,06	14,69	13,02	11,56	12,45	13,09	13,87	15,29	16,18	11,56	4,61	14,42	14,25
MT	4	16,96	17,54	16,68	16,63	15,83	15,07	13,47	12,31	12,70	14,30	15,62	16,15	17,54	12,31	5,23	15,27	15,06
DF	1	14,88	15,18	15,81	14,59	12,80	11,29	10,31	9,02	9,66	12,26	14,58	15,83	15,83	9,02	6,80	13,02	12,52
GO	10	15,92	15,43	15,51	14,50	13,33	12,14	10,71	9,54	10,25	12,65	14,58	15,99	15,99	9,54	6,45	13,38	13,11
BR	206	15,64	15,91	16,31	16,33	16,04	15,49	14,69	13,77	13,61	14,11	14,46	15,11	16,33	13,61	2,72	15,12	14,97
Máx		19,66	19,49	19,50	19,62	19,17	19,24	17,83	16,81	17,45	18,27	18,70	19,18	19,66	16,81	2,85	18,74	18,11
Mín		12,18	12,99	14,19	14,50	12,80	11,29	10,28	9,02	9,00	9,84	10,69	11,20	14,50	9,00	5,50	11,50	11,93
Ampl.		7,48	6,51	5,31	5,12	6,37	7,96	7,56	7,78	8,45	8,42	8,02	7,98	5,15	7,80		7,25	6,18

N* - número de estações meteorológicas; Média – média aritmética das umidades de equilíbrio mensais; Ano – umidade de equilíbrio média anual calculado a partir da temperatura e umidade relativa média anual de cada localidade; Mínimo e máximo – menor e maior valor de umidade de equilíbrio observado e Amplitude – diferença do maior e menor observado.

Tabela 2. Estimativa das umidades de equilíbrio médias da madeira para 26 estados brasileiros, por meio da equação desenvolvida pela teoria de sorção de Hailwood e Harrobin de dois hidratos.

Table 2. Estimate of average equilibrium moisture content of wood, for 26 Brazilian states, by Hailwood and Harrobin two hydrate sorption theory equation

Local	N*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máx.	Mín.	Ampl.	Méd.	Ano
AM	5	18,08	18,36	18,94	19,15	19,18	18,20	17,44	16,65	16,35	16,36	16,33	17,57	19,18	16,33	2,85	17,72	17,75
AC	2	19,19	19,20	19,19	19,20	18,47	17,43	16,68	16,33	16,68	17,35	17,96	19,18	19,20	16,33	2,87	18,07	18,02
RO	1	19,73	19,17	17,30	16,14	18,22	19,27	15,86	16,54	17,31	18,17	18,66	16,51	19,73	15,86	3,86	17,74	17,76
PA	15	18,65	19,57	19,56	19,52	19,02	18,03	17,29	16,58	16,16	15,88	16,37	17,58	19,57	15,88	3,68	17,85	17,57
AP	1	18,16	18,66	19,16	19,68	19,13	18,15	17,71	16,08	14,41	14,10	14,40	15,71	19,68	14,10	5,57	17,11	16,85
TO	3	16,18	16,69	16,70	15,26	13,05	11,40	10,28	9,17	9,72	13,00	14,82	15,94	16,70	9,17	7,53	13,52	13,10
MA	8	16,98	17,94	18,23	17,92	16,85	15,23	13,91	12,79	12,57	13,32	14,01	15,09	18,23	12,57	5,66	15,40	14,87
PI	6	13,87	14,79	15,58	15,15	13,51	11,61	10,43	9,51	9,07	9,88	10,83	12,06	15,58	9,07	6,51	12,19	11,85
CE	11	12,72	14,17	16,04	16,32	14,78	13,87	12,55	11,07	10,50	10,81	10,69	11,16	16,32	10,50	5,83	12,89	12,63
RN	6	12,09	12,92	14,24	14,67	14,48	13,68	12,88	12,00	11,39	11,37	11,32	12,01	14,67	11,32	3,35	12,75	12,68
PB	4	13,13	13,09	15,40	15,71	15,82	15,98	16,08	13,73	12,83	12,34	11,88	12,50	16,08	11,88	4,20	14,04	13,84
PE	9	12,43	12,85	14,20	14,90	15,32	15,63	15,48	14,56	12,46	11,89	11,59	12,06	15,63	11,59	4,04	13,61	13,44
AL	2	13,04	13,82	14,47	15,94	17,00	16,94	17,46	16,39	15,25	13,75	13,04	13,22	17,46	13,04	4,43	15,03	14,83
SE	1	15,08	14,61	15,04	15,59	14,97	14,92	15,23	15,23	15,17	15,33	15,35	15,40	15,59	14,61	0,98	15,16	15,16
BA	28	13,75	13,79	14,03	14,85	15,01	15,03	14,59	13,52	12,85	12,83	13,28	13,58	15,03	12,83	2,20	13,93	13,83
ES	4	15,66	15,30	15,66	15,98	16,44	16,71	16,74	16,07	16,02	16,22	16,26	16,40	16,74	15,30	1,44	16,12	16,10
RJ	10	15,79	15,74	16,05	16,26	16,60	16,54	16,03	15,57	15,72	16,10	16,01	16,24	16,60	15,57	1,03	16,05	16,05
SP	9	15,98	15,53	15,48	15,38	15,54	15,01	13,98	13,09	13,77	14,86	14,70	15,44	15,98	13,09	2,89	14,90	14,77
MG	32	15,66	15,01	15,20	15,24	15,00	14,67	13,79	12,70	12,89	13,80	14,96	16,01	16,01	12,70	3,32	14,58	14,44
PR	10	14,62	14,96	15,14	15,23	15,75	15,74	15,22	14,47	14,05	14,59	13,36	14,05	15,75	13,36	2,39	14,76	14,65
SC	5	15,35	15,93	16,13	16,38	16,79	16,75	16,40	15,60	15,81	15,20	14,78	14,89	16,79	14,78	2,01	15,83	15,83
RS	11	13,98	14,84	15,23	15,51	16,63	16,50	16,25	15,62	15,34	14,51	13,80	14,05	16,63	13,80	2,83	15,19	15,15
MS	8	15,80	15,43	16,03	16,15	14,88	14,51	12,88	11,49	12,33	12,95	13,69	15,09	16,15	11,49	4,66	14,27	14,06
MT	4	16,80	17,41	16,51	16,45	15,64	14,90	13,31	12,20	12,58	14,13	15,45	15,98	17,41	12,20	5,20	15,11	14,87
DF	1	14,68	14,98	15,61	14,40	12,65	11,22	10,30	9,08	9,69	12,14	14,39	15,64	15,64	9,08	6,55	12,90	12,39
GO	10	15,73	15,23	15,31	14,31	13,17	12,03	10,68	9,58	10,25	12,51	14,38	15,80	15,80	9,58	6,22	13,25	12,96
BR	206	15,50	15,77	16,17	16,20	15,92	15,38	14,59	13,68	13,51	13,98	14,32	14,97	16,20	13,51	2,70	15,00	14,82
Máx.		19,73	19,57	19,56	19,68	19,18	19,27	17,71	16,65	17,31	18,17	18,66	19,18	19,73	16,65	3,07	18,72	18,02
Mín.		12,09	12,85	14,03	14,31	12,65	11,22	10,28	9,08	9,07	9,88	10,69	11,16	14,31	9,07	5,24	11,44	11,85
Ampl.		7,64	6,71	5,53	5,37	6,53	8,05	7,43	7,57	8,23	8,30	7,97	8,02	5,42	7,58		7,28	6,17

N* - número de estações meteorológicas; Média – média aritmética das umidades de equilíbrio mensais; Ano – umidade de equilíbrio média anual calculado a partir da temperatura e umidade relativa média anual de cada localidade; Mínimo e máximo – menor e maior valor de umidade de equilíbrio observado e Amplitude – diferença do maior e menor observado.

Tabela 3. Estimativa das umidades de equilíbrio médias da madeira para 26 estados brasileiros, por meio através da equação desenvolvida pela teoria de sorção de Bradley.

Table 3. Estimate of average equilibrium moisture content of wood, for 26 Brazilian states, by Bradley sorption theory equation.

Local	N*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máx.	Mín.	Ampl.	Méd.	Ano
AM	5	16,98	17,23	17,76	17,96	18,00	17,10	16,42	15,73	15,46	15,47	15,44	16,53	18,00	15,44	2,57	16,67	16,69
AC	2	18,00	18,01	18,00	18,01	17,35	16,43	15,78	15,46	15,77	16,34	16,88	18,00	18,01	15,46	2,55	17,00	16,95
RO	1	18,51	17,98	16,29	15,28	17,12	18,10	15,05	15,63	16,30	17,07	17,50	15,61	18,51	15,05	3,45	16,70	16,70
PA	15	17,52	18,39	18,37	18,34	17,87	16,97	16,30	15,66	15,29	15,05	15,48	16,56	18,39	15,05	3,35	16,82	16,54
AP	1	17,06	17,50	17,96	18,45	17,94	17,04	16,65	15,21	13,76	13,49	13,75	14,89	18,45	13,49	4,96	16,14	15,89
TO	3	15,32	15,76	15,78	14,52	12,56	11,07	10,00	8,91	9,45	12,51	14,13	15,11	15,78	8,91	6,86	12,93	12,62
MA	8	16,01	16,87	17,13	16,86	15,91	14,47	13,29	12,28	12,09	12,78	13,39	14,35	17,13	12,09	5,04	14,62	14,17
PI	6	13,28	14,09	14,79	14,41	12,95	11,21	10,12	9,20	8,78	9,57	10,47	11,64	14,79	8,78	6,00	11,71	11,45
CE	11	12,25	13,56	15,21	15,46	14,10	13,30	12,09	10,70	10,15	10,45	10,33	10,79	15,46	10,15	5,31	12,37	12,17
RN	6	11,67	12,43	13,60	13,99	13,83	13,12	12,40	11,60	11,02	11,00	10,95	11,58	13,99	10,95	3,04	12,27	12,21
PB	4	12,62	12,61	14,63	14,91	15,03	15,21	15,28	13,14	12,32	11,87	11,46	12,02	15,28	11,46	3,81	13,43	13,25
PE	9	11,98	12,37	13,58	14,21	14,58	14,87	14,76	13,90	12,00	11,46	11,19	11,64	14,87	11,19	3,68	13,04	12,89
AL	2	12,54	13,25	13,82	15,11	16,04	16,01	16,48	15,53	14,53	13,20	12,55	12,70	16,48	12,54	3,94	14,31	14,15
SE	1	14,35	13,94	14,31	14,79	14,26	14,22	14,50	14,50	14,44	14,57	14,59	14,63	14,79	13,94	0,85	14,42	14,43
BA	28	13,17	13,21	13,42	14,16	14,31	14,33	13,93	12,96	12,34	12,33	12,74	13,01	14,33	12,33	2,00	13,33	13,25
ES	4	14,85	14,54	14,86	15,15	15,57	15,83	15,87	15,26	15,21	15,37	15,40	15,51	15,87	14,54	1,33	15,29	15,27
RJ	10	14,99	14,94	15,21	15,42	15,75	15,72	15,27	14,85	14,98	15,29	15,20	15,39	15,75	14,85	0,89	15,25	15,25
SP	9	15,18	14,79	14,75	14,69	14,88	14,42	13,50	12,65	13,25	14,22	14,08	14,73	15,18	12,65	2,53	14,26	14,15
MG	32	14,89	14,31	14,48	14,53	14,34	14,08	13,29	12,28	12,44	13,25	14,28	15,21	15,21	12,28	2,93	13,95	13,83
PR	10	13,97	14,27	14,44	14,55	15,05	15,07	14,60	13,90	13,52	14,00	12,87	13,48	15,07	12,87	2,20	14,14	14,04
SC	5	14,63	15,14	15,33	15,59	16,00	16,02	15,70	14,97	15,13	14,56	14,16	14,24	16,02	14,16	1,86	15,12	15,11
RS	11	13,41	14,17	14,54	14,82	15,92	15,80	15,57	15,00	14,73	13,95	13,28	13,47	15,92	13,28	2,63	14,56	14,51
MS	8	15,00	14,67	15,22	15,63	14,23	13,92	12,47	11,17	11,93	12,49	13,14	14,37	15,63	11,17	4,46	13,69	13,49
MT	4	15,86	16,39	15,61	15,54	14,86	14,22	12,82	11,79	12,13	13,51	14,68	15,14	16,39	11,79	4,60	14,38	14,17
DF	1	14,05	14,31	14,86	13,81	12,26	10,95	10,07	8,86	9,45	11,77	13,79	14,89	14,89	8,86	6,02	12,42	12,01
GO	10	14,94	14,51	14,57	13,70	12,70	11,68	10,41	9,34	9,98	12,09	13,76	15,00	15,00	9,34	5,67	12,72	12,50
BR	206	14,73	14,97	15,33	15,38	15,13	14,66	13,95	13,10	12,94	13,37	13,67	14,25	15,38	12,94	2,44	14,29	14,14
Máx.		18,51	18,39	18,37	18,45	18,00	18,10	16,65	15,73	16,30	17,07	17,50	18,00	18,51	15,46	3,04	17,00	16,95
Mín.		11,67	12,37	13,42	13,70	12,26	10,95	10,00	8,86	8,78	9,57	10,33	10,79	13,99	8,78	5,21	11,71	11,45
Ampl		6,84	6,02	4,95	4,75	5,74	7,15	6,65	6,86	7,52	7,50	7,17	7,20	4,52	6,68		5,29	5,50

N* - número de estações meteorológicas; Média - média aritmética das umidades de equilíbrio mensais; Ano - umidade de equilíbrio média anual calculado a partir da temperatura e umidade relativa média anual de cada localidade; Mínimo e máximo - menor e maior valor de umidade de equilíbrio observado e Amplitude - diferença do maior e menor observado.

Tabela 4. Estimativa das umidades de equilíbrio médias da madeira para 26 estados brasileiros, por meio da equação desenvolvida pela teoria de sorção de BET.

Table 4 Estimate of average equilibrium moisture content of wood, for 26 Brazilian states, by BET sorption theory equation.

Local	N*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Máx.	Mín.	Ampl.	Méd.	ano
AM	5	17,70	17,84	18,12	18,20	18,20	17,75	17,33	16,85	16,64	16,63	16,64	17,41	18,20	16,63	1,57	17,44	17,51
AC	2	17,70	17,84	18,12	18,20	18,20	17,75	17,33	16,85	16,64	16,63	16,64	17,41	18,20	16,63	1,57	17,44	17,51
RO	1	18,46	18,22	17,30	16,61	17,79	18,28	16,43	16,86	17,30	17,76	17,99	16,84	18,46	16,43	2,03	17,49	17,55
PA	15	16,38	15,81	15,03	14,08	13,01	11,96	12,36	14,16	15,68	16,48	14,69	17,22	17,22	11,96	5,26	14,74	17,52
AP	1	17,75	17,99	18,22	18,44	18,21	17,75	17,52	16,56	15,35	15,09	15,34	16,32	18,44	15,09	3,35	17,04	17,04
TO	3	17,53	17,34	16,85	16,38	16,34	15,99	15,44	15,86	16,11	16,44	16,01	16,79	17,53	15,44	2,09	16,42	17,37
MA	8	17,59	17,51	17,27	16,99	16,96	16,58	16,07	16,19	16,29	16,51	16,22	17,00	17,59	16,07	1,52	16,76	17,42
PI	6	17,57	17,45	17,13	16,78	16,75	16,38	15,86	16,08	16,23	16,49	16,15	16,93	17,57	15,86	1,71	16,65	17,40
CE	11	17,41	17,25	16,92	16,53	16,34	15,85	15,49	15,89	16,17	16,49	15,97	16,99	17,41	15,49	1,93	16,44	17,41
RN	6	17,37	17,23	16,90	16,53	16,27	15,75	15,46	15,79	15,97	16,25	15,73	16,88	17,37	15,46	1,92	16,34	17,36
PB	4	17,49	17,36	17,06	16,71	16,58	16,14	15,72	15,99	16,17	16,43	16,02	16,95	17,49	15,72	1,77	16,55	17,40
PE	9	17,51	17,35	16,96	16,56	16,47	16,08	15,59	15,93	16,14	16,44	16,01	16,88	17,51	15,59	1,91	16,49	17,39
AL	2	17,50	17,36	17,01	16,63	16,52	16,11	15,66	15,96	16,15	16,44	16,01	16,91	17,50	15,66	1,84	16,52	17,39
SE	1	15,87	15,51	15,84	16,23	15,79	15,76	15,99	15,99	15,94	16,05	16,07	16,11	16,23	15,51	0,72	15,93	15,93
BA	28	16,80	16,40	15,82	15,16	14,43	13,62	13,74	14,97	15,82	16,41	15,20	16,90	16,90	13,62	3,28	15,44	17,30
ES	4	16,92	16,65	16,41	16,15	15,80	15,39	15,24	15,71	16,01	16,33	15,82	16,73	16,92	15,24	1,67	16,10	16,55
RJ	10	17,20	17,01	16,73	16,43	16,19	15,77	15,48	15,85	16,09	16,38	15,92	16,83	17,20	15,48	1,72	16,32	17,15
SP	9	16,42	16,13	16,06	15,89	15,98	15,61	14,78	13,87	14,44	15,45	15,41	16,00	16,42	13,87	2,55	15,50	15,47
MG	32	16,80	16,42	15,88	15,26	14,59	13,82	13,89	14,99	15,79	16,37	15,26	16,84	16,84	13,82	3,02	15,49	17,15
PR	10	15,40	15,65	15,69	15,69	16,06	16,09	15,71	15,07	14,80	15,38	14,30	14,93	16,09	14,30	1,79	15,40	15,37
SC	5	16,02	16,43	16,56	16,74	16,99	16,95	16,73	16,22	16,36	15,94	15,60	15,69	16,99	15,60	1,39	16,35	16,39
RS	11	14,87	15,60	15,93	16,16	16,79	16,83	16,67	16,24	16,04	15,37	14,77	14,81	16,83	14,77	2,07	15,84	15,88
MS	8	16,30	16,29	16,14	15,93	15,85	15,51	15,28	15,37	15,67	15,96	15,29	16,09	16,30	15,28	1,02	15,81	16,41
MT	4	16,99	17,33	16,81	16,77	16,22	15,62	14,34	13,17	13,59	15,00	16,02	16,37	17,33	13,17	4,16	15,68	15,65
DF	1	15,59	15,81	16,27	15,36	13,79	12,26	11,16	9,61	10,36	13,25	15,35	16,28	16,28	9,61	6,68	13,76	13,52
GO	10	16,32	15,97	16,01	15,26	14,26	13,11	11,58	10,21	11,03	13,58	15,33	16,37	16,37	10,21	6,16	14,09	14,06
BR	206	16,90	16,84	16,66	16,37	16,17	15,72	15,26	15,24	15,49	15,98	15,76	16,56	16,90	15,24	1,66	16,08	16,66
Máx.		18,46	18,22	18,22	18,44	18,21	18,28	17,52	16,86	17,30	17,76	17,99	17,41	18,46	16,63	1,60	17,49	17,55
Mín.		14,87	15,51	15,03	14,08	13,01	11,96	11,16	9,61	10,36	13,25	14,30	14,81	16,09	9,61	5,90	13,76	13,52
Ampl.		3,59	2,72	3,19	4,36	5,19	6,32	6,36	7,26	6,94	4,51	3,69	2,60	2,95	7,26		4,73	

N* - número de estações meteorológicas; Média - média aritmética das umidades de equilíbrio mensais; Ano - umidade de equilíbrio média anual calculado a partir da temperatura e umidade relativa média anual de cada localidade; Mínimo e máximo - menor e maior valor de umidade de equilíbrio observado e Amplitude - diferença do maior e menor observado.

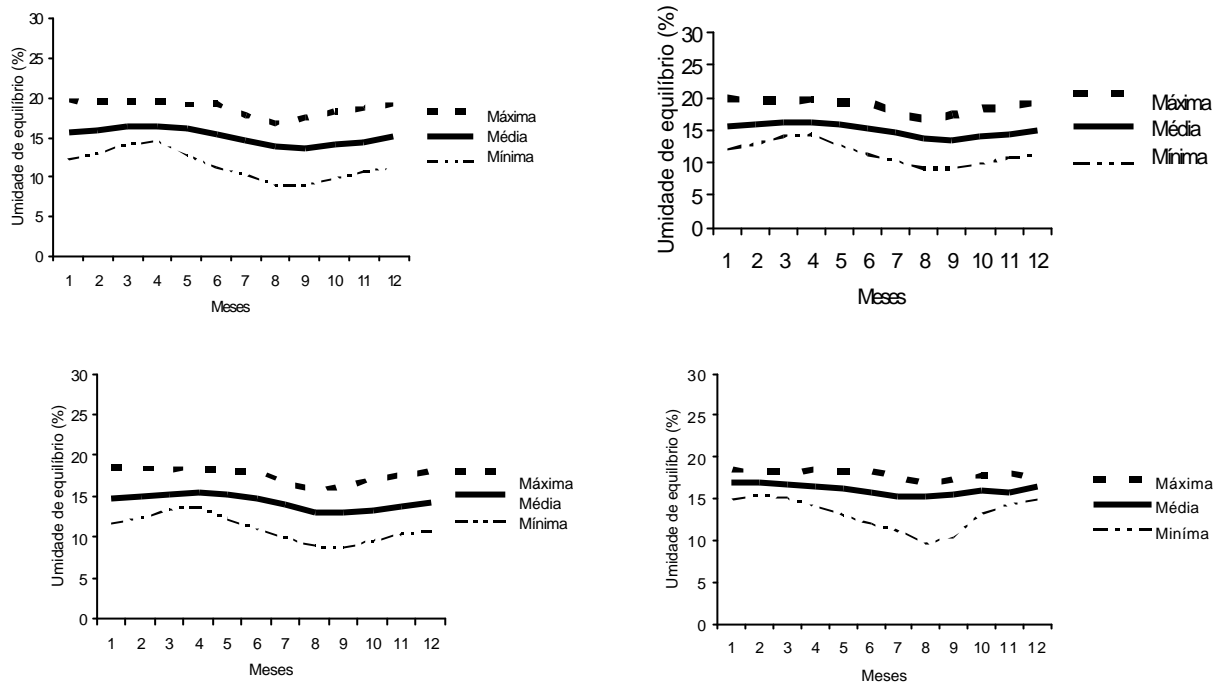


Figura 1. Flutuação das médias, mínimas e máximas de umidades de equilíbrio da madeira ao longo do ano, obtidas pelas equações testadas, em que: 1 – Hailwood e Harrobin de um hidrato; 2 - Hailwood e Harrobin de dois hidratos; 3 – Bradley e 4 – BET.

Figure 1. Variation of average, minimum and peak values of wood equilibrium moisture content along the year, according to the tested equations: 1 – One hydrate of Hailwood and Harrobin; 2 - Two hydrates of Hailwood and Harrobin; 3 – Bradley and 4 – BET.

Pela Figura 1 nota-se que as equações de Hailwood e Harrobin de um e dois hidratos apresentam um desempenho com características semelhantes. A umidade de equilíbrio média anual para o Brasil estimada pela equação de Hailwood e Harrobin de um hidrato foi igual a 15,12%, sendo que a mínima (13,61%) ocorre em setembro e a máxima (16,33%) em abril. Para os estados, a menor média (9,00%) foi observada no Piauí, no mês de setembro e a maior (19,66%) em Rondônia, no mês de janeiro. Já na equação de Hailwood e Harrobin de dois hidratos, a umidade de equilíbrio média anual para o Brasil foi igual a 15,00%, sendo a mínima (13,51%) em setembro e a máxima (16,20%)

em abril. Para os estados, a menor média (9,07%) foi observada no Piauí, no mês de setembro e a maior (19,73%) em Rondônia, no mês de janeiro.

A umidade de equilíbrio média anual para o Brasil estimada pela equação de Bradley foi igual a 14,29%, sendo a mínima (12,94%) em setembro e a máxima (15,38%) em abril. Para os estados, a menor média (8,78%) foi observada no Piauí no mês de setembro e a maior (18,51%) em Rondônia no mês de janeiro. Já pela equação de BET, a umidade de equilíbrio média anual para o Brasil foi igual a 16,08%, sendo a mínima (15,24%) em agosto e a máxima (16,90%) em janeiro. Para os estados, a menor média

(9,61%) foi observada no Distrito Federal no mês de agosto e a maior (18,46%) em Rondônia, no mês de janeiro.

Pode-se constatar que, em média, as equações de Hailwood e Harrobin de um e dois hidratos estimam valores intermediários de umidade de equilíbrio para as condições climáticas brasileiras, ficando entre a equação de Bradley que estima valores menores e a equação de BET que estima valores maiores (Figura 2). A Tabela 5 mostra a análise de variância para as equações estudadas e a Tabela 6 apresenta o teste de médias. Quanto à amplitude de variação, as equações de Hailwood e Harrobin de um e dois hidratos apresentaram flutuações maiores e semelhantes ao longo do ano, enquanto a equação de Bradley apresentou o mesmo padrão das

anteriores, no entanto com valores menores. Já a equação de BET produziu valores menores que as demais e com padrão de flutuação também diferenciado das outras equações testadas (Figura 3).

Pelas tabelas (1, 2, 3 e 4) apresentadas, pode-se constatar que existe uma pequena diferença entre a média aritmética de umidade de equilíbrio dos estados, calculada em função das umidades de equilíbrio dos meses, com a umidade de equilíbrio no ano para os estados, calculada com os valores médios de temperatura e umidade relativa.

Os valores citados neste trabalho podem apresentar uma pequena variação em relação a outros valores publicados por outros autores e estão associados com número de casas decimais adotadas para efeito de cálculo.

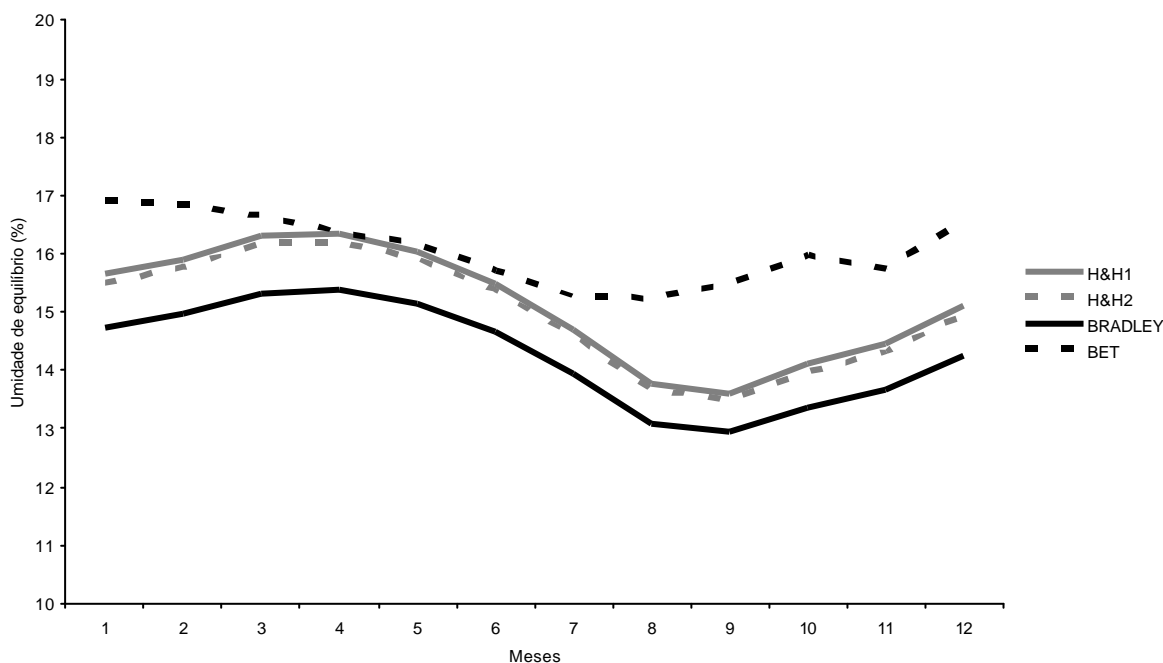


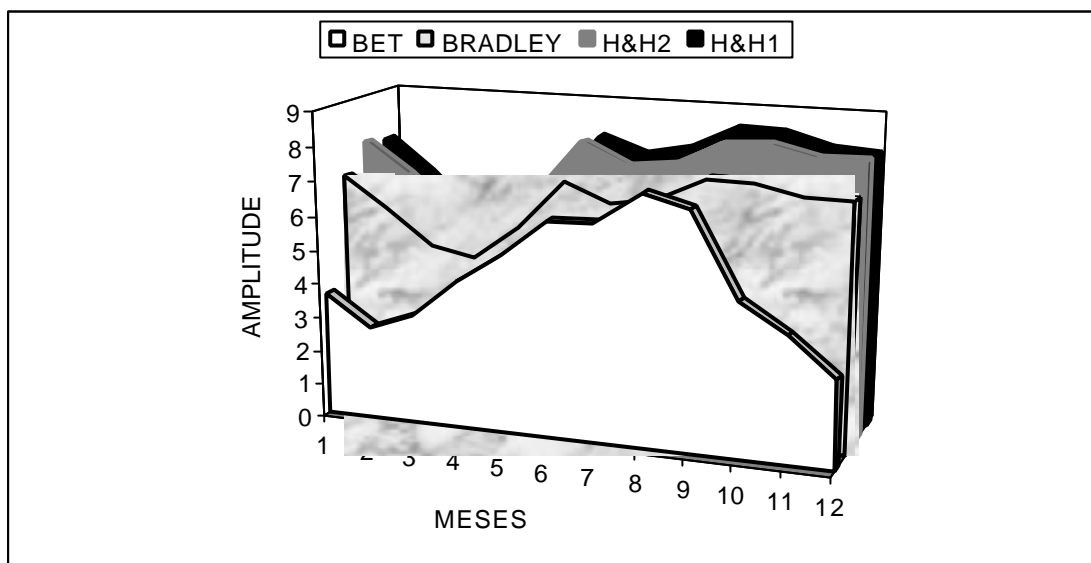
Figura 2. Flutuação das umidades de equilíbrio médias ao longo do ano, obtidas pela equação de Hailwood e Harrobin de um e dois hidratos, Bradley e BET.

Figure 2. Variation of average values of wood equilibrium moisture content during the year by one and two hydrate Hailwood and Harrobin, Bradley and BET equations.

Tabela 5. Análise de variância para a variável umidade de equilíbrio da madeira do fator “equações”.**Table 5.** ANOVA of wood equilibrium moisture content of “equations” factor.

Fonte de variação	Soma de quadrados	G.l.	Quadrado médio	F	Probabilidade
Efeito das equações	42,15832	3	14,052773	6,31*	0,0006
Erro	222,73827	100	2,227383		
TOTAL	264,89659	103			

* = significativo a 95% de probabilidade

**Figura 3.** Flutuação das amplitudes de variação das umidade de equilíbrio ao longo do ano, obtidas pela equação de Hailwood e Harrobin de um e dois hidratos, Bradley e BET.**Figure 3.** Variation of interval values of wood equilibrium moisture content during the year by one and two hydrates Hailwood and Harrobin, Bradley and BET equations.**Tabela 6.** Valor médio de umidade de equilíbrio da madeira estimado para o Brasil em função da equação utilizada**Table 6.** Average value of estimated equilibrium moisture content for Brazilian wood.

Equação	Tamanho da amostra	Média (%)	C.V. (%)
BET	26	16,07 a	5,75
H&H1	26	15,12 ab	11,21
H&H2	26	14,99 ab	11,31
Bradley	26	14,29 b	10,60

Obs.: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si comparadas pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$)

4 CONCLUSÕES

Com os resultados de umidade de equilíbrio obtidos pelas equações estudadas, pode-se concluir o seguinte:

As equações de Hailwood e Harrobin de um e dois hidratos estimam, em média, valores estatisticamente iguais e intermediários entre a equação de Bradley e BET;

A equação de Bradley estima, em média, valores menores de umidade de equilíbrio em relação às demais, ao longo do ano, para as condições climáticas brasileiras;

A equação de BET estima em média valores maiores de umidade de equilíbrio em relação às demais, ao longo do ano, para as condições climáticas brasileiras;

As equações de Bradley e BET estimam valores de umidade de equilíbrio diferentes estatisticamente;

As equações estudadas fornecem referenciais consistentes para a secagem da madeira ao ar livre; no entanto, para uma maior precisão, deve-se realizar um estudo de determinação prática das umidades de equilíbrio reais das localidades, utilizando-se assim, a equação que mais se aproxima da realidade.

Recomenda-se uma análise dos dados de umidade de equilíbrio específica para cada estado.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ELEOTÉRIO, J. R.; HASELEIN, C. R.; GIACOMINI, N. P. Programa para estimativa da umidade de equilíbrio da madeira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 13-22, nov. 1998.
- GALVÃO, A. P. M. Estimativas da umidade de equilíbrio da madeira em diferentes cidades do Brasil. **IPEF**, Piracicaba, n. 11, p. 53-65, out. 1975.
- GALVÃO, A. P. M. **A umidade de equilíbrio e a secagem da madeira em Brasília**. Curitiba: EMBRAPA, 1981. 7 p. (EMBRAPA. Boletim de Pesquisa Florestal, n. 3)
- KOLLMANN, F. P. P.; CÔTÉ, Jr. W. A. **Principles of wood science and technology – solid wood I**. New York: Springer Verlag, 1968. 592 p.
- LIMA, C. R.; SILVA, F. A. C.; COSTA, M. S. F. Estimativas de umidade de equilíbrio (Uep) para madeira e/ou produtos derivados para região nordeste do Brasil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ESTUDOS AMBIENTAIS SOBRE ECOSISTEMAS FLORESTAIS, 3., 1994, Porto Alegre. **Anais....** Porto Alegre, 1994. p. 30-34.
- LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Estimativa da umidade de equilíbrio para madeiras em Lavras-MG. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 120-121, jan./mar. 1995a.
- LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Estimativa da umidade de equilíbrio para madeiras em trinta e duas cidades do Estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 19, n. 2, p. 272-276, abr./jun. 1995b.
- LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; CALEGÁRIO, N. Estimativa da umidade de equilíbrio para madeiras no Brasil. **Revista da Madeira**, Caxias do Sul, RS, v. 4, n. 23, jul./ago. 1995.
- MENDES, L. M.; LIMA, J. T.; CALEGÁRIO, N. Umidades de equilíbrio médias de madeiras para 206 cidades Brasileiras calculadas pela fórmula de Simpson. **Revista da Madeira**, Caxias do Sul, v. 4, n. 126, p. 18, 1996a.
- MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M.; LIMA, J. F.; TRUGILHO, P. F. **Controle do processo de secagem da madeira ao ar livre**. Lavras: UFLA, 1999. 49 p. (UFLA. Boletim Técnico, n. 28).
- MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M.; LIMA, J. F.; TRUGILHO, P. F.; REZENDE, E. C. **Secagem da madeira ao ar livre e alguns pontos básicos para**

compra de madeira serrada. Lavras: UFLA, 1996b. 30 p. (UFLA. Boletim Técnico n. 21).

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA ÁGRÁRIA – DEPARTAMENTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas – série 1961-1990.** 1992. 84p.

SANTINI, E. J. Umidade de equilíbrio para algumas cidades do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL, 5., 1984, Nova Prata, RS. **Anais...** Nova Prata, RS, 1984. p. 828-840.

SILVA, J. R. MENDES, L. M. TRUGILHO, P. T. Controle dos parâmetros de secagem da madeira ao ar livre através do psicrômetro de parede. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 1998. v. 4, p. 406-415.

SIMPSON, W. T. Equilibrium moisture content prediction for wood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 21, n. 5, 48-49, May 1971.

SIMPSON, W. T.; ROSEN, H. N. Equilibrium moisture content of wood at high temperatures. **Wood and Fiber**, Madison, v. 13, n. 3, p. 150-158, 1981.

SIMPSON, W. T. Predicting equilibrium moisture content by mathematical models. **Wood and Fiber**, Madison, v. 5, n. 1, p. 41-45, 1973.

SKAAR, C. **Water in wood.** New York: Syracuse Univ. Press, 1972.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood handbook.** Washington, 1955. 528 p.