

Determinação da umidade de equilíbrio da madeira em Ivinhema (MS), Niterói (RJ) e Divinópolis (MG)

Márcia Cristiane Alves¹; Amanda dos Santos Ferreira¹; Afonso Henrique Rodrigues de Oliveira Barros²; Thiago Cardoso Silva³; Emmanoella Costa Guaraná Araujo³; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas¹

¹ Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Departamento Acadêmico de Engenharia Florestal (DAEF), Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais Lignocelulósicos (GPEMLIG), Rolim de Moura/RO, Brasil; ² Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Departamento Acadêmico de Engenharia Florestal (DAEF), Laboratório de Recuperação de Ecossistemas e Produção Florestal (REProFlor), Rolim de Moura/RO, Brasil; ³ Universidade Federal de Rondônia (UNIR)/ Departamento Acadêmico de Engenharia Florestal (DAEF)/Grupo de Pesquisa em Socioeconomia, Ecologia e Carbono em Agroecossistemas (SECarbon), Rolim de Moura/RO, Brasil – thiago.silva@unir.br

Resumo: A umidade de equilíbrio da madeira (UEM) é influenciada pela umidade relativa do ar (URA) e temperatura. Este estudo objetivou determinar UEM média mensal entre os anos de 2019 e 2023 para os municípios de Ivinhema–MS, Divinópolis–MG e Niterói–RJ. O estudo foi realizado com base em dados históricos de URA e temperatura, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As médias foram calculadas utilizando o Microsoft Office Excel e, em seguida, determinou-se a UEM por meio de equação. Os valores de UEM apresentaram uma amplitude que variaram entre 10,16% e 16,91% em Divinópolis, 13,51% e 15,67% em Niterói, e 9,60% e 12,49% em Ivinhema, refletindo as condições climáticas locais. O estudo destaca a importância de entender as características climáticas regionais para otimizar processos de secagem, custos de transporte, promover estabilidade dimensional e agregar valor a madeira.

Palavras-chave: Relação água-madeira, Higroscopicidade, Retratibilidade da madeira.

Determination of wood equilibrium moisture content in Ivinhema (MS), Niterói (RJ), and Divinópolis (MG)

Abstract: The equilibrium moisture content (EMC) of wood is influenced by the relative humidity of the air (RH) and temperature. This study aimed to determine the average monthly EMC between the years 2019 and 2023 for the municipalities of Ivinhema-MS, Divinópolis-MG, and Niterói-RJ. The study was conducted based on historical RH and temperature data from the National Institute of Meteorology. The averages were calculated using Microsoft Office Excel, and the EMC was then determined using a equation. The EMC values ranged from 10.16% to 16.91% in Divinópolis, 13.51% to 15.67% in Niterói, and 9.60% to 12.49% in Ivinhema, reflecting local climatic conditions. The study highlights the importance of understanding regional climatic characteristics to optimize drying processes, reduce transportation costs, promote dimensional stability, and add value to the wood.

Keywords: Water-wood relation, Hygroscopicity, Wood shrinkage.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é considerada um material higroscópico por sua capacidade de interação com a umidade do ambiente, o que provoca sua contração ou seu inchamento (Moreschi, 2014). A estabilidade dimensional da madeira, sua capacidade de manter suas dimensões físicas relativamente constantes, é influenciada pela entrada e saída de água das regiões amorfas das micelas, localizadas na parede celular. Durante o processo de inchamento, as moléculas de celulose se afastam, enquanto no processo de contração ocorre sua aproximação (Araújo, 2020). Essa relação dinâmica entre a madeira e as condições ambientais não demonstra apenas sua retratibilidade, mas também sua capacidade de se adaptar às variações do ambiente, influenciando nas propriedades físicas e estruturais da madeira.

A Umidade de Equilíbrio da Madeira (UEM) ocorre quando há um equilíbrio de pressão de vapor de água entre o meio externo e a parede celular da madeira (Baraúna *et al.*, 2022). Os principais fatores que influenciam na UEM são a umidade relativa do ar (URA) e a temperatura, que variam significativamente entre diferentes regiões do país e ao longo das estações do ano. Dessa maneira, a variação dessas condições atmosféricas afeta a UEM, uma vez que impacta na pressão de vapor de água do ambiente (Mascarenhas *et al.*, 2020).

O principal modelo para estimar a UEM é o de Simpson (1971), baseado na teoria de Hailwood & Harrobin (1946), que relaciona a URA e a temperatura com a sorção de água pela madeira (Mascarenhas *et al.*, 2020). A UEM é uma importante variável em diversas aplicações industriais, especialmente na secagem da madeira, influenciando na eficiência do processo, reduzindo defeitos e custos de transporte entre regiões com diferentes condições climáticas.

A lacuna de conhecimento consiste na compreensão insuficiente sobre como as variações nas condições ambientais em diferentes municípios, especificamente a URA e a temperatura, influenciam a UEM em diferentes regiões e estações do ano. A hipótese deste trabalho é que, ao entender e quantificar essa influência, será possível otimizar o processo de secagem da madeira, reduzindo defeitos e custos de transporte e melhorando a eficiência operacional da indústria madeireira. Com isso, objetivou-se determinar a UEM média mensal entre 2019 e 2023 para os municípios de Ivinhema–MS, Divinópolis–MG e Niterói–RJ.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 *Caracterização das regiões do estudo*

Para realizar este trabalho foram selecionados três municípios: Divinópolis–MG e Niterói–RJ, no Sudeste do país; e Ivinhema–MS, localizada na região Centro-Oeste. A seleção dos municípios considerou a representatividade das regiões Sudeste e Centro-Oeste, incluindo cidades com e sem influência litorânea. O clima característico é classificado por Koppen como tropical com inverno seco (Aw) para os municípios de Divinópolis (Costa *et al.*, 2021), Niterói (Mac *et al.*, 2016) e Ivinhema (Ivasko Jr. *et al.*, 2020). Em Divinópolis, a temperatura média é de 21,5 °C, com precipitação média anual de 1.313 mm (Costa *et al.*, 2021). Para os municípios de Niterói e Ivinhema, a temperatura média e precipitação média anual são, aproximadamente, de 25,2°C e 24,7°C e 1.120 mm e 820 mm, respectivamente (INMET, 2024).

2.2 *Estimativa da umidade de equilíbrio da madeira (UEM)*

Para determinar a UEM, foram utilizados dados históricos de URA e temperatura de bulbo seco entre os anos de 2019 a 2023, obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024). As médias mensais desses dados foram calculadas no programa Microsoft Office Excel. A UEM de cada município foi determinada usando a equação de Simpson (1971) (Equação 1), baseada nas variáveis URA e temperatura. Deste modo, foram determinadas as UEM médias de cada mês, entre 2019 e 2023, para cada município avaliado.

$$UEM = \frac{1800}{w} \left[\frac{kh}{1-kh} + \frac{k_1kh+2k_1k_2k^2h^2}{1+k_1kh+k_1k_2k^2h^2} \right] \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: UEM = umidade de equilíbrio da madeira, em %; w = 349 + 1,29T + 0,0135T²; K = 0,805 + 0,000736T – 0,00000303T²; K₁ = 6,27 – 0,00938T – 0,000303T²; K₂ = 1,91 + 0,0407T - 0,000293T²; T = temperatura, em °C; h = umidade relativa do ar, em decimal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os municípios de Ivinhema e Niterói apresentam as temperaturas anuais médias mais altas, com $25,2^{\circ}\text{C} \pm 2,67$ e $24,7^{\circ}\text{C} \pm 2,20$, respectivamente, enquanto Divinópolis registrou o menor valor médio, $22,0^{\circ}\text{C} \pm 2,31$ (Tabela 1). A diferença em Divinópolis pode ser atribuída à altitude mais elevada (796 m) (INMET, 2024), que naturalmente resulta em temperaturas mais baixas devido à menor pressão atmosférica. Em Ivinhema, a escassez de chuvas e atividade convectiva (movimentos verticais do ar na atmosfera) reduzida contribuem para o aumento da temperatura (Franca, 2015), enquanto em Niterói a topografia e a calmaria dos ventos próximos à Baía de Guanabara (Pimentel *et al.*, 2014) podem explicar o aumento das temperaturas locais.

Tabela 1. Médias mensais de temperatura no período de 2019 a 2023 para os municípios de Divinópolis (MG), Niterói (RJ) e Ivinhema (MS).

| Local | Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
| Divinópolis | 23,86 | 23,49 | 23,62 | 22,11 | 19,35 | 18,36 | 18,22 | 20,13 | 23,79 | 24,12 | 23,39 | 23,62 |
| Niterói | 28,14 | 27,17 | 27,27 | 25,06 | 23,42 | 22,05 | 21,69 | 22,02 | 23,91 | 24,53 | 24,77 | 26,36 |
| Ivinhema | 27,65 | 26,78 | 27,51 | 25,51 | 22,41 | 21,18 | 20,80 | 22,65 | 26,07 | 26,77 | 27,05 | 27,98 |

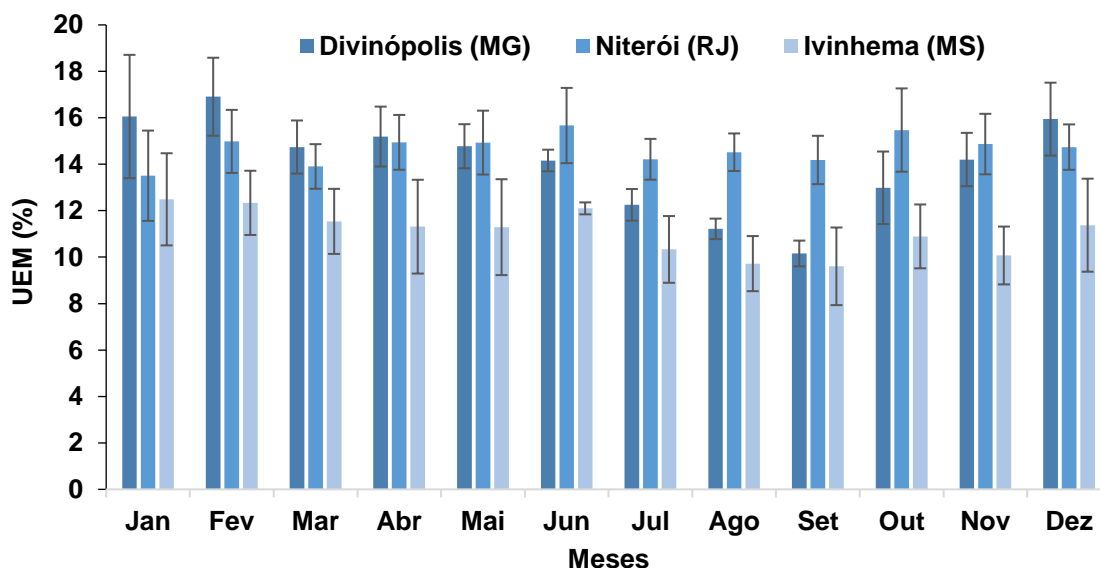
Os municípios de Divinópolis e Ivinhema apresentaram as maiores amplitudes de URA ao longo do ano (Tabela 2). Além disso, esses municípios registraram, respectivamente, a maior (82,42%, em fevereiro) e menor (52,59%, em setembro) média de URA no decorrer do ano. O município de Niterói, por sua vez, destacou-se por apresentar menor amplitude de umidade, havendo maior consistência da variável entre as estações do ano. Esses padrões podem ser atribuídos a fatores geográficos e climáticos distintos. Em Niterói, a proximidade com o oceano propicia influências das massas de ar marítimas. Em Divinópolis, a altitude pode desempenhar papel relevante, enquanto em Ivinhema, características climáticas locais, como baixo índice de precipitação, podem ser determinantes (Borsato; Massoquim, 2020).

Tabela 2. Médias mensais de umidade relativa do ar no período de 2019 a 2023 para os municípios de Divinópolis (MG), Niterói (RJ) e Ivinhema (MS).

| Local | Umidade relativa do ar (%) | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
| Divinópolis | 79,53 | 82,42 | 76,29 | 77,47 | 75,87 | 73,72 | 65,81 | 61,12 | 55,93 | 69,59 | 74,40 | 79,86 |
| Niterói | 72,12 | 77,56 | 74,02 | 77,16 | 76,79 | 78,83 | 74,27 | 75,41 | 74,47 | 78,46 | 76,84 | 76,76 |
| Ivinhema | 67,75 | 67,33 | 63,71 | 61,67 | 60,97 | 65,67 | 56,07 | 52,92 | 52,59 | 60,24 | 55,78 | 62,51 |

No município de Divinópolis, a UEM mínima determinada foi de 10,16% em setembro, enquanto a máxima foi de 16,91% em fevereiro. Em Niterói, a umidade mínima foi de 13,51%, em janeiro, e máxima de 15,67%, em junho. No município de Ivinhema, por sua vez, as mínimas foram de 9,60%, em setembro, e as máximas de 12,49%, em janeiro. A umidade de equilíbrio para os municípios de Divinópolis, Niterói e Ivinhema foram respectivamente 14,05 % \pm 2,04; 14,66 % \pm 0,63 e 11,09 % \pm 0,98. Os valores médios mensais de UEM estão apresentados na Figura 1.

Figura 1. Valores de Umidade de Equilíbrio da Madeira (UEM) obtidos mensalmente entre os anos de 2019 e 2023.



Os teores de umidade da madeira na faixa de 12% sugerem UEM obtidas em condições climáticas ajustadas, enquanto valores em torno 15%, são condições que ocorre em diversas regiões geográficas do Brasil (Moreschi, 2014). Nos municípios de Ivinhema e Niterói, os valores na faixa de 12% ocorrem nos meses mais secos, enquanto os valores aproximados de 15% são observados nos meses mais chuvosos. Como observado por Mascarenhas *et al.* (2020) para o estado de

Rondônia, na região Norte do país, maiores valores de UEM são encontrados em períodos mais chuvosos, enquanto nos períodos secos esses tendem a ser menores. Esta variação tem uma relação direta com a URA e a temperatura, pois em tempos chuvosos, a umidade tende a ser maior e a temperatura mais amena, assim a madeira adsorve maiores quantidades de água do ar atmosférico, o que eleva a UEM. A situação se inverte sob condições mais quentes e secas, como no município de Ivinhema.

Em regiões com altitudes mais elevadas, podem existir condições climáticas distintas que influenciam a URA e outros aspectos do clima, tais como pressão atmosférica e temperatura ambiente (Miranda, 2012). Essas variações são fundamentais para a indústria da madeira, pois influenciam diretamente nas características de estabilidade dimensional e durabilidade do material em diferentes ambientes climáticos.

A partir dos valores de UEM obtidos, evidenciou-se a maior variabilidade desta umidade no município de Divinópolis (6,75% de amplitude), onde a URA varia mais entre os meses, proporcionando menor estabilidade dimensional para produtos madeireiros. Mascarenhas *et al.* (2020) sugerem intervenções para manter a UEM estável ao longo do ano, como programas de secagem e aplicação de revestimentos como vernizes e resinas no acabamento da madeira, reduzindo assim essas variações.

Outro aspecto importante é a adoção de programas de secagem adequados para cada região, prevendo as alterações das condições climáticas destes locais durante o ano, visando obtenção de madeiras com teores de umidade adequadas para cada localidade. Nesse sentido, a secagem ao ar livre pode resultar em uma UEM variável, pois não existe controle de temperatura e URA, dependendo exclusivamente das condições climatológicas locais. Assim, estes resultados podem ser aproveitados para determinar períodos mais propícios para secagem das madeiras ao ar em cada localidade.

Dessa maneira, por meio da secagem artificial é possível se obter um controle mais preciso do processo de secagem, permitindo alcançar UEM mais estáveis e de forma otimizada. Essas informações podem inferir necessidades de recorrer à secagem artificial devido ao longo tempo de secagem ao ar livre, bem como pela dependência de conhecer a umidade de equilíbrio do local para determinar o uso final da madeira, que muitas vezes não se consegue madeiras nas umidades ideais

a partir da secagem ao ar livre. Além disso, a redução da umidade diminui a massa da madeira reduzindo os custos de transporte, também previne defeitos da madeira e atribui mais valor agregado.

4. CONCLUSÃO

A umidade de equilíbrio média a ser alcançada pela madeira exposta às condições climáticas encontradas nos municípios de Divinópolis, Niterói e Ivinhema foram, respectivamente $14,05\% \pm 2,04$; $14,66\% \pm 0,63$ e $11,09\% \pm 0,98$. As variações climáticas observadas demandam uma compreensão detalhada das características específicas de cada região, orientando a seleção dos processos de secagem e na logística de transporte entre diferentes localidades, baseando-se nas propriedades de retratibilidade das madeiras e projeções de sobremedidas das peças. Tal abordagem não apenas reduz os custos, mas também aprimora a qualidade e a estabilidade da madeira ao longo de sua utilização em diversos contextos.

5. REFERÊNCIAS

- ARAUJO, H. J. B. Caracterização do material madeira. *In*: SEABRA, G. (org.). **Educação ambiental: o desenvolvimento sustentável na economia globalizada**. Ituiutaba: Barlavento, 2020. p. 31-44
- BARAÚNA, E. E. P.; NUNES, S. M. V.; NUNES, R. F.; *et al.* Umidade de equilíbrio da madeira de *Eucalyptus* spp. para o município de Montes Claros, Minas Gerais. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**. v. 11, n. 9, e15711931160, 2022.
- BORSATO, V. A.; MASSOQUIM, N. G. Os movimentos, as áreas de atuação e as propriedades das massas de ar no Brasil. **Revista GEOMAE**. v. 11, n. 1, p. 27-56, 2020.
- COSTA, N.; THEBALDI, M. S.; RODRIGUES, K. V. Estimativa da evapotranspiração potencial provável em Divinópolis–MG–Brasil. **Revista de Ciências Ambientais**. v. 15, n. 3, p. 1-14, 2021.
- FRANCA, R. R. da. Climatologia das chuvas em Rondônia–período 1981-2011. **Revista Geografias**. v. 11, n. 1, p. 44-58, 2015.
- HAILWOOD, A. J. & HARROBIN, S. 1946. Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. **Transactions of the Faraday Society**. v. 42, n. 1, p. 84-102, 1946.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Dados históricos anuais. Brasília: INMET, 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 28, Jun., 2024.

IVASKO JR., S.; MASTELLA, A. D. F.; TRES, A. *et al.* Classificação do estado de Mato Grosso do Sul segundo sistema de zonas de vida de Holdridge. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 26, 2021, p. 629-645, 2020.

MAC, G. E. M.; SILVA, V. L. T. C.; BISPO, G.M.; *et al.* Comunidade macrobentônica de costões rochosos de duas praias do município de Niterói-RJ. **Revista Semioses**. v. 10, n. 2, p. x-x, 2016.

MASCARENHAS, A. R. P.; GHILARDI, D. S.; MELO, R. R. Geotecnologias aplicadas ao zoneamento sazonal da umidade de equilíbrio da madeira em Rondônia, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**. v. 43, p. 119-127, 2020.

MIRANDA, R. A. C. Climatologia geográfica. Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2012.

MORESCHI, J. C. Propriedades tecnológicas da madeira. Curitiba: UFPR, 2014.

PIMENTEL, L. C. G., MARTON, E., SILVA, M. S. da., JOURDAN, P. Caracterização do regime de vento em superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.19, n. 2, p. 121–132, 2014.

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