



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

LARISSA CARVALHO DE OLIVEIRA LIMA

**ESTIMATIVA DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICA DA MADEIRA
PARA O ESTADO DO MARANHÃO**

Imperatriz- MA

2022

LARISSA CARVALHO DE OLIVEIRA LIMA

**ESTIMATIVA DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICA DA MADEIRA
PARA O ESTADO DO MARANHÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Joabel Raabe

Imperatriz – MA

2022

L732e

Lima, Larissa Carvalho de Oliveira

Estimativa da umidade de equilíbrio higroscópica da madeira para o estado do Maranhão. / Larissa Carvalho de Oliveira Lima. – Imperatriz, MA, 2022.

35 f.; il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Florestal) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Imperatriz, MA, 2022.

1. Madeira. 2. Umidade de equilíbrio higroscópica. 3. Estações meteorológicas. 4. Imperatriz - MA. I. Título.

CDU 630.116:551.571(812.1)

LARISSA CARVALHO DE OLIVEIRA LIMA

**ESTIMATIVA DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICA DA MADEIRA
PARA O ESTADO DO MARANHÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Aprovado em: 29/08/2022

BANCA EXAMINADORA



Joabel Raabe
Doutor em Ciências Florestais
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão
– UEMASUL
(Orientador)



Michael Douglas Roque Lima
Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão
– UEMASUL
(Membro)



Cristiane Matos da Silva
Mestra em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão
– UEMASUL
(Membro)

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me direcionado e capacitado para que eu conseguisse chegar até aqui com saúde e me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo do curso com sabedoria.

À minha família, em especial meus pais, Wendell e Sharlene por todo amor, incentivo, compreensão quando precisei estar ausente e apoio desde o primeiro dia.

Ao meu noivo, Eduardo Aurélio, por sempre me apoiar e acreditar no meu potencial, pela ajuda nos momentos difíceis e incentivo durante todo o curso e na conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos da graduação, Amanda, Danielly, Gabriel, Leonel e Natasha, que convivi durante estes últimos anos, que sempre estiveram ao meu lado dando apoio, pelo companheirismo, amizade e estarem sempre de braços abertos para me acolher e ajudar.

À minha amiga, Danielly Gois, pelo auxílio e apoio no desenvolvimento da pesquisa e outros projetos durante a graduação.

Ao meu orientador, professor Dr. Joabel Raabe, pela orientação, conhecimento repassado, apoio e pela paciência durante a elaboração deste trabalho.

À professora Jaqueline Macedo, pela ajuda e orientação nas análises dos dados obtidos.

À Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão pela oportunidade concedida para a realização deste curso.

RESUMO

Devido sua característica higroscópica, a madeira tem capacidade de estabelecer relação de equilíbrio com a umidade relativa do ambiente em que está exposta, dando origem a um importante parâmetro físico, a umidade de equilíbrio higroscópica da madeira (UEH). O presente trabalho teve como objetivo estimar a UEH da madeira para o Estado do Maranhão. Para isso, foram utilizados dados médios mensais de umidade relativa do ar e temperatura entre os anos de 2010 e 2019 de estações meteorológicas automáticas distribuídas nas cinco regiões geográficas intermediárias do Maranhão, obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A UEH foi estimada por meio da equação matemática de Simpson, para cada mês do ano e para cada região geográfica intermediária do Estado. Foram feitas duas análises estatísticas para os dados de UEH utilizando um delineamento experimental inteiramente ao acaso (DIC). Os dados foram submetidos à análise de variância com a finalidade de averiguar se a UEH difere entre os meses do ano e entre as estações presentes no Estado do Maranhão. Na primeira análise, observou-se que os valores de UEH da madeira diferem significativamente entre os municípios onde se encontram as estações meteorológicas. Para a segunda análise, o teste de comparação de médias mostrou que a UEH da madeira é estatisticamente diferente entre alguns meses do ano. Observou-se ainda, que a UEH da madeira, estimada para o Estado do Maranhão é de 12,2%. As menores médias mensais de UEH da madeira para as regiões ocorrem em setembro ou ainda, com postergação para outubro (Região Caxias), enquanto as maiores ocorrem entre março e abril.

Palavras-chave: Equação de Simpson. Estações Meteorológicas. Temperatura.

ABSTRACT

Wood has the ability to establish an equilibrium relationship with the relative humidity of the environment in which it is exposed, due to its hygroscopic characteristic, giving rise to an important physical parameter, the equilibrium moisture content of wood (EMC). The present work aimed to estimate the EMC of wood for the State of Maranhão. For this, average monthly data on relative air humidity and temperature between 2010 and 2019 from automatic weather stations distributed in the five intermediate geographic regions of Maranhão were obtained from the website of the National Institute of Meteorology (INMET). The EMC was estimated through the mathematical equation by Simpson's method, for each month of the year and for each intermediate geographic region of the state. Two statistical analyzes were performed for the EMC data using a completely randomized design (CRD). The data were submitted to analysis of variance to determine whether the EMC differs between the months of the year and between the stations present in the State of Maranhão. In the first analysis, it was observed that the values of EMC of the wood differ significantly between the municipalities where the meteorological stations are located. For the second analysis, the comparison of averages test showed that the EMC of wood is statistically different between a few months of the year. It was also observed that the EMC of wood, estimated for the State of Maranhão is 12.2%. The lowest monthly averages of wood EMC for the regions occur in September or even, with postponement to October (Caxias Region), while the highest occur between March and April.

Keywords: Simpson's equation. Weather Stations. Temperature.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição das estações meteorológicas automáticas nas Regiões Geográficas Intermediárias do Estado do Maranhão, conforme divisão do IBGE ano 2017.....	18
Figura 2 - Distribuição da média anual da UEH da madeira (em %) para os diferentes municípios do Estado de Maranhão.....	21
Figura 3 - Médias mensais da UEH da madeira (em %) para a Região de Imperatriz..	24
Figura 4 - Médias mensais da UEH da madeira (em %) para a Região de Caxias.....	25
Figura 5 - Médias mensais da UEH da madeira (em %) para a Região de Presidente Dutra.....	26
Figura 6 - Médias mensais da UEH da madeira (em %) para a Região de Santa Inês-Bacabal.....	27
Figura 7 - Médias mensais da UEH da madeira (em %) para a Região de São Luís....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo da ANAVA considerando as regiões intermediárias	20
Tabela 2 -Valores mínimos, médios e máximos anuais de UEH da madeira para as diferentes regiões geográficas intermediárias do Estado do Maranhão	22
Tabela 3 -Tabela da ANAVA para os dados médios da Região São Luís	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo Geral	11
2.2 Objetivos Específicos	11
3 REVISÃO DE LITERATURA	12
3.1 Umidade de equilíbrio higroscópico (UEH)	12
3.2 Determinação da UEH	12
3.3 Equações matemáticas para determinação da UEH	13
3.4 Importância da determinação da UEH	15
4 METODOLOGIA	17
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
5.1 UEH para o Estado do Maranhão	20
5.2 UEH para as regiões geográficas intermediárias do Maranhão	23
6 CONCLUSÃO	30
REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material orgânico, de estrutura complexa e heterogênea (SILVA, 2006). Possui propriedades e características importantes, tais como cor, cheiro, grã, textura, brilho, resistência mecânica, densidade variada e higroscopia (capacidade de adsorção e dessorção de umidade). A sensibilidade em ganhar e perder água, pode influenciar suas propriedades mecânicas, a trabalhabilidade, seu comportamento durante a secagem, o acabamento e sua durabilidade, o que faz desta característica uma das mais importantes no estudo da madeira (DE MELO, 2014).

Em virtude da higroscopicidade, a madeira é capaz de estabelecer uma relação de equilíbrio com a umidade relativa do ambiente em que está exposta. Isso dá origem a um importante parâmetro físico, a umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) da madeira. Segundo Skaar (1972), esse parâmetro é influenciado por inúmeros fatores, como o tempo de exposição às condições ambientais, espécie, composição química e anatômica da madeira, tensões mecânicas e densidade básica. Entretanto, os fatores ambientais podem ser considerados os principais influenciadores da UEH.

Na concepção de Hoyle (1972), a umidade relativa do ar é um dos fatores ambientais que mais afeta as propriedades físicas e mecânicas da madeira em uso. Concomitantemente, a temperatura também afeta igualmente tais propriedades, porque sua variação afeta diretamente a umidade relativa do ar (TSOUMIS, 1991). Assim, a umidade relativa do ar e a temperatura, podem ser considerados os principais parâmetros meteorológicos com influência direta na UEH.

Nessa perspectiva, cada região geográfica do globo terrestre possui uma UEH específica que sofre interferência direta da temperatura e da umidade relativa do ar e pode ser determinada ou estimada. A maioria dos modelos de estimativa da UEH baseia-se na teoria da sorção de água na madeira proposta por Hailwood e Harrobin (1946), considerando um ou dois hidratos (MARTINS et al., 2003; BARAÚNA; OLIVEIRA, 2009; PÉREZ-PENA et al., 2011). De acordo com Galvão (1975), o método desenvolvido por Simpson (1971), com base na teoria da adsorção de Hailwood e Harrobin (1946), permite calcular a UEH em função da temperatura e umidade relativa do ar.

Dessa forma, o estado do Maranhão nos últimos anos, vem contribuindo significativamente para o desenvolvimento do setor florestal nacional, principalmente com a chegada e instalação de grandes empresas. Nesse sentido, as regiões

geográficas intermediárias do Maranhão mostraram suas potencialidades, tornando-se um importante seleiro madeireiro e contribuindo para o crescimento econômico do estado e do país.

Diante disso, fica evidente a necessidade e a importância de estudar e estimar a UEH da madeira para o Estado do Maranhão. Na literatura há uma lacuna de estudos que descrevem e estabelecem a UEH para esse estado e suas regiões intermediárias, o que justifica a realização desse estudo para estimar esse importante parâmetro físico da madeira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estimar a umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) da madeira para o Estado do Maranhão.

2.2 Objetivos Específicos

Estimar a umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) da madeira para as diferentes regiões intermediárias do Maranhão.

Avaliar a sazonalidade da UEH da madeira para as diferentes regiões.

Indicar os períodos sazonais mais adequados para processos de secagem da madeira.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Umidade de equilíbrio higroscópico (UEH)

A higroscopicidade é uma característica física da madeira e está diretamente associada a sua composição química. Esse aspecto faz com que a madeira seja capaz de estabelecer uma relação de equilíbrio com a umidade relativa do ar do ambiente em que está exposta. Isso dá origem a um importante parâmetro físico, a umidade de equilíbrio higroscópico da madeira (UEH).

A umidade da madeira interfere nas suas características tecnológicas e, conseqüentemente, nos processos de transformação e utilização da madeira, com destaque aos tratamentos de preservação, secagem e colagem, na fabricação de painéis, na produção de carvão vegetal e no processamento mecânico (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A maior interferência da umidade está associada a sorção e dessorção de água da madeira abaixo do seu ponto de saturação das fibras – PSF (~28%). Isso provoca instabilidade dimensional nos três planos de corte da madeira e, conseqüentemente podem promover defeitos irreversíveis na madeira, ao ponto de comprometer seu uso. Portanto, estudos que permitam avaliar o comportamento quanto a UEH da madeira são relevantes para a indústria madeireira.

3.2 Determinação da UEH

A UEH da madeira pode ser determinada por diferentes métodos. A determinação da umidade da madeira é uma pré-condição para utilizar a madeira de forma racional, pois ela afeta as propriedades importantes deste material e ela pode ser medida por vários métodos como: o método de determinação por meio de estufas e por meio de medidores elétricos (RODRIGUES, 1999).

Deste modo, a determinação pode ser realizada por meio da exposição (direta ou não) de amostras de madeira em ensaios de campo (PÉREZ-PEÑA et al., 2011; CASSIANO et al., 2013) ou em ensaios com câmaras climatizadas que apresentam condições controladas de temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR) (BARAÚNA; OLIVEIRA, 2009).

Já a estimativa da UEH pode ser efetuada por meio de modelos matemáticos previamente definidos (BARONASA et al., 2001; MENDES; ARCE, 2003; CHEN et al., 2009). O modelo mais utilizado para estimar a UEH da madeira é por meio do método desenvolvido por Simpson (1971), baseado na teoria da adsorção de Hailwood e Horrobin (1946).

3.3 Equações matemáticas para determinação da UEH

AUEH estimada por equações é uma importante referência no processo de secagem de madeira, especialmente no controle do processo de secagem ao ar livre (MENDES et al., 1996; MENDES et al., 1999).

Diante disso, várias teorias foram formuladas para estimar a UEH considerando as variações de temperatura e umidade relativa do ar. Skaar (1972), descreveu equações que foram desenvolvidas a partir das teorias de sorção de Hailwood e Harrobin (de um ou dois hidratos), Bradley, BET (Brunauer, Emmet & Teller). A seguir serão apresentadas as equações:

Hailwood e Harrobin (equação de um hidrato)

$$UEH = \left[\frac{K_1 K_2 H}{1 + K_1 K_2} + \frac{K_2 H}{1 - K_2 H} \right] \cdot \frac{1800}{W} \quad (1)$$

Em que:

$$UEH = \text{umidade de equilíbrio higroscópico da madeira (\%)}; \quad (2)$$

$$K_1 = 3,730 + 0,03642 T - 0,000154 T^2; \quad (3)$$

$$K_2 = 0,6740 + 0,001053 T - 0,000001714 T^2; \quad (4)$$

$$W = 216,9 + 0,01961 T + 0,005720 T^2;$$

T = temperatura (°F)

H = pressão relativa de vapor d'água (U / 100)

Hailwood e Harrobin (equação de dois hidratos)

$$UEH = \left[\frac{K \cdot H}{1 - K \cdot H} + \frac{K \cdot H \cdot K1 + 2K1 \cdot K2 \cdot K^2 \cdot H^2}{1 + K \cdot H \cdot K1 + K1 \cdot K2 \cdot K^2 \cdot H^2} \right] \cdot \frac{1800}{W} \quad (5)$$

Em que:

$$UEH = \text{umidade de equilíbrio higroscópico da madeira (\%)}; \quad (6)$$

$$K = 0,791 + 0,000463 T - 0,000000844 T^2; \quad (7)$$

$$K1 = 6,34 + 0,000775 T - 0,0000935 T^2; \quad (8)$$

$$K2 = 1,09 + 0,0284 T - 0,0000904 T^2; \quad (9)$$

$$W = 330 + 0,452 T + 0,00415 T^2;$$

T = temperatura (°F).

H = pressão relativa de vapor d'água (U/100).

Bradley

$$\ln\left(\frac{1}{H}\right) = K2 \cdot K1^{UEH} + K3 \quad (10)$$

$$\text{Em que:} \quad (11)$$

$$K1 = 0,849 - 0,000236 T; \quad (11)$$

$$K2 = 3,64 + 0,00316 T - 0,0000482 T^2; \quad (12)$$

$$K3 = 0,00949 - 0,0000456 T; \quad (13)$$

UEH = umidade de equilíbrio higroscópico da madeira (%);

T = temperatura (°F).

H = pressão relativa de vapor d'água (U/100).

BET

$$UEH = \left[\left(\frac{Wm \cdot C \cdot H}{1 - H} \right) \cdot \left(\frac{1 - [n + 1] \cdot H^n + n \cdot H^{n+1}}{1 + [C - 1] \cdot H - C \cdot H^{n+1}} \right) \right] \quad (14)$$

Em que:

UEH = umidade de equilíbrio higroscópico da madeira (%);

$W_m = 7,4 - 0,020 T$ (Umidade quando o teor de adsorção monomolecular está 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 ($^{\circ}F$);

H = pressão relativa de vapor d'água ($U / 100$).

O modelo de Simpson (1971) e/ou de Hailwood e Harrobin de um hidrato tem sido empregado na confecção das tabelas e/ou mapas de UEH disponíveis para muitas cidades do Brasil (FIORESI et al., 2014). Esse modelo tem sido um dos mais utilizados pois permite obter UEH em função da temperatura e da umidade relativa do ar, e estima, em média, valores estatisticamente iguais e intermediários.

3.4 Importância da determinação da UEH

Um estudo desenvolvido pelo Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC), mostra que, no ano de 2018, o Maranhão produziu cerca de 569 milhões de reais em atividades silviculturais e obteve o oitavo maior valor de produção do Brasil (IMESC, 2020). Isso demonstra a importância econômica do setor florestal para o Estado do Maranhão, gerando emprego e renda, alavancando efetivamente o desenvolvimento da economia e a produção de bens e serviços.

Nessa perspectiva, estudos que visam o desenvolvimento tecnológico do setor podem ser considerados prioritários, pois podem garantir o crescimento ascendente do setor. Pesquisas que propõem a melhoria e otimização dos processos e das técnicas de produção, afim de aumentar a qualidade, capacidade produtiva e a vida útil da madeira e seus subprodutos, são cada vez mais frequentes. Por isso, conhecimentos básicos como da UEH da madeira tornam-se necessários e imprescindíveis no atual cenário mundial, onde se busca proteção e conservação dos recursos naturais.

O conhecimento da UEH da madeira pode contribuir, mesmo que de forma indireta, para redução do desmatamento das florestas naturais. Tal conhecimento auxilia o setor madeireiro na melhoria dos processos de desdobro primário e secundário, dos processos de secagem onde novos protocolos podem ser sugeridos

e armazenamento adequados da madeira evitando defeitos e desperdícios ocasionados pela falta desse conhecimento (CASSIANO et al., 2013).

Portanto, estimar a UEH da madeira para diferentes regiões do Estado pode auxiliar e servir de base de conhecimento para os diferentes setores da produção madeireira. Possibilitando o aumento da qualidade dos produtos madeireiros gerados no Estado e impulsionar o setor, bem como promover e incentivar outras pesquisas que visem aumentar a qualidade, a durabilidade, a eficiência e a amplitude da aplicação da madeira.

4 METODOLOGIA

O estudo foi realizado considerando todo estado do Maranhão, que segundo a classificação de Köppen-Geiger, apresenta dois climas diferentes (*Aw* e *Am*), ou seja, clima tropical com inverno seco, apresenta estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e estação seca no inverno, de maio a outubro (sendo julho o mês mais seco) (CLIMATE-DATA, 2020).

Para estimar a umidade de equilíbrio higroscópico da madeira para o Estado do Maranhão foram utilizados dados médios mensais de umidade relativa do ar e temperatura, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e coletados entre os anos de 2010 e 2019 (de estações meteorológicas automáticas distribuídas nas cinco regiões geográficas intermediárias do Estado. O período de 2010 a 2019 foi definido em função da disponibilidade dos dados no site do INMET (<https://portal.inmet.gov.br/>). As regiões geográficas intermediárias do Maranhão foram definidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), conforme identificadas no mapa (Figura 1).

Figura 1 - Distribuição das estações meteorológicas automáticas nas Regiões Geográficas Intermediárias do Estado do Maranhão, conforme divisão do IBGE ano 2017.



Fonte: Dados IBGE (2017) adaptado pela autora (2022).

Além de estimar a UEH para cada mês do ano para o Estado do Maranhão, também foi estimada a UEH para cada região geográfica intermediária (Imperatriz, Presidente Dutra, Caxias, Santa Inês – Bacabal e São Luís – ver Figura 1). Para isso, foram utilizadas médias aritméticas dos dados mensais de temperatura e umidade relativa do ar, no período de 2010 a 2019, das estações correspondentes de cada região.

A estimativa da UEH foi realizada pelo método de Simpson (1971). Esse método baseia-se na teoria da adsorção de Hailwood e Horrobin (1946) e permite obter UEH em função da temperatura e da umidade relativa do ar, conforme equações 15, 16, 17 e 18.

$$UEH = \left[\frac{K_1 K_2 H}{1 + K_1 K_2} + \frac{K_2 H}{1 - K_2 H} \right] \cdot \frac{1800}{W} \quad (15)$$

$$K_1 = 4,737 + 0,04773 T - 0,00050123 T^2 \quad (16)$$

$$K_2 = 0,705941 + 0,001698 T - 0,000005553 T^2 \quad (17)$$

$$W = 223,384 + 06942 T + 0,0185324 T^2 \quad (18)$$

Em que: UEH = umidade de equilíbrio da madeira (%); H = pressão de vapor relativa ($UR \cdot 100^{-1}$); W = peso molecular da unidade polimérica que forma o hidrato; K_1 e K_2 são constantes de equilíbrio, obtidas em função da temperatura diária (T, em °C).

A partir dessa equação, foi calculado o valor médio da UEH da madeira com base nos dados de umidade relativa (%) e de temperatura (°C) para cada estação e meses do ano. Os dados médios mensais de UEH da madeira foram submetidos à análise de variância (ANAVA). Foram feitas duas análises estatísticas para os dados de UEH utilizando um delineamento experimental inteiramente ao acaso (DIC).

A primeira análise considerou 16 tratamentos (estações) e 10 repetições (UEH médio para cada ano do período de 2010 à 2019) para avaliar a existência de diferença significativa na UEH anual entre as estações meteorológicas, distribuídas nas diferentes regiões do Estado.

A segunda análise foi feita para avaliar a existência de diferença significativa na UEH entre os meses do ano para cada região geográfica do Estado. Nesta segunda análise, a região de Imperatriz foi composta por 12 tratamentos (meses do ano) e 8 repetições (estações), a região de São Luís foi composta por 12 tratamentos (meses do ano) e 5 repetições (estações). Já as demais regiões foram composta por 12 tratamentos (meses do ano) e 10 repetições (período de 2010 a 2019)

Para a análise de variância, os dados foram testados quanto a normalidade dos resíduos por meio de teste de Kolmogorov – Smirnov e a a homocedasticidade das variâncias por meio do teste de Levene, ambos ao nível de 5% de significância. Nos casos de comprovada a normalidade dos resíduos, os dados de UEH da madeira foram submetidos à ANAVA e as comparações das médias foi realizada pelo teste de Tukey a 5% de significância. Não comprovada a normalidade dos dados e a homocedasticidade, foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis e as comparações pelo método de Dunn, ambos a 5% de significância. As análises estatísticas foram processadas no software Action Stat 3.7 e Bioestat 5.0.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 UEH para o Estado do Maranhão

Segundo o IBGE (2017), o Estado do Maranhão é dividido em 5 regiões geográficas intermediárias (Imperatriz, Presidente Dutra, Caxias, Santa Inês – Bacabal e São Luís). Dentro dessas regiões, conforme consta no INMET (2022), existem 16 estações meteorológicas automáticas distribuídas aleatoriamente em todas as regiões do Estado. Vale destacar que o número de estações é diferente para cada região geográfica intermediária, o que impossibilitou uma análise estatística para avaliar se há diferença entre a UEH da madeira estimada para cada região.

Estas estações registram, dentre outros parâmetros, a temperatura e umidade relativa do ar de hora em hora. Nesse sentido, aplicando esses dados gerados pelas 16 estações, durante o período de 2010 a 2019, na equação de Simpson, foi possível estimar que a UEH da madeira para o Estado no Maranhão é de 12,2%, valor considerado favorável para a secagem da madeira ao ar livre (SOUZA et al., 2016). No entanto, é preciso destacar que cada região ou município, podem apresentar valores de UEH da madeira maiores ou menores do que o estimado para o Estado, tendo em vista diferenças em relação a localização geográfica, que refletem em diferenças de condições meteorológicas.

O valor médio de UEH para as regiões intermediárias variou de 8,1 (Grajaú/2018) a 17,7% (São Luís/2012). Isso indica grande amplitude na variação do valor de UEH da madeira para os diferentes municípios localizados em distintas regiões no Estado do Maranhão.

A ANAVA (Tabela 1) demonstrou que os valores de UEH da madeira diferem significativamente entre os municípios onde se encontram as estações meteorológicas.

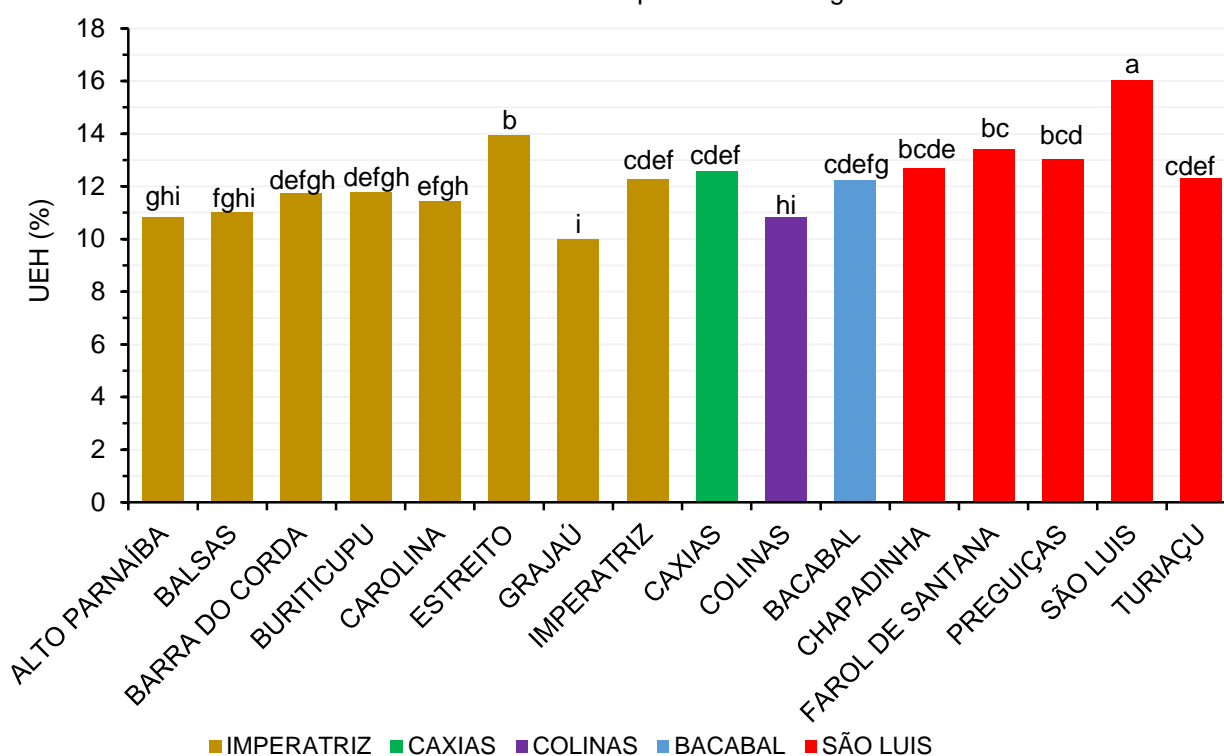
Tabela 1 – Resumo da ANAVA considerando as regiões intermediárias.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Tratamento estações	15	294,407	19,627	25,087	5,84E-32
Resíduos	136	106,4	0,782		

Fonte: Autora (2022).

A Figura 2 apresenta os valores médios de UEH da madeira para os municípios onde se encontram as estações meteorológicas automáticas. Observa-se que os maiores valores médios anuais de UEH foram estimados para os municípios de São Luís e Estreito (16,0% e 13,9%, respectivamente). Por outro lado, nos municípios de Grajaú, Colinas e Alto Parnaíba estimaram-se os menores valores médios anuais de UEH da madeira, aproximadamente 10%.

Figura 2 - Distribuição da média anual da UEH da madeira (em %) para os diferentes municípios do Estado de Maranhão. Barras de cores semelhantes representam as regiões intermediárias do Maranhão.



Legenda: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Fonte: Dados INMET (2022) adaptado pela autora (2022).

Diante desse quadro, esse comportamento pode estar associado a alguns aspectos e características da localização geográfica dos municípios, como por exemplo, proximidade destes municípios com o oceano (São Luís) e com o Rio Tocantins (Estreito), que tendem a apresentar maiores teores de umidade relativa do ar interferindo diretamente na estimativa dos valores de UEH da madeira. Por outro lado, os demais municípios que apresentaram menores valores, estão mais próximos da região do semiárido, onde as temperaturas tendem a ser mais elevadas e a umidade relativa do ar mais baixa, podendo exercer influência as principais variáveis utilizadas para estimar a UEH da madeira.

Além disso, vale ressaltar que a estação do município de Grajaú apresentou falhas que resultaram no não registro dos dados de temperatura e umidade relativa do ar em alguns meses dentro do período avaliado. Isso pode ter influenciado a estimativa da UEH da madeira para este município.

Quando analisa-se os dados médios da UEH da madeira estimada para cada região geográfica intermediária (Tabela 2), observa-se que a região de São Luís apresenta a maior média anual (13,5%) e a região de Presidente Dutra a menor média anual (10,8%).

Tabela 2 – Valores mínimos, médios e máximos anuais de UEH da madeira para as diferentes regiões geográficas intermediárias do Estado do Maranhão.

Regiões geográficas intermediárias	Min.	Média	Max.
	-----%-----		
Região de Imperatriz	8,1	11,6	15,8
Região de Caxias	11,9	12,6	13,5
Região de Presidente Dutra	8,6	10,8	12,4
Região de Santa Inês- Bacabal	11,1	12,2	14,3
Região de São Luís	10,7	13,5	17,7

Fonte: Autora (2022).

Considerando os valores de mínima e máxima anual, as regiões de Imperatriz e São Luís apresentam uma grande amplitude na variação da UEH (aproximadamente 7%). Isso indica que nessas regiões a madeira apresenta maior instabilidade dimensional, quando comparada as demais regiões, o que pode provocar problemas na sua utilização. Martins et al. (2003) apontam que quando a madeira em uso é exposta as variações sazonais de temperatura (T) e umidade (U), esta sofre alterações na sua estrutura e essas alterações são mais acentuadas em diferentes períodos do ano.

Galvão (1981) relata que a instabilidade dimensional da madeira, em virtude da variação da umidade, causada pelas oscilações climáticas, provoca sérios problemas como, tacos de assoalho que empenam e se soltam, portas que não fecham, gavetas travadas, peças que descolam ou racham, entre outros.

Em vista disso, é importante destacar que ter o conhecimento dessas variações ao longo do ano nas regiões é de suma importância. De modo que, seja possível

explicar o comportamento da madeira, em suas aplicações nas diferentes regiões do Estado. Propiciando estratégias na tentativa de reduzir e ter um melhor controle sobre as variações dimensionais que ocorrem na madeira, pois esta pode resultar em problemas com retratibilidade, empenamento, torções, rachaduras, inchamento, apodrecimento e armazenamento (CASSIANO et al., 2013).

Estudos apontam que UEH da madeira inferior a 15% refletem as melhores condições para secagem da madeira ao ar livre. Ao mesmo tempo em que madeiras em uso em regiões com UEH superior a 15% tem sua estabilidade dimensional comprometida, podendo ocasionar prejuízos a suas diferentes formas de aplicação (JANKOWSKY et al., 1986; SOUZA et al., 2016).

Jankowsky et al. (1986) estimando a UEH da madeira para cidades da região do Sul do Brasil, relataram que municípios com UEH superior a 15% não favorecem a secagem da madeira ao ar livre, pelo fato da madeira exposta dificilmente atingir umidades inferiores a esse valor, o que acaba resultando em problemas como retratibilidade em lugares com clima mais seco.

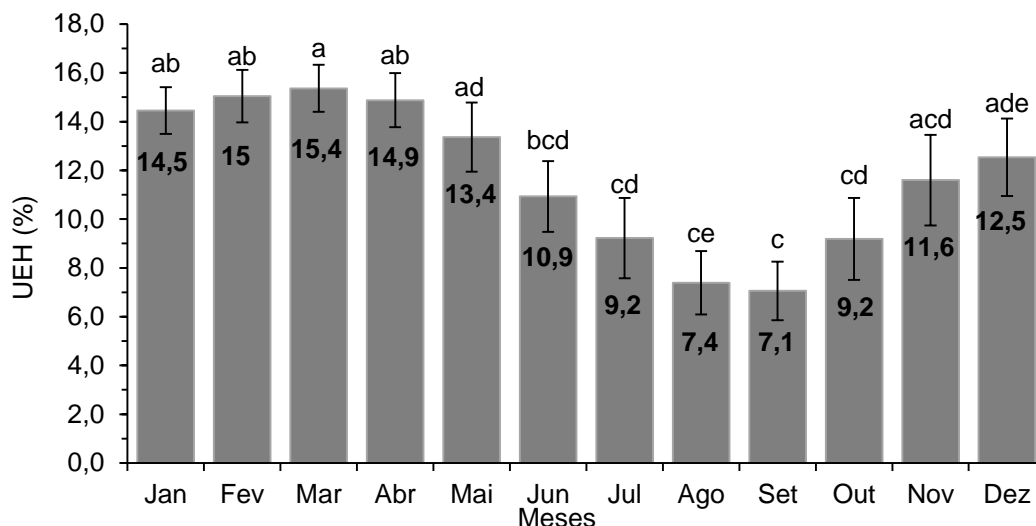
Partindo dessa premissa, embora haja uma amplitude considerável nos valores estimados de UEH da madeira para as distintas regiões geográficas, especialmente para região de Imperatriz e São Luís, o território do Estado do Maranhão apresenta boas condições climáticas para secagem natural da madeira. Adicionalmente, percebe-se que a UEH média estimada para as diferentes regiões geográficas do Estado encontram-se próximo do percentual de umidade indicado para o uso da madeira (entre 12 e 15%).

5.2 UEH para as regiões geográficas intermediárias do Maranhão

Os resultados referentes a segunda análise estatística utilizada para observar se existe diferença significativa entre as médias de UEH de cada mês do ano, mostraram que os dados não atenderam aos pressupostos de normalidade e homogeneidade, para as regiões de Imperatriz, Caxias, Presidente Dutra e Santa Inês-Bacabal. Para isso, foi feito o teste de Kruskal-Wallis a 5% de significância, onde observou-se que existe diferença significativa entre os valores médios de UEH para cada mês do ano. Assim, realizou-se o teste de comparação par a par pelo método de Dunn a 5% de significância, a fim de verificar em quais meses do ano os valores médios de UEH foram diferentes estatisticamente.

A Figura 3 apresenta os valores médios mensais de UEH da madeira da região de Imperatriz. Observa-se que os valores referentes aos meses do ano possuem diferença estatística entre si, embora esta diferença não seja para todos os meses.

Figura 3 – Médias mensais da UEH da madeira (em %) para a Região de Imperatriz.



Legenda: Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo método de Dunn a um nível de significância de 0,05.

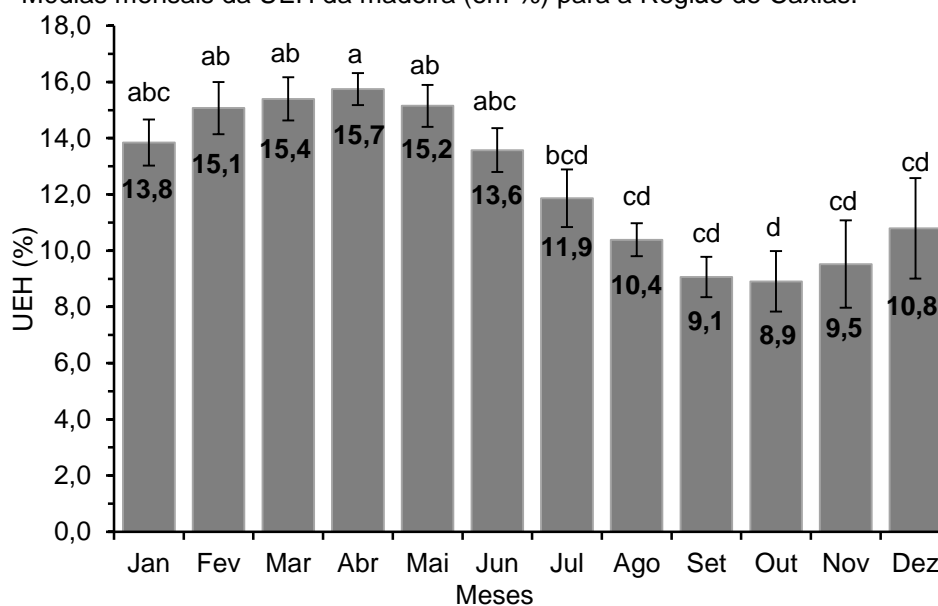
Fonte: Dados INMET (2022) adaptado pela autora (2022).

Verifica-se ainda, que dentro dos meses que correspondem ao período chuvoso (novembro a maio) não foi detectado diferença estatística entre os valores de UEH da madeira. O mesmo comportamento foi detectado para os meses que correspondem ao período seco (junho a outubro). Adicionalmente, nota-se diferença estatística entre os valores médios mensais de UEH entre os meses que compreendem os períodos chuvoso e seco.

No período correspondente a seca, ocorreram variações da UEH entre 7,1% a 10,9% com menor amplitude quando comparado ao período chuvoso, em que a UEH variou entre 11,6% a 15,9%. A maior estimativa de valor de UEH da madeira foi para o mês de março (15,9%) e a menor para o mês de setembro (7,1%). Isso possivelmente acontece por se tratar dos meses mais úmido e seco do ano, respectivamente.

No que diz respeito a região de Caxias, a Figura 4 apresenta os valores médios mensais de UEH da madeira para a região, onde verifica-se que existe diferença estatística entre os valores médios mensais de UEH entre os meses que compreendem os períodos chuvoso e seco.

Figura 4 – Médias mensais da UEH da madeira (em %) para a Região de Caxias.

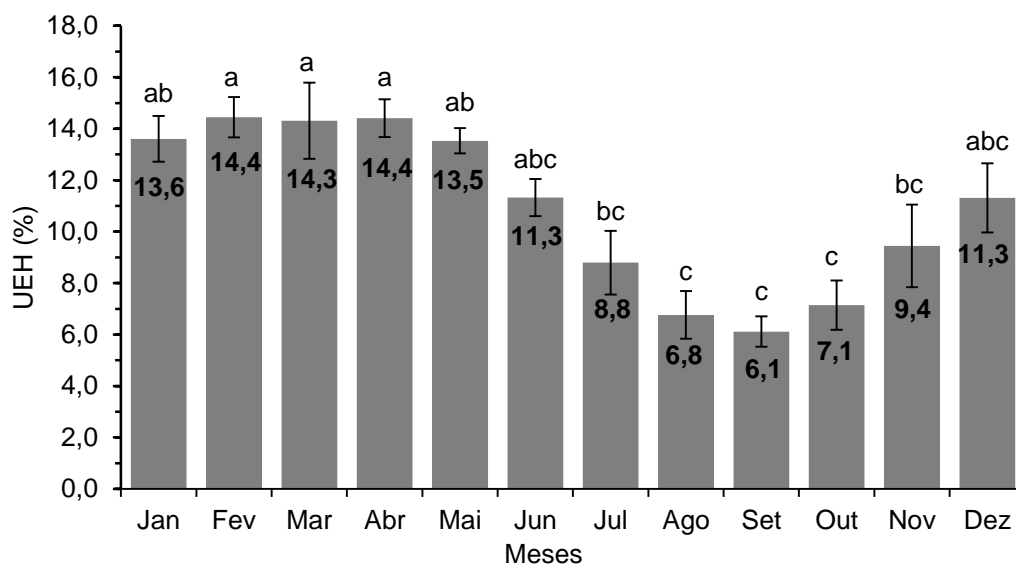


Legenda: Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo método de Dunn a um nível de significância de 0,05.

Fonte: Dados INMET (2022) adaptado pela autora (2022).

No período correspondente a seca, ocorreram variações da UEH entre 8,9% a 13,6 %, enquanto no período chuvoso variou entre 9,5% a 15,7%. A maior estimativa de valor de UEH da madeira foi para o mês de abril (15,7 %) e a menor para o mês de outubro (8,9%).

A Figura 5 corresponde a região de Presidente Dutra, onde os valores médios mensais demonstram que existe diferença estatística significativa entre os valores médios mensais de UEH entre os meses que compreendem os períodos chuvoso e seco.

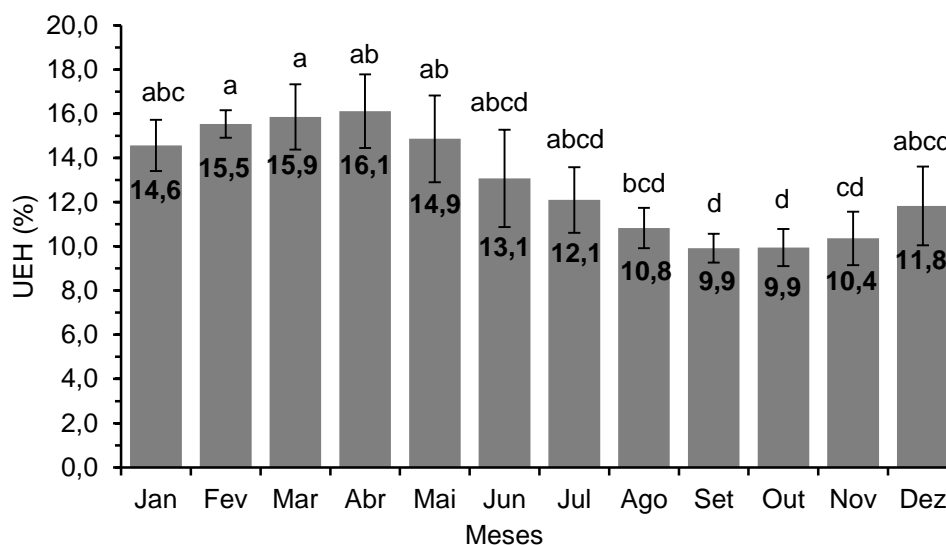
Figura 5 – Médias mensais da UEH da madeira (em %) para a Região de Presidente Dutra.

Legenda: Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo método de Dunn a um nível de significância de 0,05.

Fonte: Dados INMET (2022) adaptado pela autora (2022).

Nota-se que na região de Presidente Dutra, existe um comportamento significativo em relação aos meses de agosto, setembro e outubro em que registraram valores médios mensais muito próximos e não obteve diferença estatísticas entre eles. Além disto, no período correspondente a seca, ocorreram variações da UEH entre 6,1% a 11,3 % com menor amplitude quando comparado ao período chuvoso, em que a UEH variou entre 9,4% a 14,4%. A maior estimativa de valor de UEH da madeira ocorreu no mês de abril (14,4%) e a menor para o mês de setembro (6,1 %).

No que diz respeito a região de Santa Inês-Bacabal, a Figura 6 apresenta os valores médios mensais para essa região. Nota-se que existe diferença estatística entre os meses do ano. Adicionalmente, observa-se ainda que existe diferença estatística entre os valores médios mensais de UEH entre os meses que compreendem os períodos chuvoso e seco.

Figura 6 – Médias mensais da UEH da madeira (em %) para a Região de Santa Inês-Bacabal.

Legenda: Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo método de Dunn a um nível de significância de 0,05.

Fonte: Dados INMET (2022) adaptado pela autora (2022).

No período correspondente a seca, ocorreram variações da UEH entre 9,9% a 13,1 % com menor amplitude quando comparado ao período chuvoso, em que a UEH variou entre 10,4% a 16,1%. A maior estimativa de valor de UEH da madeira foi para o mês de abril (16,1%) e a menor para o mês de setembro (9,9 %).

No que tange a Região de São Luís, os dados estimados e analisados atenderam aos pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias. Logo foi realizada a análise de variância (ANAVA), conforme demonstrado na Tabela 3. Os resultados demonstram haver diferença significativa entre os meses. Adicionalmente, o Teste de médias de Tukey foi aplicado ao nível de 5% de significância.

Tabela 3 – Tabela da ANAVA para os dados médios da Região São Luís.

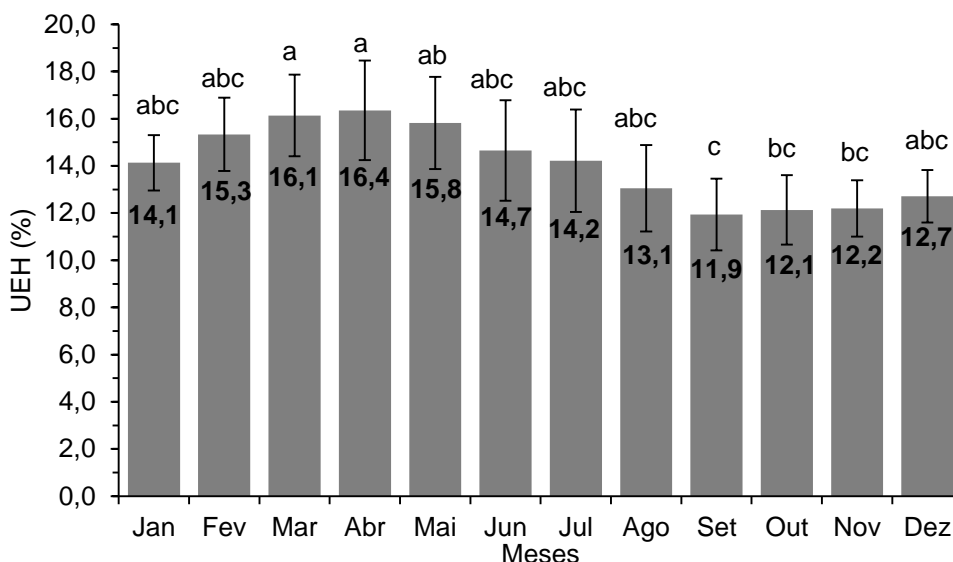
Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Meses	11	146,011	13,274	4,574	9,93E-05
Resíduos	48	139,286	2,902		

Fonte: Autora (2022).

A Figura 7, apresenta os valores médios mensais de UEH da madeira para a Região de São Luís. Observa-se que existe diferença estatística entre os valores médios mensais de UEH dentro dos meses que compreendem os períodos chuvoso e seco. No período correspondente a seca, ocorreram variações da UEH entre 11,9% a 14,7% com menor amplitude quando comparado ao período chuvoso, em que a UEH

variou entre 12,1% a 16,4%. A maior estimativa de valor de UEH da madeira foi para o mês de abril (16,4%) e a menor para o mês de setembro (11,9%).

Figura 7 – Médias mensais da UEH da madeira (em %) para a Região de São Luís.



Legenda: Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey a um nível de significância de 0,05.

Fonte: Dados INMET (2022) adaptado pela autora (2022).

É possível observar que nas regiões geográficas intermediárias do Estado, existe uma alteração de sazonalidade das médias mensais, visto que existe diferença entre os valores médios mensais no período seco e chuvoso. Além disso, nota-se que as menores médias mensais de UEH da madeira para as regiões ocorrem em setembro ou ainda, com postergação para outubro (Região Caxias), enquanto as maiores ocorrem entre março e abril.

Faz-se útil levar em consideração também o argumento de que para a região de São Luís, o comportamento sazonal é mais homogêneo, ou seja, não há grande amplitude de valores de UEH ao longo do ano e entre os meses mais próximos, mostrando que a sazonalidade é diferente quando comparada as demais regiões. Isso implica dizer, que para essa região as madeiras tendem a apresentar maior estabilidade dimensional.

Souza et al (2016), avaliando a sazonalidade da UEH da madeira para o Estado do Mato Grosso, observou que os valores mensais mínimos correspondem aos meses de julho, agosto e setembro (coincidindo com o período seco), já os valores mensais máximos foram encontrados para os meses de janeiro, fevereiro e março (período chuvoso). Os autores enfatizam que, as condições ambientais no período seco

favorecem a secagem da madeira ao ar livre, pois condicionam uma secagem mais rápida e com teor de umidade menor. Esta mesma tendência, registrada pelos autores citados acima, foi observado para as diferentes regiões geográficas do Estado do Maranhão.

Em vista disso, Galvão (1975) indica que a madeira seja processada quando esta se encontra nos valores médios de UEH estimado. Por isso é importante ter conhecimento da UEH da região que a madeira será utilizada, pois como os resultados mostraram as condições ambientais do local, podem variar durante o ano e regiões.

Diante dessas considerações, é importante destacar que a obtenção de baixa umidade de equilíbrio higroscópico é imprescindível, mas não será garantia de uma madeira/produto de qualidade se esta não for devidamente armazenada e monitorada (DOS ANJOS et al., 2011). Além disso, vale ressaltar que a UEH da madeira pode variar de região para região e, portanto, isso também deve ser considerado para garantir a qualidade requerida.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, a umidade de equilíbrio higroscópica da madeira estimada pela equação de Simpson para o estado do Maranhão é de 12,2%. E para as regiões geográfica intermediárias de Imperatriz, Caxias, Presidente Dutra, Santa Inês- Bacabal e São Luís, respectivamente, é de 11,6%; 12, 6%; 10,8%; 12,2% e 13,5%.

As menores médias mensais de UEH da madeira para as regiões ocorrem em setembro ou ainda, com postergação para outubro (Região Caxias) no período seco, enquanto as maiores ocorrem entre março e abril no período chuvoso.

As condições meteorológicas entre os meses de novembro a maio não apresentam condições favoráveis para secagem natural (ao ar livre) da madeira, pois possuem maior UEH e o processo de secagem será lento. Portanto, é indicado que os processos de secagem da madeira sejam realizados no período seco (junho a outubro), pois condicionam uma secagem mais rápida e com umidade menor.

O Estado do Maranhão apresenta boas condições climáticas para secagem natural da madeira, visto que a UEH estimada para as diferentes regiões geográficas do Estado encontram-se dentro do percentual de umidade indicado.

REFERÊNCIAS

- BARAÚNA, E. E. P.; OLIVEIRA, V. S. Umidade de equilíbrio da madeira de Angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), guariúba (*Clarisia racemosa* Ruiz & Pav.) e taurari vermelho (*Cariniana micrantha* Ducke) em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 1, p. 91-96, 2009. DOI: 10.1590/S0044-59672009000100009.
- BARONASA, R. *et al.* Modelling of moisture movement in wood during outdoor storage. **Nonlinear analysis: modeling and control**, v. 6, n. 2, p. 3-14, 2001.
- CASSIANO, C. *et al.* Sazonalidade e estimativas da umidade de equilíbrio de madeiras amazônicas em Sinop, Estado do Mato Grosso. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 100, p. 457-468, 2013.
- CHEN, Z. *et al.* Equilibrium moisture content of Norway spruce at low temperature. **Wood and Fiber Science**, v. 41, n. 3, p. 325-328, 2009.
- CLIMATE-DATA. **Clima**: Maranhão. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/maranhao-206/>. Acesso em: 20 Maio. 2022.
- DE MELO, J. E. DISCIPLINA: SISTEMAS ESTRUTURAIS EM MADEIRA. **Apostila**, 2014.
- DOS ANJOS, V. D. A. *et al.* Caracterização do processo de secagem da madeira nas serrarias do município de Sinop, Mato Grosso. **Revista Ciência da Madeira**, v. 2, n. 1, p. 10-12953/2177-6830. v02n01a05, 2011.
- FIORESI, T. *et al.* Umidade de equilíbrio da madeira na região Norte do Rio Grande do Sul em diferentes estações do ano. **Ciência da Madeira**, v. 5, n. 1, p. 34-41, 2014.
- 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)
- 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.; JANKOWSKY, I. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 112p.
- HAILWOOD, A. J.; HARROBIN, S. Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. **Transactions of the Faraday Society**, v. 42b, p. 84-102, 1946.
- HOYLE, R. J. Wood technology in the design of structure. 3 ed. Missoula, Montana, **Montain press**, 1972. 370p.
- IBGE. **Regiões Geográficas 2017**. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/regioes_geograficas/. Acesso em: 20 Maio. 2022.
- IMESC. **Estudo realizado pelo IMESC aponta crescimento na Extração Vegetal e Silvicultura no Maranhão nos últimos 20 anos**. Disponível em: <http://imesc.ma.gov.br/portal/Post/noticias/767>. Acesso em: 20 Maio. 2022.

INMET. **Dados históricos anuais**. Disponível em:

<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 05 Maio. 2022.

JANKOWSKY, I. P. *et al.* Estimativas da umidade de equilíbrio para cidades da região Sul do Brasil. **IPEF**, v. 32, n. 1, p. 61-64, 1986.

MARTINS, V. A. *et al.* Umidade de equilíbrio e risco de apodrecimento da madeira em condições de serviço no Brasil. **Brasil Florestal**, Brasília, v. 22, n. 76, p. 29-34, 2003.

MENDES, L. M.; ARCE, J. E. Análise comparativa das equações utilizadas para estimar a umidade de equilíbrio da madeira. **Cerne**, v. 9, n. 2, p. 141-152, 2003.

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, 1996. 30 p. (UFLA. Boletim Técnico n. 21).

PÉREZ-PEÑA, N. *et al.* Predicción del contenido de humedad de equilibrio de la madera en función del peso específico de la pared celular y variables ambientales. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 13, n. 3, p. 253-266, 2011. DOI: 10.4067/S0718221X2011000300002.

RODRIGUES, W. **Determinação do teor de umidade em madeiras por meio de medidores elétricos**. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 1999.

SILVA, J. D. C; OLIVEIRA, J. T. D. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**, v. 27, p. 233-239, 2003.

SILVA, J. *et al.* Variação da retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, em função da idade e da posição radial no tronco. **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, n.5, p.803-810, 2006.

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

SKAAR, C. **Water in wood**. New York: Syracuse University Press, 1972. 218p.

SOUZA, A. P. D; STANGERLIN, D. M.; MELO, R. R. de; ULIANA, E. M. Sazonalidade da umidade de equilíbrio da madeira para o Estado de Mato Grosso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 423-433, 2016.

TSOUMIS, G. 1991. **Science and technology of wood**. Nova York: Chapman & Hall. 494p.