



Secagem de toras de clones de *Eucalyptus urograndis* em estufa solar

Matheus Alexandrino José da Silva^a, Dáfilla Yara Oliveira de Brito^b, Jaltieri Bezerra de Souza^c,
João Paulo Silva Gomes^a, Lucas Jean Nunes^a, João Gilberto Meza Ucella-Filho^{d*},
Tatiane Kelly Barbosa de Azevêdo^a

^a Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

^b Universidade Federal de Lavras, Brasil

^c Universidade Federal da Paraíba, Brasil

^d Universidade Federal do Espírito Santos, Brasil

* Autor correspondente (16joaoucella@gmail.com)

INFO

Keywords

natural factors
saturation of fibers
moisture

ABSTRACT

Drying logs of Eucalyptus urograndis clones in a solar greenhouse.

Drying is an important stage in the wood industrialization process, with the purpose of improving the quality of the material. However, it is an expensive process, and there is a need to reduce its costs by using methods that require less investment. Thus, the objectives of this study were to evaluate the efficiency of a solar drying oven for drying *Eucalyptus urograndis* clone logs installed in the municipality of Macaíba, state of Rio Grande do Norte, in order to check whether the region is suitable for this practice; and ii) to evaluate the influence of different log diameter classes in the drying process. 1.50m logs were sectioned and separated according to four diametric classes. They were then weighed and placed in a solar oven, with daily measurements of air temperature and relative humidity and biweekly weighings during the observation period until they reached the fiber saturation point. The data were submitted to regression analysis, applying the variable selection procedure. At 35 days, all logs had already reached the PSF. However, the diameter measurements did not significantly affect the drying process, which proved to be efficient when compared to conventional and natural methods. Therefore, the solar kiln drying of logs becomes a viable method for the region.

RESUMO

Palavras-chaves

fatores naturais
saturação das fibras
umidade

A secagem é uma etapa importante no processo da industrialização da madeira, tendo como finalidade melhorar a qualidade do material. Porém, é um processo oneroso havendo a necessidade da redução dos seus custos, por meio de métodos que demandem menos investimento. Desse modo, os objetivos deste estudo foram avaliar a eficiência de estufa solar na secagem de toras de clones de *Eucalyptus urograndis* instalada no município de Macaíba, estado do Rio Grande do Norte, com o intuito de verificar se a região é adequada para esta prática; e ii) avaliar a influência de diferentes classes de diâmetro das toras no processo de secagem. Foram seccionadas toras de 1,50m e separadas em função de quatro classes de diamétricas. Em seguida foram pesadas e acondicionadas em estufa solar, sendo realizado medições diárias da temperatura e umidade relativa do ar e pesagens quinzenais durante o período de observação até que atingissem o ponto de saturação das fibras. Os dados foram submetidos a análise de regressão, aplicando-se o procedimento de seleção de variáveis. Aos 35 dias, todas as toras já haviam atingido o PSF. Entretanto, as medidas do diâmetro não afetaram significativamente na secagem, que se demonstrou eficiente quando comparada aos métodos convencionais e naturais. Portanto a secagem de toras em estufa solar torna-se um método viável para região.

Received 15 April 2021; Received in revised from 09 May 2021; Accepted 19 October 2021



INTRODUÇÃO

A crescente demanda por madeira de plantios florestais do gênero *Eucalyptus* vem proporcionando o aumento das áreas cultivadas, segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF), em 2018 esses plantios ocuparam cerca de 5,7 milhões de hectares, ocorrendo nos últimos sete anos um crescimento médio de 1,1% da área plantada ao ano (IBÁ, 2019). Diante da demanda do setor industrial por madeira e seus derivados, há a necessidade de aprimoramento dos processos que envolvem a industrialização da madeira.

A secagem é importante processo para agregar valor ao material lignocelulósico, além disso, a redução da umidade da madeira diminui o gasto com transporte, aumenta a resistência mecânica do material, reduz o ataque por agente xilófagos, além de reduzir a movimentação dimensional (Galvão e Jankowsky, 1985; Malladi e Sowlati, 2017). Podendo acontecer de forma natural ou artificial, ambos os processos manejam a capacidade higroscópica da madeira (Silva et al., 2017).

Na secagem natural, não há o controle das variáveis, isso garante longos períodos para se atingir o teor de umidade adequado, em contrapartida, apresenta um baixo custo de instalação, por não necessitar de equipamentos sofisticados para a realização do processo (Simpson, 1983; Erber et al., 2015; Tomczak et al., 2020).

Já na secagem artificial é possível obter maiores velocidades de secagem e menores teores de umidade em menor tempo, tendo em vista que faz uso de sistemas de aquecimento e circulação forçada do ar, no entanto, os elevados custos com instalação e manutenção de estufas convencionais tornam o processo inviável (Oliveira, 2015).

A secagem da madeira em estufa solar apresenta-se como método intermediário entre a secagem ao ar livre e a convencional, já que é considerada como uma alternativa para substituir métodos que demandam elevados custos de manutenção, investimento e consumo energético (Santos, 2012). Embora a qualidade da madeira seja semelhante tanto na secagem ao ar livre como na secagem em estufa solar (Susin et al., 2014; Stangerlin, 2009), do ponto de vista econômico Stangerlin et al. (2012)

afirmam que a secagem em estufa solar apresenta melhores indicadores financeiros, sendo menos sensível às variações nas taxas de juros.

Fatores ambientais atrelados às características da madeira propiciam melhores resultados da secagem. No momento da definição do método a ser empregado, o diâmetro das peças de madeira é um parâmetro fundamental na perda de umidade, em peças de maior diâmetro a água precisa percorrer maiores distâncias para ser evaporada (Pinheiro, 2013).

Do ponto de vista climático, as altas temperaturas durante todo o ano em conjunto com a baixa umidade relativa do ar, constituem-se de grandes aliados ao processo natural de secagem. Este clima é típico do estado do Rio Grande do Norte, onde o clima tropical, característico da região, contribui para a frequente elevação da temperatura e médio índice pluviométrico. Nesse contexto, esta pesquisa visou utilizar os atributos edafoclimáticos da região como recurso facilitador na secagem de madeira. Desse modo, este trabalho teve por objetivos: i) avaliar a eficiência de estufa solar na secagem de toras de clones de *Eucalyptus urograndis* instalada no estado do Rio Grande do Norte, com o intuito de verificar se a região é adequada para esta prática; e ii) avaliar a influência de diferentes classes diamétricas das toras no processo de secagem.

MATERIAL E MÉTODOS

Coleta do material

Foram utilizadas nove toras de madeiras de clones de *Eucalyptus urograndis*, com 7 anos de idade, provenientes de plantio experimental localizado na Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias (UAECIA), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), município de Macaíba, estado do Rio Grande do Norte, entre as coordenadas centrais 05° 53' 57" S e 35° 21' 33" W, com altitude de 56 m em relação ao nível do mar. O clima local é caracterizado, de acordo com a classificação de Köppen, como tropical chuvoso, do tipo As (quente e úmido), temperatura média anual de 26°C, umidade relativa de 76% e precipitação pluviométrica média anual de 1.140 mm (Alvares et al., 2014).

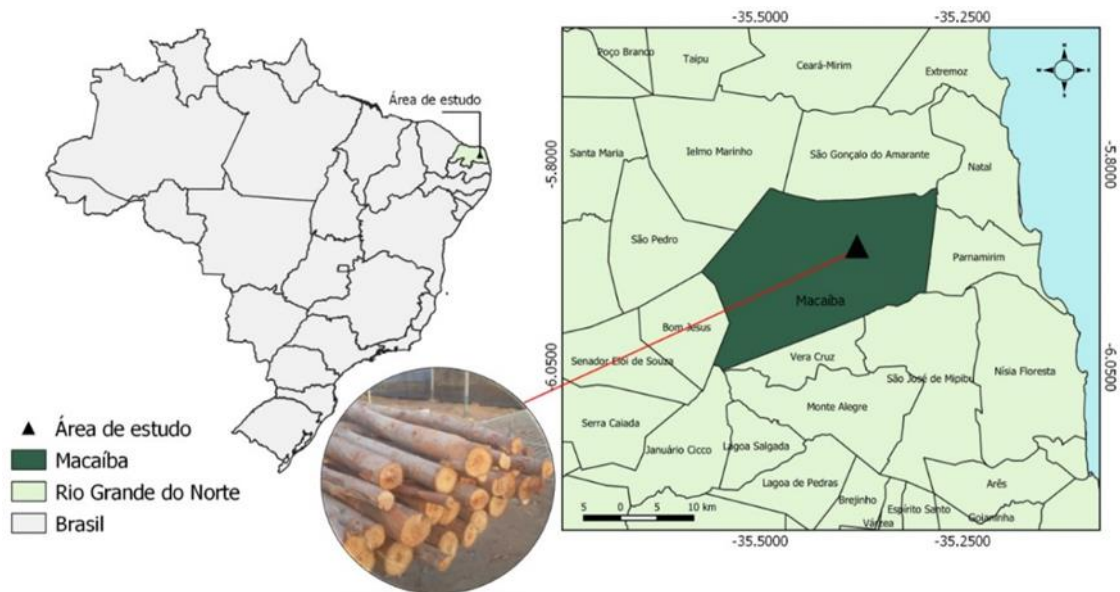


Figura 1 – Localização da área de estudo.

Preparo das amostras

As árvores amostradas foram seccionadas em toras de 1,50 m e classificadas em função de quatro classes de diâmetro, previamente estabelecidas (Quadro 1). Posteriormente, esses materiais foram

identificados, pesados e destinados para a secagem em estufa solar, onde ficaram acondicionadas sem separação por classes de diâmetro sobre um estrado de ferro a 1m do solo. Durante o período de secagem, seguiu-se com a medição diária da temperatura e umidade da estufa solar.

Quadro 1 – Classificação das classes diamétricas.

Classes	Diâmetros (cm)
1	15 - 19,9
2	20 - 24,9
3	25 - 29,9
4	30 - 35

Determinação da umidade

Para a determinação da umidade inicial foi retirado um disco de 3 cm de espessura de cada extremidade da tora, seguindo as recomendações da norma NBR 11941/2003. Onde, o material foi identificado, pesado e submetido a secagem em estufa de circulação forçada a 103±2°C até que atingissem massa constante.

A estimativa da umidade inicial das toras deu-se conforme metodologia proposta por Pizetta (2011) para secagem gravimétrica, isto é, a média dos dois discos correspondentes. Sob essa perspectiva, a umidade inicial dos discos foi determinada a partir da equação 1.

$$U = \left(\frac{M_U - M_S}{M_S} \right) \times 100 \tag{1}$$

Diante da obtenção da massa inicial das toras, adquiridas através de pesagens individuais com auxílio de uma balança mecânica com capacidade de 20 kg e precisão de 0,2 kg, foi estabelecido, a partir de pesagens quinzenais, a variação da umidade das toras até que atingissem o ponto de saturação das fibras (30%), conforme a Equação.

$$U_A = M_A \times \left(\frac{U_I + 100}{M_U} \right) - 100 \tag{2}$$

Em que:

- U_A= umidade atual (%);
- M_A= massa atual da tora (kg);
- U_I= umidade inicial média estimada dos discos (%);
- M_U= massa úmida inicial da tora (kg)

Análise estatística dos dados

Os dados coletados foram submetidos à análise de regressão utilizando o pacote estatístico “Statistical Analysis System” (SAS, 1993) no qual foi aplicado o procedimento de seleção de variáveis – Stepwise. O modelo foi definido pela umidade (U), em porcentagem, em função do tempo de secagem (t), em dias, pelas equações 3-8.

$U = f(t)$	3
$U = f(1/t)$	4
$U = f(t^2)$	5
$U = f(1/t^2)$	6
$U = f(\ln t)$	7
$U = f(\sqrt{t})$	8

O melhor modelo foi selecionado quanto às condicionantes da regressão com base no coeficiente de determinação ajustado (R^2 aj.), coeficiente de variação (CV), erro padrão da estimativa (S_{xy}) e análise da distribuição dos resíduos.

Após esse procedimento, foram adicionadas variáveis Dummy, que assumiram valores de 0 e 1, conforme a classe de diâmetro, da seguinte forma: $D_i = 1$, se a árvore estiver presente na classe de diâmetro i ; e $D_i = 0$, se a árvore não estiver presente na classe de diâmetro i .

Com esse método, foi possível expressar as regressões individuais ajustadas para as quatro classes de diâmetro estudadas, valendo-se de uma regressão linear múltipla representada pelas variáveis independentes descritas na Equação 4.

$U = f(X)$	9
$U = f(D_i)$	10
$U = f(D_i.X)$	11

Em que:

- U= umidade da tora, em porcentagem;
- X= tempo de secagem selecionado pelo procedimento Stepwise de regressão, em dias;
- D_i = Dummy (classes diamétricas, em que $i = 1, 2, 3$ e 4);

$D_i.X$ = interação entre as variáveis D_i e X.

Os dados obtidos foram tabulados no programa estatístico Microsoft Excel® versão 2016 para geração dos gráficos

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A insolação e a umidade relativa do ar e da madeira interferiram de forma significativa na temperatura da estufa de energia solar durante o processo de secagem. Notou-se que a temperatura interna aumentou proporcionalmente às horas e intensidade de insolação. Portanto, à medida que as horas de insolação aumentavam, a temperatura interna também se ampliava. Ressalta-se que a diferença de umidade entre o ambiente e as toras ajudou na formação de um gradiente de concentração no interior das toras, esse efeito foi intensificado naquelas que apresentavam menor diâmetro, como às dispostas nas classes 1 e 2. Oliveira et al. (2017) realizaram a secagem da madeira de *Eucalyptus urophylla* em toras a altas temperaturas e observaram que o aumento da temperatura promove o aumento da taxa de secagem, sendo maior para as toras de menor diâmetro em relação às toras de maior diâmetro. Após realizarem a secagem ao ar livre de *Eucalyptus globulus* Labill, Pertuzzatti et al. (2013) demonstraram que toras pertencentes à menor classes de diâmetro (5-10cm) atingiram o ponto de saturação das fibras 40 dias antes daquelas de maior diâmetro (20-25cm).

Durante o dia, a temperatura cresce em seu início e decresce em seu final, sendo as temperaturas máximas registradas aproximadamente às 13 horas. A maior temperatura interna registrada nessa estufa solar foi 54,5°C. A partir dos valores obtidos, por meio da aferição da temperatura e umidade da estufa solar diariamente, realizou-se o cálculo da média aritméticas das temperaturas registradas semanalmente, conforme o observado na figura 2.

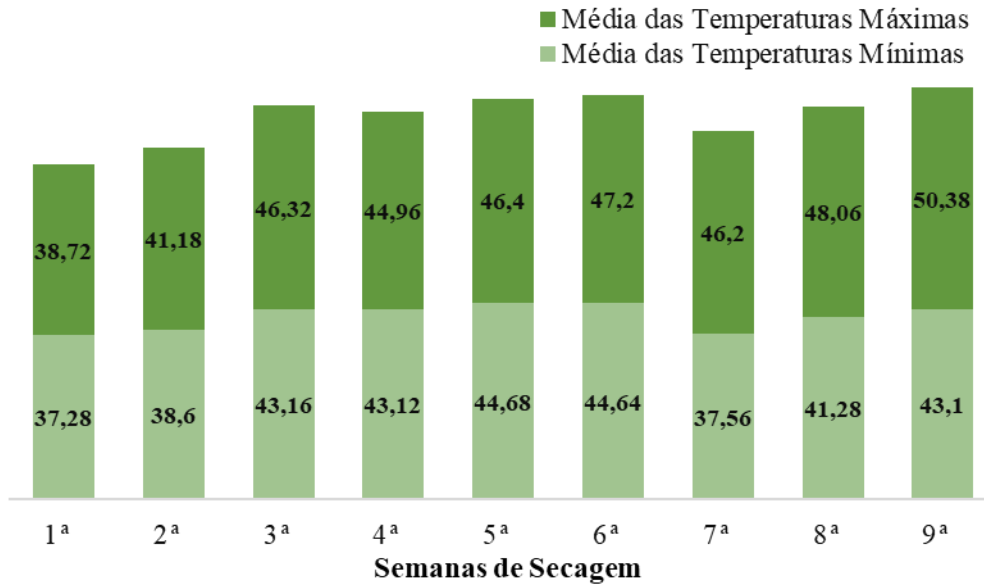


Figura 2 – Média das temperaturas (°C) máximas e mínimas da estufa solar em que se realizou a secagem de clones de *Eucalyptus urograndis*.

Na figura 3 encontram-se as curvas de secagem médias para toras de diferentes classes em estufa solar, durante 135 dias. Foi observado que nas primeiras semanas de secagem houve a maior perda de umidade, reduzindo-se nas semanas posteriores, semelhante ao relatado por Rezende (2010), que realizou a secagem ao ar livre de *Eucalyptus grandis* em Lavras, MG. Zen et al. (2019) observaram em seu estudo com madeira de Eucalipto que o teor de umidade final foi alcançado com 65 dias de secagem, sendo este teor pouco

variável dentro da pilha de madeira. Os autores ainda observaram que a secagem ao ar livre apresentou baixos índices de defeitos tornando a madeira de alta qualidade. Esta perda de umidade acentuada nas primeiras semanas de secagem ao ar livre é justificada devido a madeira perder água livre por capilaridade, diferente da água de impregnação, pois estar associada a parede celular, sendo sua retirada mais lenta (Duarte et al., 2015; Nascimento et al., 2019; Zen et al., 2019).

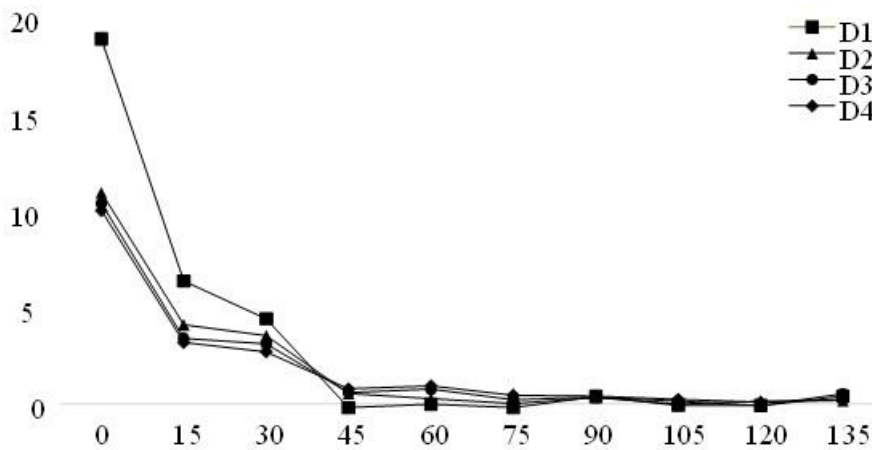


Figura 3 – Teor de umidade de toras de *Eucalyptus urograndis*, avaliadas em diferentes classes diamétricas (D) em função do tempo decorrido em estufa de secagem solar.

Durante as duas primeiras semanas, a perda de umidade em relação a umidade inicial nas toras da classe de menor diâmetro (D1) foi de 68% e nas demais classes (D2, D3 e D4) 66%, os valores demonstram que as toras de maior umidade inicial perderam menos umidade quando comparadas as

demais, conforme o observado na literatura existente. Abrahão et al. (2016) avaliaram o efeito do diâmetro e comprimento das toras na secagem natural de lenha de clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis*, verificaram que aos 47 dias, as toras que apresentavam menores

diâmetros, independente do comprimento, haviam atingido umidade próxima ao Ponto de Saturação das Fibras (PSF), enquanto as toras de maiores diâmetros apresentavam umidade de aproximadamente 70%.

A partir da 4ª semana, as classes apresentaram comportamento semelhante quanto a variação de umidade, ficando praticamente uniforme na 12ª semana de secagem em que a diferença máxima de umidade foi de 0,49 pontos percentuais.

Aos 35 dias todas as classes atingiram o ponto de saturação das fibras. Souza (2015) obteve resultados semelhantes ao secar madeiras de *Eucalyptus dunnii* e *Pinus elliottii*, alcançando um

teor de umidade satisfatório em apenas 15 dias chegando a 12,04%, enquanto o *E. dunnii* precisou de 30 dias para chegar a 12,84%. Corroborando com o observado por Stangerlin et al. (2009) que utilizou estufa solar para secagem de madeira serrada e constatou que este método foi mais eficiente, apresentando tempo de secagem de duas a cinco vezes menores que a secagem ao ar livre e com teor de umidade final mais baixo.

Na sétima semana de secagem, a ocorrência de chuvas acompanhadas com o aumento da umidade relativa do ar foi responsável pela variação da umidade máxima e mínima da estufa solar (Figura 4).

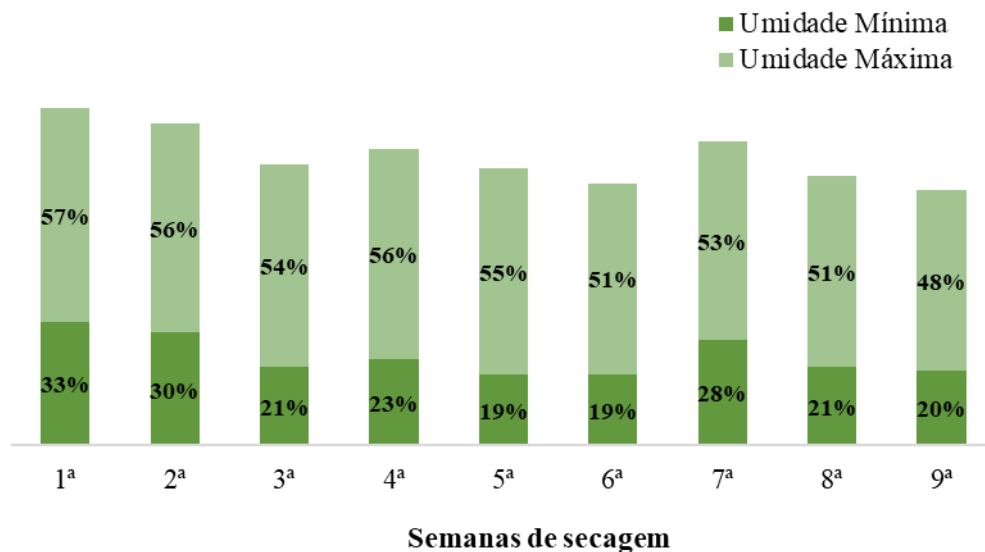


Figura 4 - Média semanal das umidades mínimas e máximas da estufa solar durante o período de secagem das toras de *Eucalyptus Urograndis*

Como consequência da variação de umidade na estufa solar, as toras apresentaram um acréscimo em seu teor de umidade, adquirindo uma variação média de aproximadamente 1,3 pontos percentuais. No entanto, esse aumento pode ser considerado superficial, visto que foi rapidamente superado. O processo de secagem está intimamente associado com a umidade. Desse modo, à medida que as condições climáticas mudam, a madeira exposta a secagem em condições pouco controladas, reagirá de acordo com as alterações do ambiente.

CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos com a secagem de madeira da espécie *Eucalyptus urograndis* em estufa solar, foi possível concluir:

- As diferentes classes diamétricas não influenciaram na secagem das toras, pois atingem em tempo semelhante o PSF;

- A secagem das toras na estufa solar por 35 dias foi suficiente para que todas atingissem o PSF.
- O estado do Rio Grande do Norte possui potencial para implementação deste método de secagem de madeira, favorecido, principalmente, pelas condições climáticas da região.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) por fornecer apoio financeiro, laboratórios e instalações, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por subsidiar a pesquisa e a Bolsa de estudos através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica para o Ensino Médio (PIBIC-EM).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraão CP, Rocha LCS, Paula H, Trindade EGB, Andrade HB, Santana RC. Efeito do diâmetro e do comprimento das toras na secagem de lenha de um clone de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis*. Scientia Florestalis, v.44, n.109, p.85-93, 2016. <http://dx.doi.org/10.18671/sci-for.v44n109.08>
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v.22, n.6, p.711-728, 2014. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF). Anuário estatístico da ABRAF. Brasília: ABRAF, 2013. 167 p. Disponível em: <http://www.abraflor.org.br/estatísticas>
- dos Santos SRCA. Histórico e evolução dos equipamentos de secagem da madeira para uso estrutural. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas-São Paulo.
- Duarte MM, Trevisan R, Susin F, Zen LR, Valerius J. Drying curve and defects of Eucalyptus sp. wooden submitted to air drying. Spanish Journal of Rural Development, v.5, n.3, p.161-170, 2015. <http://dx.doi.org/10.5261/2015.GEN3.14>
- Erber G, Kanzian C, Stampfer K. Modelling natural drying of European beech (*Fagus sylvatica* L.) logs for energy based on meteorological data. Scandinavian Journal Of Forest Research, v. 31, n. 3, p. 294-301, 2015. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2015.1080294>
- Galvão APM, Jankowsky IP. Secagem racional da madeira. Nobel, 1985.
- Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). Relatório Anual. p.24, 2019. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 21 de novembro de 2019.
- Malladi KT, Sowlati, T. Optimization of operational level transportation planning in forestry: a review. International Journal Of Forest Engineering, v. 28, n. 3, p. 198-210, 2017. <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2017.1362825>
- Nascimento TM, Monteiro TC, Baraúna EEP, Moulin JC, Azevedo AM. Drying influence on the development of cracks in *Eucalyptus* logs. Bioresources, v.14, n.1, p.220-233, 2019. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.14.1.220-233>
- Oliveira AC. Secagem de toras de eucaliptos. 2015. 81f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.
- Oliveira AC, Pereira BLC, Carneiro ACO, Fialho LF, Figueiro CG, Vital BR, Magalhães MA. Secagem da madeira de Eucalipto em toras a altas temperaturas. Revista Árvore, v. 41, n.2, p. e410207, 2017. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000200007>
- Pertuzzatti A, Trevisan R, Fioresi T, Rabuske JE, Trautemüller AV, Motta CI, Netto CC. Influência do diâmetro das toras na secagem ao ar livre de *Eucalyptus globulus* Labill. Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.), Pelotas/RS, v.04, n.02, p.191-201, 2013. <https://doi.org/10.12953/2177-6830.v04n02a05>
- Pinheiro MA. Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) -Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.
- Pizetta RT. Determinação da melhor metodologia de utilização de um aparelho resistivo medidor de umidade. 2011. 43 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo.
- Rezende RN, Lima JT, Paula REL, Faria ALR. Secagem ao ar livre de toras de toras de *Eucalyptus grandis*. Revista Cerne, Lavras, v. 16, n.1, p.41-47, 2010.
- Silva DA, Da Róz AL, Pires AAF., Carvalho AM, Nakashima GT, Pádua FA, Yamaji FM. A influência da umidade em propriedades mecânicas de briquetes produzidos com resíduos de madeira (*Eucalyptus sp. e Pinus sp.*). Revista Virtual de Química, v.9, n.3, p.1078-1086, 2017.
- Souza JT, Lima E, Silva GL, Baldin T, Menezes WM. Avaliação da secagem em estufa solar de madeiras de *Eucalyptus dumii* Maiden e *Pinus elliotii* Engelm. Enciclopédia Biosfera, Goiania, v.11, n.21, p.277-286, 2015.
- Stangerlin, DM, Melo RR, Santini EJ, Cordeiro SA. Comparação econômica entre os métodos de secagem de madeira ao ar livre e em estufa solar. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.7, p.850-856, 2012. <https://doi.org/10.5039/agraria.v7isa1986>
- Stangerlin DM, Santini EJ, Susin F, Melo RR, Gatto DA, Haselein CR. Uso de estufa solar para secagem de madeira serrada. Ciência Florestal, v.19, n.4, p.461-472, 2009. <https://doi.org/10.5902/19805098900>
- Simpson WT. Drying Wood: a review - part i. Drying Technology, v. 2, n. 2, p. 235-264, 1983. <http://dx.doi.org/10.1080/07373938308959827>
- Susin F, Santini EJ, Stangerlin DM, Morais WWC, Melo RR. Taxa de secagem e qualidade da madeira serrada de *Hovenia dulcis* submetida a dois métodos de secagem. Floresta e Ambiente, v.21, n.2, p.243-250, 2014. <https://doi.org/10.4322/foram.2014.016>
- Tomczak K, Tomczak A, Jelonek T. Effect of Natural Drying Methods on Moisture Content and Mass Change of Scots Pine Roundwood. Forests, v. 11, n. 6, p. 668, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/f11060668>
- Zen LR, Monteiro TC, Schaffer W, Kaminski JL, Klitzke RJ. Secagem ao ar livre de madeira de Eucalipto. Journal of Biotechnology and Biodiversity, v.7, n.2, p.291-298, 2019. <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v7n2.zen>