

Movimiento del agua en la madera durante el secado. Modelo discreto

Movement of water in the wood during drying discreet model

Movimento da água na madeira durante o secado. Padrão discreto

Inés González Cruz^{1*}  <https://orcid.org/0000-0001-7900-8547>

Luisberis Velázquez Abad²  <https://orcid.org/0000-0001-6303-9664>

Daniel Álvarez Lazo¹  <https://orcid.org/0000-0001-7627-0152>

¹Universidad de Pinar del Río "Hermandades Saíz Montes de Oca". Pinar del Río, Cuba.

²Universidad Católica del Norte. Antofagasta. Chile.

*Autor para la correspondencia: ines@upr.edu.cu

Recibido: 20 de agosto de 2020.

Aprobado: 20 de septiembre de 2020.

RESUMEN

El conocimiento de los factores que producen las deformaciones de la madera puede ayudar a una selección adecuada del material antes de su aserrado. Una manera de enfrentar el problema de las deformaciones es con el entendimiento de los mecanismos que la regulan. El objetivo del trabajo fue describir el comportamiento del movimiento del agua durante el secado de la madera, como factor influyente en las deformaciones de la misma durante este proceso, a partir de un modelo teórico, que unifica rasgos de la dinámica de Newton de un sistema de partículas y esquemas propios de los métodos de los elementos finitos. Este modelo permite establecer en detalle la influencia cualitativa y cuantitativa de la humedad en la naturaleza de las deformaciones, lo que permite entender los resultados experimentales y realizar predicciones, que implican en la actividad práctica, un ahorro considerable de recursos y de tiempo.

Palabras clave: Humedad; Madera; Modelo; Secado.

ABSTRACT

The knowledge of the factors that produce the deformations of the wood can help to a suitable selection of the material before its sawing. One way to address the problem of deformation is with the understanding of the mechanisms that regulate it. The objective of the work was to describe the behavior of the movement of water during the drying of wood as an influential factor in the deformations of the same during this process from a theoretical model, which unifica features Newton's dynamics of a system of particles and schemes of the methods of the finite elements. This model allows to establish in detail the qualitative and quantitative influence of the humidity



in the nature of the deformations, which facilitates to value the experimental results, to make predictions in the practical activity, and to obtain a considerable saving of resources and time.

Keywords: Moisture; Wood; Drying; Model.

RESUMO

O conhecimento dos fatores que originam deformações na madeira pode ajudar à seleção adequada do material antes do serrado. Um modo de confronto do problema das deformações é atingindo os mecanismos que regulam as. A finalidade do trabalho foi descrever o comportamento do movimento da água durante o secado da madeira, como fator agente nas deformações da mesma durante este processo, a partir dum padrão teórico, que associa rasgos da dinâmica de Newton de um sistema de partículas e desenhos próprios dos métodos dos elementos finitos. Este modelo permite estabelecer em minúcia, a influência qualitativa e quantitativa da humidade na natureza das deformações, o que promove perceber os resultados experimentais e realizar predições, que traem como conseqüências, na atividade prática, bom emprego de recursos e do tempo.

Palavras chave: Humidade; Madeira; Padrão; Secado.

INTRODUCCIÓN

El consumo de grandes volúmenes de madera aserrada en nuestro país, indica como necesidad primordial elevar la eficiencia en la industria del aserrado, teniendo en cuenta minimizar las contracciones y otras deformaciones que presenta posterior a su secado, pues desde el punto de vista de la construcción las deformaciones que experimentan la madera aserrada afectan la calidad de la misma, siendo la propiedad más importante el hinchamiento y la contracción (Álvarez *et al.*, 2013).

La contracción se produce solamente cuando la madera pierde humedad por debajo del punto de saturación de la úbra (PSF), este punto es un dato de interés para los usos estructurales y decorativos de la madera. Está aceptado que para el uso práctico de todas las especies el valor medio del punto de saturación de la fibra es 30 % (Álvarez, *et al.*, 2013). Producto al movimiento del agua durante el secado, en la madera se presentan cambios de las propiedades físico-mecánicas (Sokolowskyy *et al.*, 2014).

El agua ligada está újada en las paredes celulares mediante fuerzas de gran intensidad de tipo físico y químico. Durante el proceso de secado se elimina en primer lugar toda el agua libre y a continuación empieza a eliminar una parte del agua ligada. La eliminación del agua libre se realiza rápidamente y el consumo de energía que requiere es relativamente bajo, ya que el agua libre está muy débilmente ligada a la madera. La madera empieza a perder agua hasta que se llega a un punto, denominado Punto de Saturación de la Fibra (PSF) en el que ya no tiene agua libre que perder, durante esta fase no se producen cambios dimensionales en la madera, ya que se ha eliminado el agua que se encontraba en el interior de las células (Álvarez *et al.*, 2013).



Asociado a los cambios de humedad se manifiestan deformaciones de la madera, de *Pinus caribaea* var. *caribaea* (González-Cruz, 2008 y Guera *et al.*, 2020). Según refieren Sokolowsky *et al.*, (2014), la aplicación de la modelación matemática posibilita la automatización del análisis de los fenómenos que ocurren durante el proceso de secado de la madera.

Se han utilizado diferentes métodos matemáticos para definir el movimiento del agua en la madera durante el secado, entre los que se destacan los trabajos desarrollados por Salinas *et al.*, (2010 y 2015), Pérez *et al.*, (2018), Montero *et al.*, (2020).

El tratamiento de las deformaciones asociadas a gradientes de humedad durante el proceso de secado es tradicionalmente descrito desde el punto de vista teórico haciendo uso de la Teoría de los medios continuos (Ormarsson *et al.*, 2000). Si bien en este marco de trabajo donde se considera la anisotropía y la no homogeneidad del medio, arribándose a resultados interesantes en el tratamiento de este fenómeno, por sus puntos de partida deja fuera de su alcance la consideración de las propiedades discontinuas que son inherentes a un medio tan excepcional como la madera (González-Cruz, 2008).

Se propone en este trabajo una visión diferente, o sea, el estudio sobre el movimiento del agua en la madera durante el secado, mediante el empleo de modelos discretos que hacen uso de la formulación Newtoniana de los sistemas de partículas. Tales modelos son ampliamente utilizados en la física para el estudio del comportamiento de los gases, líquidos y sólidos mediante el empleo de los métodos de la dinámica molecular clásica, por lo que existe un significativo conocimiento de las peculiaridades que tales modelos permiten describir. Para acceder a una mayor comprensión de este fenómeno, se procedió a realizar un estudio teórico del movimiento del agua durante el secado de la madera aserrada de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*.

El objetivo de este estudio es describir el comportamiento del movimiento del agua en la madera aserrada de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* a partir del modelo teórico. Esta descripción aporta elementos importantes para el área de la tecnología de la madera y la industria del aserrado (González-Cruz *et al.*, 2007; González-Cruz, 2008; Montero *et al.*, 2020), este último considera que la simulación es usada ampliamente para mejorar y optimizar el proceso de secado de la madera.

MATERIALES Y MÉTODOS

La idea básica del modelo discreto parte de considerar una porción del material en pequeños volúmenes no superpuestos o celdas tal como se realiza en los métodos de los elementos finitos. Dicha porción conviene ser representada de manera esquemática (Figura 1) mediante un retículo en que cada nodo equivale a un volumen elemental dado del material estudiado, los cuales están unidos por segmentos o enlaces, representando estos las superficies de contacto entre celdas adyacentes. Estos nodos tendrán asociados las propiedades físicas que queremos describir en este caso: el radio vector de posición (r_i) del i -ésimo nodo representará en lo adelante la posición de su centro de masa, al cual también se asocia la masa (m_i), volumen (v_i) o contenido de humedad h (h_i).



Los enlaces constituyen la base del mecanismo dinámico mediante el cual interactúan los nodos modificando la humedad durante el proceso de difusión que tienen lugar durante el secado.

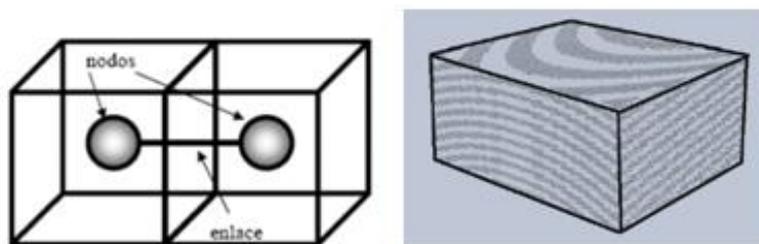


Figura 1. - Recreación discreta de una pieza de madera aserrada en la que solo se han considerado dos especies de nodos (señalados con colores diferentes), modelando lo que será la estructura anular característica de este material

Con el objetivo de tener una representación densa de los nodos/celdas para establecer el modelo reticular de una pieza de madera aserrada, se hizo uso de un retículo formado por planos paralelos en forma de una red triangular regular. Cada nodo de dicha red tiene 12 nodos vecinos cercanos, cuyos enlaces con el primero definen las direcciones de aplicación de las interacciones y de transporte de agua (difusión) durante el proceso de secado.

Para el estudio de la dinámica del agua durante el secado se asumen piezas de madera aserrada de secciones de (10×10×100) mm, las que fueron recreadas en el modelo discreto por un retículo formado por 10×11×100 = 11000 nodos.

Movimiento del agua ligada

Este estudio se limita a la dinámica del agua ligada bajo la suposición que el estado inicial de las muestras es próximo al punto de saturación de la úbra. En este caso, el proceso de secado de agua ligada tiene lugar mediante un proceso de difusión (Gatica *et al.*, 2011; Montero *et al.*, 2020) el cual puede ser descrito en general mediante la (Ecuación 1).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r^\mu} \left(D^{\mu\nu} \frac{\partial \eta}{\partial r^\nu} \right) \quad (1)$$

$D^{\hat{\mu}\hat{\nu}}$ —Tensor de difusión (no homogéneo, anisotrópico).

Reformulación de la difusión en términos del modelo discreto

La reformulación de las ecuaciones asociadas al proceso de difusión en el medio continuo al cuadro del modelo discreto se establece al asumir que la rapidez de cambio del contenido de agua ligada por unidad de volumen en el i -ésimo nodo (partícula) con volumen (v_i) se somete a la (Ecuación 2).

$$v_i \frac{dh_i}{dt} = \sum_j \omega_{ij} (h_j - h_i) \quad (2)$$



Donde ω_{ij} es la probabilidad de tránsito de agua ligada a través del enlace ij , el cual satisface la relación $\omega_{ij} = \omega_{ij}$ que garantiza que la contribución del flujo de agua ligada proveniente del j -ésimo nodo sea igual a la pérdida parcial que este último nodo tiene con ese enlace.

Dicha probabilidad de tránsito se supone proporcional al área S_{ij} de la superficie de contacto entre las celdas adyacentes asociadas a los nodos involucrados en el enlace $J\omega_{ij} = S_{ij} \cdot \hat{I}^2_{ij}$, donde \hat{I}^2_{ij} es la probabilidad de tránsito por unidad de área.

El paso al continuo se realiza al considerar la aproximación $h_j - h_i = r_{ij} \cdot \nabla h$ donde los términos de flujo pueden ser reescritos como sigue (Ecuación 3).

$$\sum_j \omega_{ij} \cdot r_{ij} \cdot \nabla h = \sum_j S_{ij} \cdot J_{ij} \quad (3)$$

Donde $S_{ij} = S_{ij} \cdot e_{ij}$ el vector área asociada al enlace (ij) cuyo vector normal $e_{ij} = e_{ij} / |r_{ij}|$ está dirigido a lo largo del enlace en el sentido del j -ésimo nodo, y J_{ij} (Ecuación 4)

$$J_{ij} = -\beta_{ij} \cdot e_{ij} (r_{ij} \cdot \nabla h), \quad (4)$$

El flujo de humedad resultante en la dirección del enlace.

Al introducir el límite al continuo (Ecuación 5) y (Ecuación 6).

$$\sum_j S_{ij} \cdot J_{ij} \rightarrow \int_{\partial\Omega} J \cdot ds = \int_{\Omega} \text{div} J d^3 r \quad (5)$$

y

$$v_i \frac{dh_i}{dt} \rightarrow \int_{\Omega} \frac{\partial h}{\partial t} d^3 r$$

Se deduce la ecuación de continuidad (6)

$$\partial h / \partial t + \text{div} J = 0 \quad (6)$$

Existe una relación lineal general entre el flujo y el gradiente de humedad, según expresa la (Ecuación 7).

$$J^\mu = -D^{\mu\nu} \frac{\partial h}{\partial r^\nu} \quad (7)$$

Las ecuaciones que describen este estudio fueron implementadas computacionalmente mediante el uso del lenguaje de Programación FORTRAN en aras de efectuar el análisis numérico. Los resultados derivados de tales estudios fueron analizados mediante la utilización del procesador de datos experimentales ORIGIN 6.0.



Para el estudio de la influencia de las condiciones medioambientales que influyen en la dinámica del proceso de secado, se analizó el proceso para dos regímenes de secado con valores diferentes de contenido humedad en la frontera de las piezas aserradas: la primera para un 3 %, correspondiente a un contenido de humedad medioambiental baja tales como las alcanzadas mediante el secado en horno, y la segunda para un 10 %, asociado a lo que sería un secado natural, asumidos también por *Ormarsson et al., (2000)* en estudios de análisis numéricos teniendo en cuenta variaciones de humedad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En términos generales, solo la modelación teórica permite establecer en detalle la influencia cualitativa y cuantitativa de factores influyentes en la naturaleza del fenómeno estudiado, arribando a un entendimiento profundo de este que no solo permite entender y explicar resultados experimentales; sino también predecirlos.

Comparación entre dos regímenes de secado

Es de significar que la humedad es una variable que no fue controlada experimentalmente, de manera que los resultados que se exponen son predicciones del modelo derivadas de la simulación numérica del fenómeno.

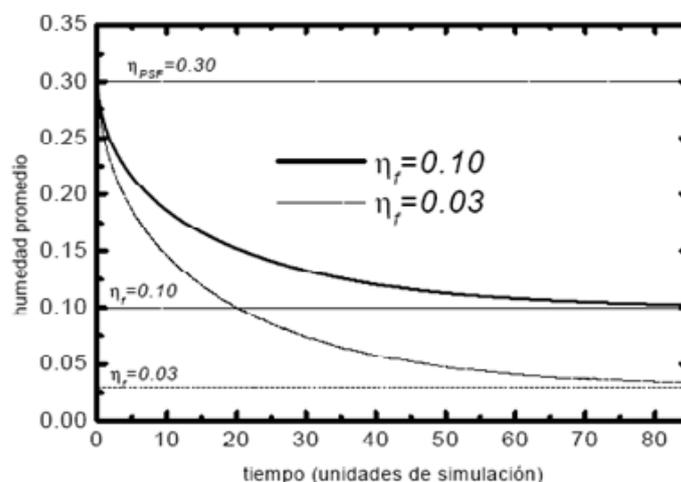


Figura 2. - Evolución dinámica de la humedad promedio

La Figura 2 muestra la evolución del proceso de secado de las piezas de madera aserrada en términos de la humedad promedio para los dos tipos de condiciones de frontera considerados en este estudio. La escala temporal está referida en unidades de la simulación. Las líneas horizontales indican el nivel de contenido de humedad correspondiente al PSF y los valores en las fronteras $\eta_f=0,03$ (3 %) y $0,10$ (10 %) utilizados en los experimentos numéricos (Figura 2).

El proceso de secado transcurre de forma más rápida mientras más baja sea la humedad medioambiental, alcanzar un valor de contenido de humedad estándar de $\eta_{prom}=0,12$ (12 %) involucra un tiempo dos a tres veces mayor, para un contenido de humedad en la frontera de las piezas $\eta_f=0,10$ (10 %) que el involucrado para cuando $\eta_f=0,03$. (3 %). Este resultado se interpreta de forma similar al obtenido por *Montero (2020)* en la simulación del secado en madera de *Eucalyptus nitens* usando modelos de difusión.



Comportamiento de la humedad con el avance del secado

En las Figuras 3 y 4, se muestran las distribuciones del contenido de humedad para los valores de humedad promedio $\eta_{prom}=0,25$ (25 %); 0,18 (18 %); 0,15 (15 %) y 0,12 (12 %) obtenidas a través de la simulación numérica del proceso de secado de las piezas de madera aserrada. En negro, se representan las regiones donde el contenido de humedad está muy próximo al PSF, representándose con gris menos intenso los valores más bajos de humedad (Figura 3) y (Figura 4).

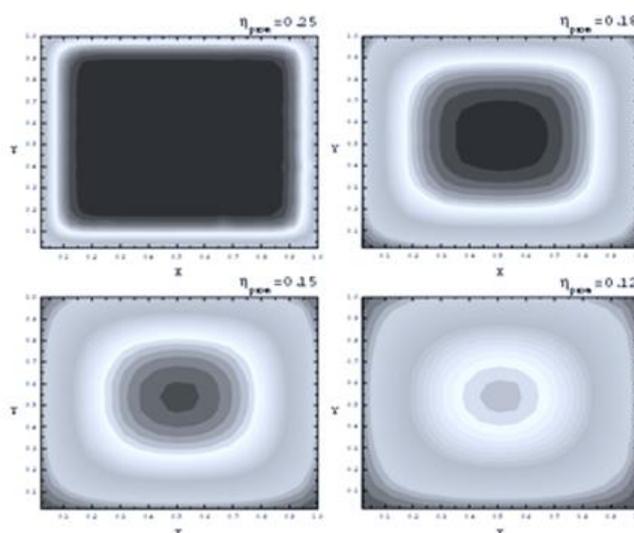


Figura 3 - Distribución de la humedad en la sección transversal de la pieza con el avance del secado para un contenido de humedad en la frontera del 3 %

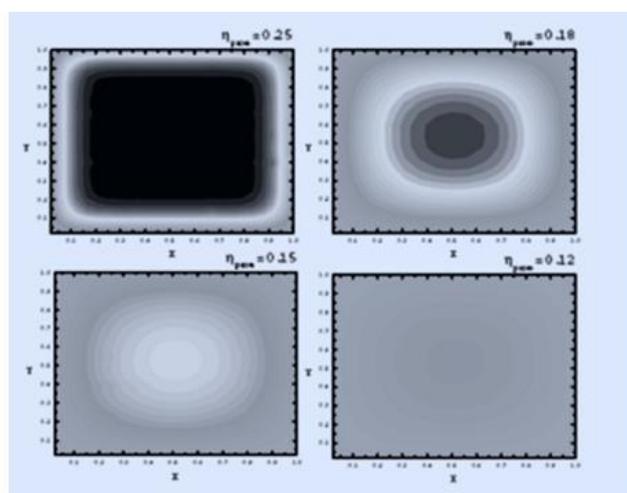


Figura 4 - Distribución de la humedad en la sección transversal de la pieza con el avance del secado para un contenido de humedad en la frontera del 10 %

Resulta interesante verificar la persistencia de una región central con un contenido de humedad muy próximo al punto de saturación de la fibra aún para valores relativamente bajos de humedad promedio $\sim 0,15$ (15 %) correspondiente al proceso de secado bajo condiciones bajas de humedad medioambiental (cuando $\eta_f=0,03$), resultados similares a los obtenidos por **Montero (2020)**.



Estos resultados señalan claramente que mientras las regiones exteriores de las piezas tienden a contraerse debido a la pérdida de la humedad, la región central con humedad próxima al PSF no está sometida a procesos de contracción, de ahí que entre las zonas exteriores e interiores surjan tensiones asociadas a estos gradientes de humedad, comportamiento semejante se obtuvo en la modelación matemática del secado convencional en madera de encino europeo *Quercus pedunculata* realizado por Sandoval-Torres, (2009) y en la simulación de tensiones durante el proceso de secado, considerando las variaciones de humedad en madera de *Eucalyptus nitens* realizada por Pérez et al., (2018).

Estas tensiones pudieran no provocar deformaciones significativas en las piezas en estos estados, pero pueden dar lugar a la formación de grietas y fracturas en el seno y la superficie del material cuando estas excedan los límites de resistencia del material, los cuales deberán ser más pronunciadas a medida que mayores sean las dimensiones de las piezas.

Si bien el proceso de secado que transcurre bajo condiciones de humedad ambiental no tan bajas (en nuestro caso $\eta_f=0,10$) es más lento, tiene la ventaja de no provocar grandes tensiones de humedad, dado que en este el secado ocurre de forma más homogénea en el volumen de las piezas, evitándose así el surgimiento de altos gradientes de humedad, comportamiento este que no favorece la aparición de grietas y fracturas en las piezas

Las mayores deformaciones deberán producirse una vez que desaparezcan estas regiones interiores con valores altos de contenido de humedad, y las contracciones se presenten en todo el volumen de las piezas.

CONCLUSIONES

La modelación teórica del fenómeno de secado mediante la utilización del modelo discreto posibilita analizar el comportamiento de la distribución del contenido de humedad durante el avance del secado, cuyo estudio conduce a una mayor comprensión del proceso.

Mientras las regiones exteriores de las piezas tienden a contraerse debido a la pérdida de la humedad, la región central con humedad próxima al PSF no está sometida a procesos de contracción, de ahí que entre las zonas exteriores e interiores surjan tensiones.

La velocidad del secado es mayor para aquellos regímenes donde las condiciones de humedad medioambiental son más bajas; pero este hecho tiene el inconveniente de provocar mayores gradientes de humedad entre las fronteras y el interior de las piezas, provocando la existencia de tensiones que potencialmente pueden provocar grietas y fracturas en sus fronteras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GATICA, Y.A., SALINAS, C.H. y ANANIAS, R.A., 2011. MODELING CONVENTIONAL ONE-DIMENSIONAL DRYING OF RADIIATA PINE BASED ON THE EFFECTIVE DIFFUSION COEFFICIENT. *Latin American Applied Research* [en línea], vol. 14, no. 2, pp. 183-189. [Consulta: 20 septiembre 2020]. Disponible en: <https://revistas.uns.edu.ar/laar2/article/view/217>.



- GONZÁLEZ, I., ÁLVAREZ, D., QUINTERO, A., ALVES, A. y RODRÍGUEZ, J., 2007. Comportamiento de algunas propiedades físicas en la dirección radial de la madera de la especie de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea*. *Revista Baracoa* [en línea], vol. 2, no. 1. ISSN 0138-6441. Disponible en: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=CU2010800039>.
- GONZÁLEZ-CRUZ, I., 2008. *Análisis de las deformaciones de la madera aserrada de Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* [en línea]. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctora en Ciencias Forestales. Pinar del Río, Cuba.: Universidad de Pinar del Río «Hermanos Saíz Montes de Oca». Disponible en: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=CU2011800029>.
- GUERA, O.G.M., SILVA, J.A.A. da, FERREIRA, R.L.C., ÁLVAREZ LAZO, D., BARRERO MEDEL, H., GUERA, O.G.M., SILVA, J.A.A. da, FERREIRA, R.L.C., ÁLVAREZ LAZO, D. y BARRERO MEDEL, H., 2019. Modelos matemáticos para la determinación del turno óptimo en plantaciones forestales. *Madera y bosques* [en línea], vol. 25, no. 1. [Consulta: 20 septiembre 2020]. ISSN 1405-0471. DOI 10.21829/myb.2019.2511636. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1405-04712019000100209&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- MONTERO, C., ROZAS, C. y PICANTE, C., 2020. Simulación del secado en madera de *Eucalyptus* usando modelos de difusión bajo condiciones unidimensionales e isotérmicas. *Scientia forestalis* [en línea], vol. 48, no. 126. Disponible en: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr126/2318-1222-scifor-48-126-e2957.pdf>.
- ORMARSSON, S., DAHLBLOM, O. y PETERSSON, H., 2000. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. En: Company: SpringerDistributor: SpringerInstitution: SpringerLabel: Springernumber: 3publisher: Springer-Verlag, *Wood Science and Technology* [en línea], vol. 34, no. 3, pp. 207-219. [Consulta: 20 septiembre 2020]. ISSN 1432-5225. DOI 10.1007/s002260000042. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s002260000042>.
- PÉREZ-PENA, N., CHÁVEZ, C., SALINAS, C. y ANANÍAS, R.A., 2018. Simulation of Drying Stresses in *Eucalyptus nitens* Wood. *BioResources* [en línea], vol. 13, no. 1, pp. 1413-1424. [Consulta: 20 septiembre 2020]. ISSN 1930-2126. Disponible en: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_13_1_1413_Perez_Pena_Simulation_Drying_Stress_Eucalyptus.
- SALINAS, C., ANANIAS, R., GATICA, Y. y CHAVEZ, C., 2010. Simulation of the Drying Stresses in Wood. *Mecánica Computacional* [en línea], vol. 29, no. 85, pp. 8347-8354. [Consulta: 20 septiembre 2020]. Disponible en: <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/3602>.
- SALINAS, C., CHAVEZ, C., ANANIAS, R.A. y ELUSTONDO, D., 2015. Unidimensional Simulation of Drying Stress in Radiata Pine Wood. *Drying Technology* [en línea], vol. 33, no. 8, pp. 996-1005. [Consulta: 20 septiembre 2020]. ISSN 0737-3937. DOI 10.1080/07373937.2015.1012767. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1012767>.



YURIY, P., IGOR, K. y YAROSLAV, S., 2014. Mathematical modeling of timber elastic-viscous-plastic deformation in the wood drying process. *Лесотехнический журнал* [en línea], vol. 4, no. 2 (14). [Consulta: 20 septiembre 2020]. ISSN 2222-7962. Disponible en: <https://cyberleninka.ru/article/n/mathematical-modeling-of-timber-elastic-viscous-plastic-deformation-in-the-wood-drying-process>.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

Los autores han participado en la redacción del trabajo y análisis de los documentos.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Copyright (c) 2020 Inés González Cruz, Luisberis Velázquez Abad, Daniel Álvarez Lazo

