

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN MADERAS



**ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LA MADERA DE PINO RADIATA
SOMETIDA A TRATAMIENTO TÉRMICO DE ESTERILIZACIÓN
CON CALOR POR RADIOFRECUENCIA**

Tesis presentada en el Departamento de Ingeniería en Maderas
de la Universidad del Bío-Bío, para la obtención del grado de
Magister en Ciencia y Tecnología de la Madera

HECTOR HUGO ESQUIVEL REYES

DIRECTOR DE TESIS: DR. RUBEN A. ANANIAS

CONCEPCIÓN CHILE

2017





1. RESUMEN

Se estudió la esterilización con calor por radiofrecuencia de madera apilada verde de pino radiata para exportación como materia prima para embalajes. Se aplicaron los programas de esterilización 56/30 (°C/min) y 60/1 (°C/min). Los ensayos fueron realizados en un equipo de radiofrecuencia de laboratorio de 3 m³ de capacidad. Se determinó el tiempo experimental y se desarrollaron modelos de predicción del tiempo de tratamiento. Se evaluó la calidad de la madera durante el proceso de esterilización con calor por radiofrecuencia en base a la variación de alabeos, cambios dimensionales y contenido de humedad durante el procesamiento. El diseño experimental tuvo como factores variables la altura de la pila, el espesor de la madera y el volumen de madera. Los resultados confirmaron que la madera que se encuentra en la superficie de la pila, es la que requiere mayor tiempo para lograr las condiciones de esterilización bajo ambos programas de tratamiento. Además la madera tratada con calor por radiofrecuencia con fines de esterilización incremento en calidad ya que en el 74.5% de los casos no se presentaron alabeos, y los cambios dimensionales así como la pérdida de humedad variaron levemente.

Palabras clave: Alabeos, alta frecuencia, madera para embalajes, modelos de predicción, *Pinus radiata*, tratamientos fitosanitarios con calor.

2. ABSTRACT

Radiofrequency heat sterilization of radiata pine green piled for export as a wood packaging material was studied. The sterilization programs 56/30 (° C / min) and 60/1 (° C / min) were applied. The tests were performed on 3 m³ semi-industrial radiofrequency equipment. The experimental time of sterilization was determined and treatment time prediction models were developed. The quality of the wood during the radiofrequency heat sterilization process was evaluated based on the variation of wood distortions, dimensional changes and moisture content during processing. The experimental design had as variables the pile height, the wood thickness and the wood volume. The results confirmed that the wood that is on the surface of the pile requires the most time to achieve the sterilization conditions under both treatment programs. In addition, the wood treated with radiofrequency heat for sterilization purposes, increased in quality because in 74.5% of the cases no wood distortions occurred, and the dimensional changes as well as the loss of moisture varied slightly.

Key words: High frequency, phytosanitary heat treatment, *Pinus radiata*, prediction models, wood distortions, wood packaging material.



3. PREFACIO

El mundo sobre el estudio de la madera es extraordinario, para algunos incomprensible y para otros apasionante, el hecho es que la madera como materia renovable, abundante, biodegradable y versátil en sus usos, además de su presencia en todo el mundo, la madera sin duda alguna en su composición natural es el material del pasado, del presente y del futuro.

La electricidad ha venido a revolucionar el mundo desde su descubrimiento, su capacidad para ser transformada en calor la hace versátil y ecológica, es por ello que dar tratamiento térmico a la madera con un calentamiento producido por radiofrecuencia, es una alternativa más amigable ambientalmente en comparación a otros métodos como es el uso de vapor.

En esta investigación se encuentran los parámetros de calidad y tiempo de tratamiento térmico para esterilizar madera de *Pinus radiata*, ya que es inminente que la tecnología a base de radiofrecuencia, sea considerada como un tratamiento fitosanitario estandarizado para el comercio internacional de la madera para embalajes.

Los resultados preliminares de esta investigación se presentaron en el V Encuentro de Investigación de Estudiantes de Postgrado, desarrollado en la Universidad del Bío-Bío del 17 al 18 de Noviembre del 2016 (Anexo 1: "Tratamiento térmico de esterilización de pino radiata mediante radiofrecuencia: Resultados preliminares"), así como en el Congreso Internacional IRG-48, organizado por el International Research Group on Wood Protection, del 4 al 8 de Junio del 2017, en Ghent Bélgica (Anexo 2: "Radio frequency heating times for sterilization radiata pine solid piles"). Los resultados finales son presentados en la modalidad de artículos siendo contemplados los siguientes 2 artículos científico: 1) "Calentamiento por radiofrecuencia para esterilizar *Pinus radiata* como material para embalajes. Parte 1: Tiempo total de tratamiento" y 2) "Calentamiento por radio frecuencia para esterilizar *Pinus radiata* como material para embalajes. Part 2: Calidad de la madera".

Los resultados aquí presentados buscan ser una herramienta para la industria maderera que está incorporando la tecnología de radiofrecuencia para dar tratamiento térmico con fines fitosanitarios a la madera verde para embalajes de pino radiata.



4. AGRADECIMIENTOS

Al gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, que por medio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, proporcionó la beca que permitió financiar mis estudios de postgrado en la Universidad del Bío-Bío.

Al proyecto Conicyt Fondef Idea 2-etapa ID 14I10231 en el marco del cual se desarrolló esta investigación que culmina con esta Tesis.

Al Grupo de Secado y Tratamientos Térmicos de la Madera por acogerme en su equipo de trabajo, proporcionar conocimientos y trabajo para la realización de esta Tesis.

A la Prof Linette Salvo por su acompañamiento en la elaboración del análisis estadístico.

A Don Héctor Sepúlveda por apoyo en preparación de maderas para este proyecto de investigación.

Al Dr. Rubén A. Ananías por el acompañamiento, asesoría, enseñanza y dirección de esta Tesis.

Al Departamento de Ingeniería en Maderas, de la Universidad del Bío-Bío.

A Chile, que como Nación, me ha acogido en su tierra con su cultura y costumbres.



5. ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. RESUMEN..... | 2 |
| 2. ABSTRACT | 2 |
| 3. PREFACIO..... | 3 |
| 4. AGRADECIMIENTOS | 4 |
| 5. ÍNDICE | 5 |
| 6. LISTA DE TABLAS..... | 7 |
| 7. LISTA DE FIGURAS | 8 |
| 8. INTRODUCCIÓN | 9 |
| Pino radiata..... | 9 |
| Plantaciones comerciales forestales de pino radiata | 9 |
| Mercado internacional de la madera de pino radiata..... | 10 |
| NIMF-15..... | 10 |
| Tratamiento térmico de la madera, con fines fitosanitarios | 11 |
| Radiofrecuencia utilizada en la madera | 12 |
| Tratamiento térmico a base de radiofrecuencia..... | 12 |
| Análisis comparativo entre el calentamiento convencional y a base de radiofrecuencia..... | 12 |
| Referencias | 13 |
| 9. OBJETIVOS..... | 15 |
| Objetivo general | 15 |
| Objetivos específicos..... | 15 |
| 10. CAPÍTULO I:..... | 16 |
| Calentamiento por radiofrecuencia para esterilizar <i>Pinus radiata</i> como material para embalajes. | |
| Parte 1: Tiempo total de tratamiento | 16 |
| RESUMEN..... | 16 |
| ABSTRACT | 16 |
| INTRODUCCIÓN | 16 |
| METODOLOGÍA | 17 |
| DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 19 |
| CONCLUSIONES | 22 |
| AGRADECIMIENTOS | 22 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 23 |
| 11. CAPÍTULO II: | 26 |



| | |
|--|----|
| Calentamiento por radiofrecuencia para esterilizar pino radiata como material para embalajes. | |
| Parte 2: Calidad de la madera..... | 26 |
| RESUMEN..... | 26 |
| INTRODUCCIÓN | 26 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 27 |
| Materia prima | 27 |
| Diseño experimental..... | 28 |
| Equipos..... | 28 |
| Preparación de las cargas | 28 |
| Obtención de datos | 29 |
| Aplicación del tratamiento térmico de esterilización con calor RF | 31 |
| Análisis de datos..... | 31 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 31 |
| Presencia de alabeos en el total de los casos | 31 |
| Presencia de defectos de procesamiento por tipo de alabeo..... | 33 |
| Presencia de defectos de procesamiento por numero pieza | 33 |
| Análisis de la presencia de alabeos, posición de las piezas en la carga | 34 |
| Análisis de los diferentes factores y niveles..... | 35 |
| Cambios dimensionales y pérdida de masa..... | 36 |
| CONCLUSIONES | 37 |
| AGRADECIMIENTOS | 37 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 37 |
| 12. CONCLUSIONES GENERALES | 40 |
| 13. ANEXOS..... | 41 |
| Anexo 1: Resumen presentado en V Encuentro de Investigación de Estudiantes de Postgrado UBB-2016 | 41 |
| Anexo 2: Presentación en Congreso Internacional del International Research Group on Wood Protection IRG48-2017 | 44 |



6. LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| 10. CAPÍTULO I:..... | 16 |
| Calentamiento por radiofrecuencia para esterilizar <i>Pinus radiata</i> como material para embalajes. | |
| Parte 1: Tiempo total de tratamiento | 16 |
| Tabla 1: Tiempo total de esterilización en segundos de <i>Pinus radiata</i> mediante calor por radiofrecuencia, promedio de las tres replicas, para las tres zonas de temperatura analizadas. | 19 |
| Tabla 2: Modelos de predicción del tiempo total de calentamiento..... | 21 |
| Tabla 3: Análisis de varianza. | 22 |
| 11. CAPÍTULO II: | 26 |
| Calentamiento por radiofrecuencia para esterilizar pino radiata como material para embalajes. | |
| Parte 2: Calidad de la madera..... | 26 |
| Tabla 1: Dimensiones nominales de la madera utilizada. | 28 |
| Tabla 2: Presencia de alabeos (Total de los casos) | 32 |
| Tabla 3: Alabeos (Positivo, aumento del alabeo)..... | 32 |
| Tabla 4: Método LSD..... | 35 |



7. LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 8. INTRODUCCIÓN | 9 |
| Figura 1: Plantaciones forestales a diciembre de 2014. | 10 |
| Figura 2: Volumen Exportado de <i>Pinus radiata</i> | 10 |
| Figura 3: Esquema de la sección transversal de la madera. | 12 |
| Figura 4: Distribución de humedad en madera durante el calentamiento y alta frecuencia..... | 13 |
| 9 OBJETIVOS..... | 15 |
| 10. CAPÍTULO I:..... | 16 |
| Calentamiento por radiofrecuencia para esterilizar <i>Pinus radiata</i> como material para embalajes. | |
| Parte 1: Tiempo total de tratamiento | 16 |
| Figura 1: Acomodo de una carga de madera..... | 18 |
| Figura 2: Variación espacial del tiempo de calentamiento por radiofrecuencia. | 20 |
| Figura 3: Método: LSD, análisis de réplicas (superficie 56°/30 min)..... | 21 |
| 11. CAPÍTULO II: | 26 |
| Calentamiento por radiofrecuencia para esterilizar pino radiata como material para embalajes. | |
| Parte 2: Calidad de la madera..... | 26 |
| Figura 1: Preparación de una carga para calentamiento RF..... | 28 |
| Figura 2: Esquema de distribución y ubicaciones de las 5 piezas evaluadas..... | 29 |
| Figura 4: Dispositivos para la medición de alabeos. | 30 |
| Figura 5: Presencia por tipo de alabeo | 33 |
| Figura 6: Número de alabeos por pieza..... | 33 |
| Figura 7: Presencia de alabeos en individual. | 34 |
| Figura 8: Presencia de alabeos en interacción..... | 34 |
| Figura 9: Posiciones en la carga de la madera a evaluar. | 34 |
| Figura 10: Presencia de alabeos por posición. | 34 |
| Figura 11: Presencia de alabeos por factor y nivel..... | 35 |
| Figura 12: Variación de ancho y espesor. | 36 |
| Figura 13: Variación de la pérdida de masa durante los ensayos de calentamiento RF. | 37 |



8. INTRODUCCIÓN

Pino radiata

La especie *Pinus radiata* pertenece a la familia de los Pináceas, género *Pinus* y subgénero *Diploxylon*. Dentro de éste a la sección *Taeda* y dentro de ésta al grupo de los insignes en el que figuran el *Pinus radiata*, el *Pinus muricata* y el *Pinus attenuata* conocidos como los pinos de conos cerrados de California por el carácter serotino de sus piñas (Schiavini et al. 1999).

Los brotes de primavera son multinodales, agrupándose las ramas en uno o más pseudovercículos. Las acículas se agrupan, predominantemente, en fascículos de tres salvo la variedad "binata" de las islas mejicanas de Guadalupe y Cedros que lo hacen predominantemente en fascículos de dos. Tienen longitudes entre 7 y 18 cm.; persisten verdes de dos a cuatro años, dando a la copa un aspecto muy denso, de tonalidad más oscura que la del pino pinaster (Schiavini et al. 1999).

En su hábitat original florece a finales del invierno o principios de primavera, madurando los conos (piñas) en el segundo otoño. Se insertan en el segundo verticilo de las guías, principal o lateral (Schiavini et al. 1999).

El *Pinus radiata* se considera dentro del grupo de los insignes, constituido por unas 16 especies boreales próximas entre sí. Como característica evolutiva sobresaliente de este grupo señala su hábito de conservar las piñas en el árbol durante varios años, con aperturas y cierres periódicos de las escamas. Pueden liberar semilla viable durante varios años, lo que aumenta las posibilidades de que se encuentren las condiciones óptimas para una buena germinación, y de superar años malos o condiciones adversas para el regenerado. Este comportamiento suele denominarse apertura serótina o tardía, y es considerado un estado avanzado de la evolución del género *Pinus* (Rodríguez y Soalleiro, 2004).

Plantaciones comerciales forestales de pino radiata

Hasta el año 1988 la participación del pino radiata (*Pinus radiata*) en el total plantado en el país resultaba superior al 90%. Luego de la publicación de los resultados de la investigación "Especies forestales de interés económico para Chile", realizada por el Instituto Forestal en base a parcelas de introducción de especies, comienza lentamente la plantación de especies diferentes, principalmente del género *Eucalyptus*. Los notables crecimientos de *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus globulus*, y las buenas perspectivas comerciales de sus productos a nivel industrial, llevaron a forestar grandes superficies, observándose un peak de 59.000 hectáreas plantadas el año 2006. La Figura 1, muestra la participación de las principales especies en el total de la superficie plantada al año 2010. También se plantaron en superficies de cierta relevancia: *Pseudotsuga menziesii* (Pino Oregón), *Atriplex* sp. (forrajera), *Pinus ponderosa*, *Pinus contorta*, *Populus* spp. (Prado 2015).

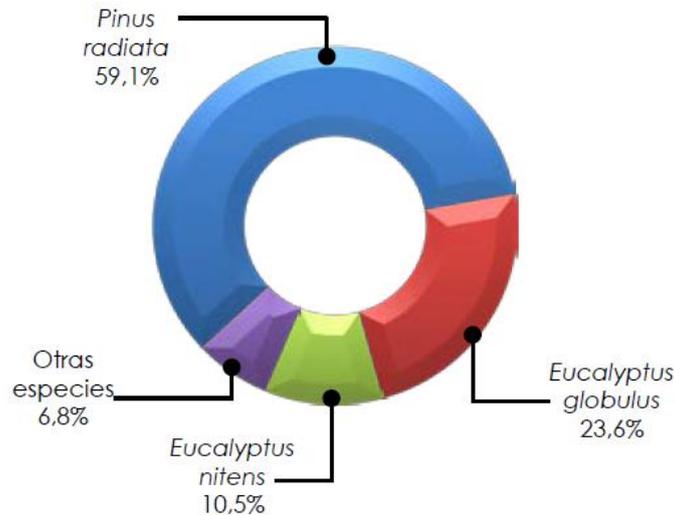


Figura 1: Plantaciones forestales a diciembre de 2014.

(Fuente: INFOR 2017)

Mercado internacional de la madera de pino radiata

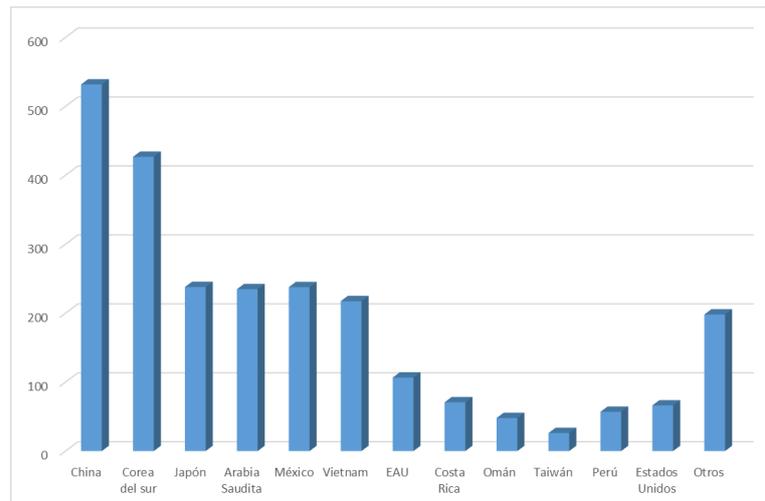


Figura 2: Volumen Exportado de *Pinus radiata*.

(Fuente: Elaboración propia con datos del INFOR 2016)

En la Figura 2, se observan los principales países a los que Chile exporta madera aserrada de *Pinus radiata*, lo que implica cumplir con varias normas fitosanitarias internacionales, como lo es la NIMF-15.

NIMF-15

La madera en bruto se utiliza con frecuencia para el embalaje de madera. Puede ocurrir que dicha madera no sea sometida a suficiente procesamiento o tratamiento que elimine las plagas, convirtiéndola en una vía para la introducción y dispersión de plagas. Además, el embalaje de madera es muy a menudo reutilizado, reparado o refabricado, con lo cual, resulta difícil



determinar el verdadero origen de cualquier parte del embalaje de madera, y por consiguiente, no puede determinarse su estatus fitosanitario. El proceso normal para efectuar un análisis de riesgo con el fin de determinar la necesidad de las medidas y la intensidad con que han de aplicarse es con frecuencia imposible para el embalaje de madera, puesto que puede desconocerse tanto su origen como su estatus fitosanitario. Por tal motivo, la norma NIMF-15 describe las medidas que además de ser aceptadas en el ámbito mundial, han sido aprobadas y que todos los países podrán aplicar al embalaje de madera para eliminar en su totalidad el riesgo de la mayoría de las plagas cuarentenarias, que son organismos capaces de producir daños de importancia económica y/o ambiental y que no han sido detectados en Chile y además reducir considerablemente el riesgo de otras plagas que puedan estar relacionadas con dicho embalaje (SAG, 2017).

La NIMF-15 regula el embalaje de madera utilizado en el comercio internacional y describe las medias fitosanitarias para reducir el riesgo de introducción y/o dispersión de plagas relacionadas con el embalaje de madera, incluida la madera de estiba (SAG, 2017).

Esta norma fue aprobada por la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF) o International Plant Protection Convention (IPPC), en marzo del 2002, realizándole modificaciones en 2006 y 2009, hasta contar con la versión actual 2016.

Cuando se utilice la tecnología de cámara de calor convencional el requisito fundamental es que se alcance una temperatura mínima de 56°C durante un periodo mínimo de 30 minutos continuos en todo el perfil de la madera (incluida su parte central) (NIMF-15, 2016).

Cuando se utiliza calentamiento dieléctrico (por ejemplo, microondas) debe calentarse hasta alcanzar una temperatura mínima de 60° C durante 1 minuto continuo en todo el perfil de la madera (incluida su superficie). (NIMF-15, 2016)

El tiempo mínimo estimado para conseguir esterilizar la madera mediante el tratamiento con calor HT 56/30 °C/min varía entre 58 y 224 minutos en madera de 16 y 100 mm respectivamente. Al iniciar el secado la temperatura interna evoluciona rápidamente hasta la temperatura de bulbo húmedo lo que favorece la aplicación de programas de secado convencional acelerado y de alta temperatura para cumplir con las exigencias de HT de la norma NIMF 15. (Ananías y Venegas, 2005).

Tratamiento térmico de la madera, con fines fitosanitarios

Un método convencional para esterilizar la madera con calor es utilizando vapor, esta técnica consiste en introducir la madera empalillada o apilada sin separadores en cámaras de vapor (comúnmente denominadas Reco en Chile) o empalillada en hornos de secado. Ambas técnicas están reguladas por normas fitosanitarias internacionales (NIMF-15, 2009) con un reglamento específico para el pino radiata chileno (Reglamento específico (NIMF-15, 2013).

La mayor parte de la industria chilena utiliza hornos convencionales que funcionan forzando el aire caliente a fluir a lo largo de capas de madera separadas por palillos de aproximadamente 19 mm de espesor (Ananías et al. 2013).

En Chile para el caso del pino radiata, los programas de secado usuales en la industria son el secado a temperatura convencional SC 70/50 o 70/40 °C/°C, el secado convencional acelerado SCA 70/60, 80/60, 90/60 o 100/70 °C/°C y el secado por alta temperatura SAT 110/70, 120/70,



125/75 o 140/90 °C/°C. En todos estos casos el programa de secado se inicia con un calentamiento inicial con la mínima diferencia psicométrica hasta la temperatura de bulbo húmedo y posteriormente un aumento de la temperatura ambiente hasta la temperatura del programa respectivo (Ananías y Venegas, 2005).

Radiofrecuencia utilizada en la madera

La madera es un material dieléctrico y como tal frente a un campo eléctrico se polariza tal como se indica en la Figura 3.

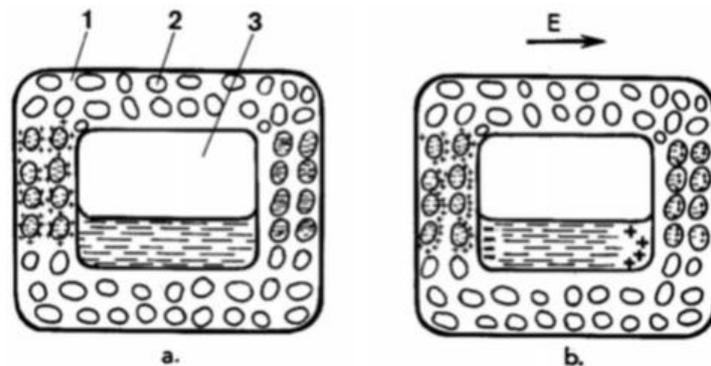


Figura 3: Esquema de la sección transversal de la madera. 1: pared celular, 2: Microcapilares, 3: cavidad celular a) Sin campo eléctrico b) Polarización con campo eléctrico E

(Fuente: Torgovnikov, 1993)

Siendo así las propiedades dieléctricas de la madera, tal como el factor de pérdida, juegan un rol fundamental en la transformación de la energía electromagnética generada por el campo eléctrico en calor, durante el proceso de calentamiento de la madera (Resch 2006). A una determinada frecuencia, el factor de pérdida, es condicionado por la humedad, la temperatura y la especie de madera (Avramidis et al. 2016). Con todo, el calentamiento de la madera por radiofrecuencia resulta ser rápido y eficiente (Zhao & Wang 2017).

Tratamiento térmico a base de radiofrecuencia

El calentamiento en alta frecuencia incluye a las microondas MO y a las ondas de radiofrecuencia (RF). El calentamiento por microondas la penetración es superficial y rápida, en cambio el calentamiento por radiofrecuencia es recomendable para maderas gruesas, la penetración es profunda dada su mayor longitud de onda (Resch 2006, Dubey et al. 2016). Así, el calentamiento dieléctrico de la madera por radio frecuencia (RF) es potencialmente el método más favorable de pasteurización (fitosanidad) para maderas y trozas que son objeto de comercio internacional en la condición verde. Durante el calentamiento por radiofrecuencia (RF) se debe mantener la uniformidad del campo electromagnético en el interior de la madera, para favorecer la homogeneidad de su calentamiento (Lazarescu y Avramidis 2012a,b).

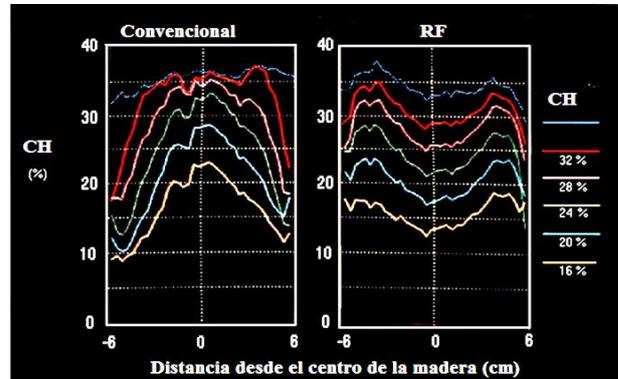
Análisis comparativo entre el calentamiento convencional y a base de radiofrecuencia

La distribución del contenido de humedad en la madera en dirección longitudinal y transversal son bastante uniformes y similares durante el calentamiento por RF / V, excepto cerca de los extremos de la madera y las superficies. (Zhang et al. 1997) el flujo de la humedad se lleva a



cabo tanto en la dirección transversal y longitudinal con contenidos de humedad arriba y por abajo del punto de saturación de las fibras. En particular la distribución de humedad en el interior de la madera es inversa al calentamiento tradicional con aire húmedo (Figura 4).

Figura 4: Distribución de humedad en madera durante el calentamiento y alta frecuencia.
(Fuente: <http://www.fdc.co.jp/>)



Igualmente los resultados preliminares de este trabajo (Esquivel et al. 2017), mostraron que el tiempo de calentamiento por radio frecuencia es 40% más rápido que el calentamiento convectivo con vapor, en pilas de madera de pino radiata verde para embalajes (Figura 5).

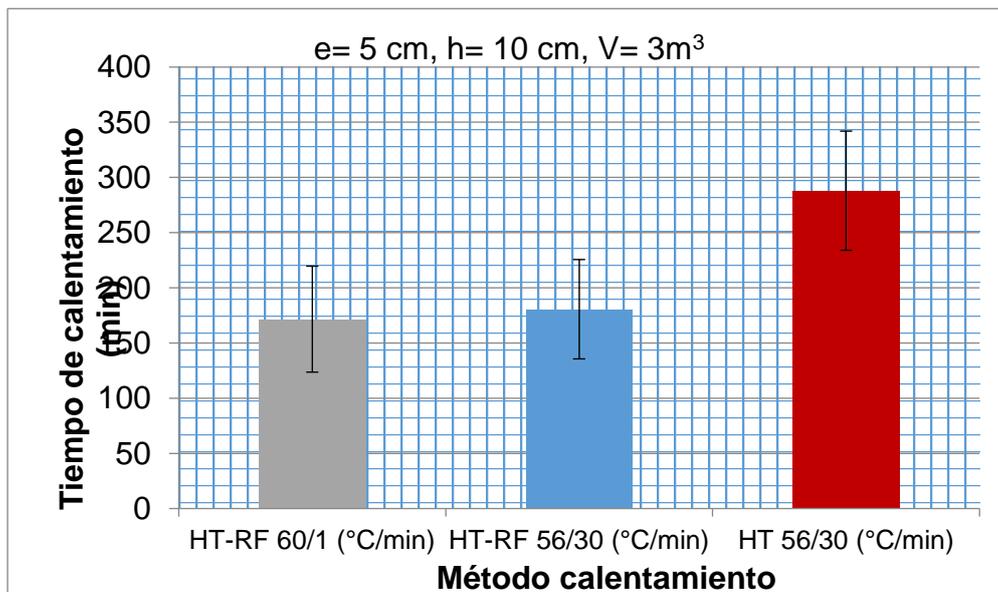


Figura 5: Tiempo calentamiento madera apilada para embalajes de pino radiata.
(e=espesor de la madera, h=altura de la pila, V=volumen de madera)

Referencias

Ananías, R.A. Venegas, R. 2005 Industrial drying of radiata pine. Heat sterilization time and wood temperature evolution time, Maderas. Ciencia y tecnología 7(3): 179-188.

Ananías, R. A.; Venegas, R.; Salvo, L.; Elustondo, D. 2013. Kiln schedule certification for industrial drying of radiata pine. Wood Fiber Sci 45(1): 98-104.



- Avramidis, S. 2016.** Dielectric properties of four softwood species at low-level radio frequencies for optimized heating and drying. *Drying Technol* 34(7):753-760.
- Dubey, M. K.; Janowiak, J.; Mack, R.; Elder, P.; Hoover, K. 2016.** Comparative study of radio-frequency and microwave heating for phytosanitary treatment of wood. *Eur J Wood Prod* 74: 491-500.
- Esquivel, H.; Sepúlveda, V.; Torres, J.; Salvo, L.; Ananías, R.A. 2017.** Radio frequency heating times for sterilization radiata pine solid piles. Paper IRG/WP WP 17-40815. 3p.
- INFOR. 2017,** Anuario Forestal 2016. Boletín Técnico N° 154. Instituto Forestal. Chile. 184p.
- INFOR. 2016.** La industria del aserrío. Boletín Técnico N° 155. Instituto Forestal. Chile. 115p.
- Lazarescu, C.; Avramidis, S. 2012a.** Heating characteristics of softwood in high frequency field. *Pro ligno* 8(4):18-26.
- Lazarescu, C.; Avramidis, S. 2012b.** Heating characteristics of western hemlock (*Tsuga heterophylla*) in a high frequency field. *Eur J Wood Prod* 70:489-496.
- NIMF-15. 2016.** Reglamentación del embalaje de madera utilizado en el comercio internacional. Normas Internacionales para Medidas Fitosanitarias. Revisión NIMF15, Anexo 1. Tratamientos aprobados que están asociados con el embalaje de madera (2013). FAO. Roma.
- NIMF-15. 2009** International standards for phytosanitary measures: guidelines for regulating wood packaging material in international trade. ISPM No. 15. Rome, Italy.
- Prado, D. 2015.** Plantaciones Forestales, más allá de los árboles. Santiago de Chile, 170.pp
- Resch, H. 2006** High-frequency electric current for drying of wood historical perspectives, *Maderas. Ciencia y tecnología* 8(2): 67-82.
- Rodríguez, F. S.; Soalleiro, R. J. R. 2004.** Capítulo: Selvicultura de *Pinus radiata*.
- Schiavini, A.; Pedraza, S. N.; Crespo, E. A.; González, R.; Dans, S. L. 1999.** Abundance of dusky dolphins (*Lagenorhynchus obscurus*) off north and central Patagonia, Argentina, in spring and a comparison with incidental catch in fisheries. *Marine Mammal Science*, 15(3):828-840.
- SAG. 2017.** ¿Que es la NIMF-15?. Servicio Agrícola y ganadero. Ministerio de Agricultura, Santiago. Chile.
- Torgovnikov, G.I. 1993.** Dielectric properties of wood and Wood-based materials. Springer, N. York.
- Zhang, L.; Avramidis, S. y Hatzikiriakos, S. G. 1997.** Moisture flow characteristics during radio frequency vacuum drying of thick lumber. *Wood Science and Technology* 31(4): 265-27.
- Zhao, L.; Wang, S. 2017.** Developing treatment protocols for disinfesting pine wood products using radio frequency energy. *Eur J Wood Prod* <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1189-4>.



9. OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la interacción entre la calidad de la madera tratada térmicamente por radiofrecuencia y el tiempo de calentamiento en pilas de madera verde de pino radiata

Objetivos específicos

- 1) Estimar el tiempo de esterilización con calor por radio frecuencia para madera verde de pino radiata
- 2) Evaluar la calidad de la madera de pino radiata esterilizada mediante calor por radio frecuencia



10. CAPÍTULO I:

Calentamiento por radiofrecuencia para esterilizar *Pinus radiata* como material para embalajes. Parte 1: Tiempo total de tratamiento

Radiofrequency heating for sterilization of wood packaging material of radiata pine. Part 1: Total treatment time

RESUMEN

Se estudió el tiempo total de calentamiento utilizando radiofrecuencia, para esterilizar madera de *Pinus radiata* implementando dos condiciones de tratamiento, 56 °C y 60 °C por 30 y 1 minutos respectivamente, según normas fitosanitarias internacionales.

Los ensayos fueron realizados en un equipo de radiofrecuencia de laboratorio de 3 m³ de capacidad, se determinó el tiempo de calentamiento y se desarrollaron modelos de predicción, en función del espesor, la altura de la pila y el volumen de carga, con unos niveles de confianza superiores al 90%. Dentro de la carga se identificó que es la madera que se encuentra en la superficie, es la que presenta mayores tiempos de tratamiento y el tiempo para ambos tipos de tratamiento resulta similar.

Palabras clave: Radiofrecuencia, embalajes de madera, pino radiata, sanitización, tratamiento con calor.

ABSTRACT

The total heating time was studied using radiofrequency, to sterilize *Pinus radiata* wood by implementing two treatment conditions, 56 °C and 60 °C for 30 and 1 minutes respectively, according to international phytosanitary standards.

The tests were carried out on a 3 m³ laboratory radiofrequency equipment, the heating time was determined and prediction models were developed, depending on the thickness, the height of the battery and the volume of load, with levels of higher than 90%. Within the load it was identified that it is the wood that is on the surface, it is the one that presents greater times of treatment and the time for both types of treatment is similar.

Keywords: Radiofrequency, wood packaging material, radiata pine, sanitation, heat treatment.

INTRODUCCIÓN

El *Pinus radiata* es la especie de mayor interés industrial en Chile, una parte de la producción es utilizada como embalajes de exportación (INFOR 2016) La madera para embalajes de *Pinus radiata* requiere ser esterilizada de acuerdo con las normas fitosanitarias internacionales (NIMF-15, 2013). El principal riesgo fitosanitario del *Pinus radiata* son las plagas cuarentenarias tales como el nematodo del pino *Bursaphelenchus xylophilus* (Hopf-Biziks et al. 2017, Haack et al. 2011, Dwinell 1997, Mamiya 1983, Steiner Y Buhner 1934). El calentamiento con vapor es usualmente utilizado para esterilizar con calor la madera verde de *Pinus radiata* para embalajes



de exportación (Ananias et al. 2015). Igualmente se ha utilizado el tratamiento de secado esta madera (Ananias et al. 2013, Ananias y Venegas 2005).

El calentamiento en alta frecuencia incluye a las microondas MO y a las ondas de radiofrecuencia (RF), en ambos casos el calor se produce en el interior de un material dieléctrico tal como la madera, debido a la vibración molecular ocasionada principalmente por la rotación dipolar y la polarización iónica (Skaar 1998, Torgovnikov 1993). Las propiedades dieléctricas de la madera condicionan la distribución de temperatura durante calentamiento por alta frecuencia (Avramidis 2016, Koubaa et al. 2008) lo cual es además condicionado por la humedad de la madera (Huang et al. 2013).

El calentamiento por microondas implica la generación de ondas mediante el uso de un magnetrón las que son transferidas sobre la superficie del material dieléctrico, el cual generalmente está en movimiento continuo para mejorar la uniformidad del calentamiento. El uso de la alta frecuencia como calentamiento permite proteger y esterilizar alimentos (Marra et al. 2009) y también se ha aplicado para tratar maderas (Payette et al. 2015, Hoover et al. 2010, Leal et al. 2010,). Usando MO la penetración es menos profunda, pero rápida y es recomendable para tratar maderas delgadas (, Henin et al. 2008, Nzokou et al. 2008 Fleming et al. 2004, 2005).

En cambio en el calentamiento por radiofrecuencia la generación de ondas se produce mediante un oscilador de radiofrecuencia, que se aplica sobre dos electrodos entre los cuales se ubica el material dieléctrico tal como la madera (Marra et al. 2009, Resch 2009). La radiofrecuencia es recomendable para maderas gruesas, la penetración es profunda, pero relativamente lenta, diversos autores han demostrado las condiciones de aplicación de radiofrecuencia (combinaciones de temperatura, espesor o diámetro, tiempo y tipo de ambiente) para que puedan ser eliminados de la madera hongos, insectos y nemátodos (Zhao & Wang 2017, Dubey et al. 2016, Lazarescu et al. 2015, Uzunovic et al. 2013 , Lazarescu et al. 2011, , Watanabe et al. 2011 Lazarescu et al. 2009, Tubajika et al. 2007, Fang et al. 2001, Petrič et al. 1998, Dwinell et al. 1994).

Ciertos problemas con la uniformidad de la temperatura en el interior de la madera han sido observados (Dubey et al. 2016, Lazarescu & Avramidis 2012a, Lazarescu et al. 2012b), no obstante la aplicación de calentamiento por radiofrecuencia de 56 °C por 1 minuto ha demostrado ser letal para los nematodos (Uzunovic et al. 2013).

En este trabajo se estudia el tiempo de esterilización con calor por radiofrecuencia de madera apilada de *Pinus radiata* para embalajes de exportación, esto es se desea determinar el tiempo total de calentamiento para alcanzar una condición de 56 o 60 °C de temperatura por un periodo de al menos 30 o 1 minutos respectivamente, en la zona más fría de madera apilada.

METODOLOGÍA

Se utilizó madera aserrada de *Pinus radiata* D. Don, procedente de plantaciones forestales comerciales, cosechadas para una empresa industrial maderera chilena, las piezas se encontraban en condición verde y eran madera central de trozas al azar, cuyas dimensiones nominales como madera aserrada fueron las siguientes: 5cm x 10cm x 306cm, 7.5cm x 10cm x 306cm y 10cm x 10cm x 306cm.



Se utilizó un secador por radiofrecuencia (Saga HF-VD30SA, Shijiazhuang, Hebei, China), con una capacidad de 3 m³ de madera, carga total dimensionada en (1m x 1m x 3m), que oscila a una frecuencia de 6.78 MHz y desarrolla una potencia de 30 kW (Torres 2017).

Para la obtención de las temperaturas de la madera se instalaron desde la superficie hasta el centro de cada pila y a una distancia equidistante, 3 sensores de fibra óptica, Figura 1, se monitoreó la temperatura, utilizando un equipo de adquisición de datos de seis canales (Oriental Rayzer, ORZ-FTM1000, Beijing, China), siendo los datos almacenados en una computadora cada 10 segundos.

Se desarrolló un diseño de experimentos multifactorial, con tres factores y tres niveles (Separación de placa(15cm, 20cm y 30cm), Volumen de carga (50%, 75% y 100%) y Espesor (5cm, 7.5cm y 10cm) , los factores fueron seleccionados con base en limitaciones técnicas, los diferentes niveles, en el caso de la separación de placa y el porcentaje de carga, corresponden a las características del equipo y los espesores, son los más utilizados por la industria.

Con el fin de tener un nivel de confianza alto, se determinó realizar tres réplicas del diseño de experimentos, las cuales fueron aplicadas para las tres zonas de donde se obtuvieron las temperaturas.

Las cargas de madera apilada fueron divididas en cuatro paquetes y el acomodo de los sensores de temperatura como se ve en la Figura 1.

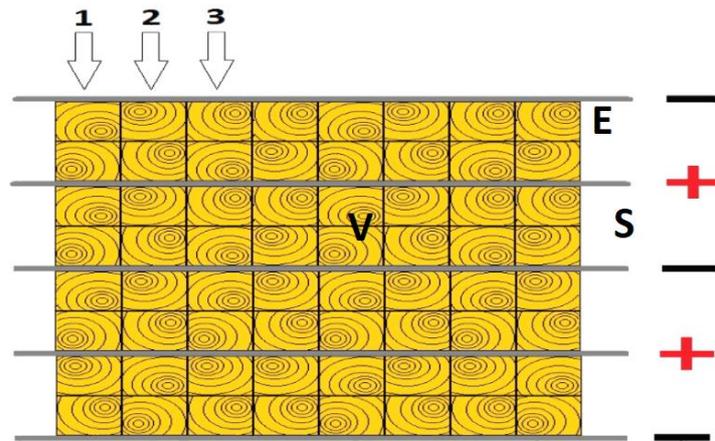


Figura 1: Acomodo de una carga de madera dentro del equipo cuya configuración es (Espesor (E)=10cm, Separación de placa (S)=20 cm y Volumen de carga (V)= 100%).

Se determinó el tiempo de calentamiento para 56/30 y 60/1 (°C/min), en las tres profundidades en las que se midió la temperatura de la madera.

Los tiempos de calentamiento obtenidos, fueron analizados en el programa de computo Design-Expert® Versión 10, con el fin de determinar cuáles son los factores que más influyen en el tiempo de calentamiento y así poder optimizar el proceso de tratamiento de esterilización de la madera, utilizando radiofrecuencia, a partir del análisis de varianza se obtendrán modelos de predicción para el tiempo total de calentamiento. Para determinar similitudes o semejanzas en los tiempos de calentamiento de la madera dependiendo de su ubicación en la carga y entre replicas,



se utilizó el programa de computo Statgraphics Centurion XV.II., usando el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher con un 95% de confiabilidad.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El tiempo total de calentamiento por radiofrecuencia para alcanzar las condiciones de 56/30 y 60/1 (°C/min) en *Pinus radiata* apilado se presenta en la Tabla 1, los tiempos totales corresponden a las diferentes condiciones producto del diseño de experimentos, así como de las tres zonas de donde se obtuvieron las temperaturas, se hace alusión a las desviaciones estándar con el fin de individualizar los tiempos según las condiciones específicas, como promedio de las tres replicas.

Tabla 1: Tiempo total de esterilización en segundos de *Pinus radiata* mediante calor por radiofrecuencia, promedio de las tres replicas, para las tres zonas de temperatura analizadas.

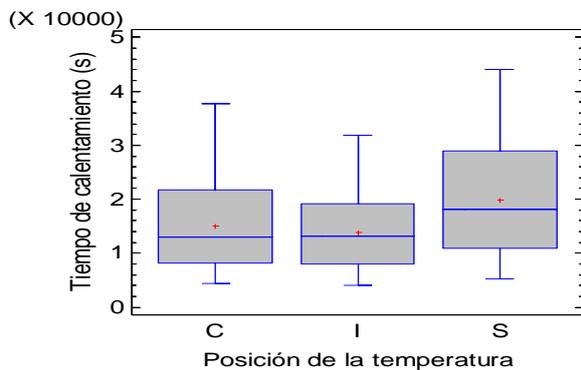
| Diseño de experimentos | | | Tiempo de calentamiento 56° C/30 min, (s) | | | Tiempo de calentamiento 60° C/1 min, (s) | | |
|------------------------|-----------------|-------------|---|------------|--------|--|------------|--------|
| Espesor (cm) | Separación (cm) | Volumen (%) | Superficie | Intermedio | Centro | Superficie | Intermedio | Centro |
| 5 | 15 | 50 | 7480 | 5240 | 5960 | 7320 | 3660 | 3330 |
| | | | (1769) | (102) | (49) | (1560) | (49) | (30) |
| 5 | 15 | 75 | 12305 | 6640 | 8700 | 10280 | 5370 | - |
| | | | (935) | (1732) | (2018) | - | (2018) | - |
| 5 | 15 | 100 | 17075 | 7780 | 7965 | 15123 | 6350 | 4410 |
| | | | (815) | - | - | (2326) | - | - |
| 5 | 20 | 50 | 12590 | 9360 | 12450 | 8880 | 7717 | 8280 |
| | | | - | (1420) | (1347) | (1197) | (1347) | - |
| 5 | 20 | 75 | 18277 | 9700 | 9000 | - | 8620 | 7740 |
| | | | (3140) | (440) | (380) | - | (380) | - |
| 5 | 20 | 100 | - | 13370 | 12680 | - | 11507 | - |
| | | | - | (30) | (1177) | - | (1177) | - |
| 5 | 30 | 50 | 28170 | 18570 | 28860 | 27770 | 18075 | 23570 |
| | | | (850) | (780) | (705) | - | (705) | (5230) |
| 5 | 30 | 75 | 33180 | 20040 | 27330 | - | 20700 | 28920 |
| | | | - | (720) | (1260) | - | (1260) | (2798) |
| 5 | 30 | 100 | 32475 | 25200 | 27960 | - | 24815 | 27660 |
| | | | (115) | (30) | (135) | - | (135) | - |
| 7.5 | 15 | 50 | 7000 | 4980 | 5490 | 4920 | 3540 | 5100 |
| | | | (1164) | (240) | (300) | (60) | (300) | - |
| 7.5 | 15 | 75 | 7500 | 7530 | 7240 | 6440 | 6240 | 4080 |
| | | | (1461) | (30) | (60) | (1379) | (60) | - |
| 7.5 | 15 | 100 | - | 11500 | 9580 | 17730 | 10680 | 8530 |
| | | | - | - | - | - | - | - |
| 7.5 | 20 | 50 | 9027 | 9290 | 7185 | 8327 | 8130 | 8595 |
| | | | (2052) | - | - | (2379) | - | (715) |
| 7.5 | 20 | 75 | 13185 | 11617 | 10830 | 12525 | 10587 | 10537 |
| | | | (105) | (1545) | (1565) | (75) | (1565) | (1190) |
| 7.5 | 20 | 100 | - | - | 13080 | 11330 | - | 12240 |



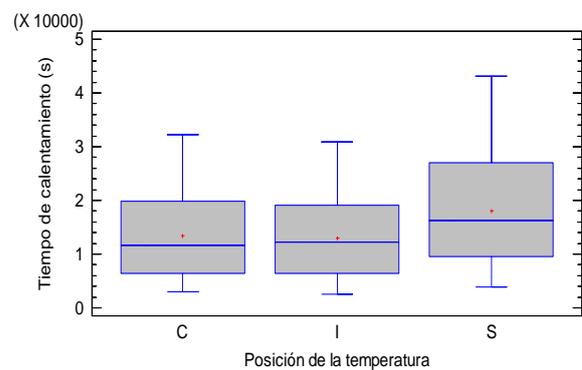
| | | | | | | | | |
|----------------------------------|----|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | - | - | - | - | - | - |
| 7.5 | 30 | 50 | 17873 | 18880 | 14465 | 17353 | 12540 | 13700 |
| | | | (272) | - | - | (53) | - | (40) |
| 7.5 | 30 | 75 | 25340 | 23015 | 17760 | 25620 | 22480 | 23840 |
| | | | - | (125) | - | - | - | (5340) |
| 7.5 | 30 | 100 | 28460 | 21230 | 22157 | 30110 | 21010 | - |
| | | | (1410) | - | - | (2420) | - | - |
| 10 | 20 | 50 | 12845 | 5835 | 6510 | 9620 | 5020 | 5845 |
| | | | (2285) | (565) | (928.04) | - | (928.04) | (575) |
| 10 | 20 | 75 | 14860 | 10850 | 13815 | 14605 | 9820 | 11450 |
| | | | (700) | (1610) | (1840) | (625) | (1840) | (2033) |
| 10 | 20 | 100 | 19710 | 17553 | 19990 | 20825 | 17347 | 19633 |
| | | | (670) | (2252) | (2456) | (115) | (2456) | (1575) |
| 10 | 30 | 50 | 20220 | 15240 | 12605 | 28960 | 14170 | 11800 |
| | | | - | (2280) | (1910) | (980) | (1910) | (1340) |
| 10 | 30 | 75 | 25860 | 17640 | 17220 | 30585 | 16740 | 22307 |
| | | | - | - | (360) | (3585) | (360) | (3977) |
| 10 | 30 | 100 | 30015 | 24950 | 27650 | 34130 | 24950 | - |
| | | | (3575) | - | - | - | - | - |
| Coefficiente de variación | | Total: | 7.64% | 5.53% | 8.08% | 6.51% | 7.51% | 6.99% |
| | | 7.05% | | | | | | |

Con símbolo -: Sin datos suficientes, entre paréntesis (): Desviación estándar

Se obtuvo y analizó el tiempo total de calentamiento, para tres zonas de donde se obtuvieron las temperaturas, se compararon los tiempos utilizando el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher con un 95% de confianza, obteniendo que el tiempo de calentamiento por radiofrecuencia en la superficie de la pila, es mayor, dada la distribución de calor desde el interior (central) a la superficie (superficial) de la carga, en la Figura 2, gráficamente se observa este comportamiento, las diferencias se presentan de igual manera para ambos tipos de tratamiento analizados.



a) Condición de 56° C por 30 min



b) Condición de 60° C por 1 min

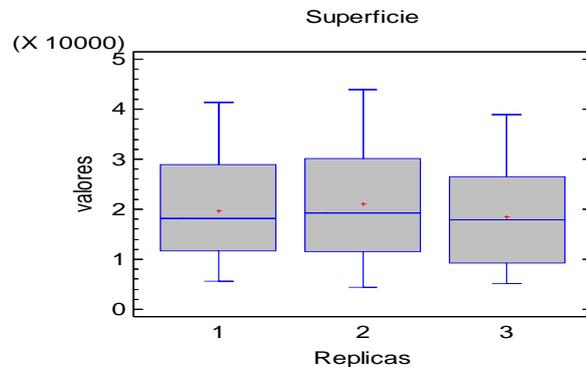
Figura 2: Variación espacial del tiempo de calentamiento por radiofrecuencia.

C: Central, I: Intermedia, S: Superficie.



El diseño de experimentos marca la realización de tres réplicas, es por ello que se realizó una prueba de rangos múltiples, utilizando el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, con un 95% de confianza, dicho análisis se desarrolló para las tres zonas de donde se obtuvieron los tiempos totales de tratamiento térmico y para los dos tipos de tratamiento, en la Figura 3, sólo se muestra este análisis de forma gráfica para el caso de la superficie del tratamiento de 56°C/30 min.

Figura 3:
Método: LSD, análisis de réplicas
(superficie 56°/30 min)



Los modelos de predicción sobre el tiempo total de calentamiento por radiofrecuencia son presentadas en la Tabla 2, los modelos de predicción fueron realizados a partir de un análisis de varianza del total de los datos obtenidos, para cada posición de donde se obtuvieron las temperaturas y para cada condición de tratamiento, se realizó una depuración de datos atípicos utilizando la prueba de residuales, hasta lograr un modelo con un R² y un R ajustado, superiores a 0.9 el cual representa un nivel de confianza superior al 90%. En los modelos se incluyen las variables consideradas en el diseño de experimentos, así como las interacciones significativas para el modelo.

Tabla 2: Modelos de predicción del tiempo total de calentamiento.

| Tratamiento | Posición | Modelo | Valores de R | |
|----------------|------------|--|--------------|----------|
| | | | Cuadrado | Ajustado |
| 56° C / 30 min | Centro | $Tiempo = 28103.52 - 7537.78E + 623.14S - 237.58V - 210.12ES + 49.86EV + 555.79E^2 + 38.68S^2$ | 0.9449 | 0.9342 |
| | Intermedio | $Tiempo = -3059.86 - 1891.27E + 914.20S - 46.10V + 24.94EV$ | 0.9304 | 0.9231 |
| | Superficie | $Tiempo = 8841.65 - 8243.80E + 1650.74S + 149.82V - 87.86ES + 626.38E^2$ | 0.9467 | 0.9391 |
| 60° C / 1 min | Centro | $Ln(Tiempo) = 5.93 + 0.06E + 0.19S - 0.014V - 0.013ES + 3.69 \times 10^{-3}EV$ | 0.929 | 0.9016 |



| | | | | |
|--|------------|--|--------|--------|
| | Intermedio | $Tiempo = -14234.7-547.07E+1395.653S-58.99V-69.69ES+28.4EV$ | 0.9325 | 0.924 |
| | Superficie | $Tiempo = 43233.75 - 9940.67E - 1784.15S + 168.7V + 694.9E^2 + 64.62S^2$ | 0.9202 | 0.9078 |

Tiempo (segundos), S=Separación de placa (cm), V=volumen de carga (%), E=Espesor (cm)

De acuerdo al análisis de varianza (Tabla 4) que corresponde a la temperatura de la superficie para la condición 56°C/30 min, se observa que la separación de placas es la variable que más influye en el tiempo de calentamiento, seguido por el porcentaje de carga y en menor cantidad el espesor de la madera, los nivel de influencia son determinados por los valores F, este comportamiento fue similar para las tres zonas de toma de temperatura y para ambos tipos de tratamiento analizados tratamiento.

Tabla 3: Análisis de varianza.

| Tabla de análisis de varianza ANOVA (Superficie) | | | |
|--|-------------------------|---------|----------|
| Fuente | Suma de cuadrados | Valor F | Valor P |
| Modelo | 2.59 X 10 ¹² | 124.41 | < 0.0001 |
| A-Espesor | 8.38 X 10 ¹⁰ | 20.11 | < 0.0001 |
| B-Separación | 1.26 X 10 ¹² | 303.05 | < 0.0001 |
| C-Carga | 3.38 X 10 ¹¹ | 81.03 | < 0.0001 |
| AB | 3.40 X 10 ¹⁰ | 8.17 | 0.0071 |
| A ² | 1.42 X 10 ¹¹ | 34.00 | < 0.0001 |

Se compararon los tiempos de tratamiento térmico, para ambos tipos de tratamiento 56°/30 min y 60°/1 min, mediante dos procedimientos de comparación múltiple, los cuales fueron, diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher y el procedimiento de comparación múltiple de Duncan, ambos a un 95% de confianza, el resultado demostró que no existe una diferencia mínima significativa, entre los tiempos de ambos tratamientos.

CONCLUSIONES

El tiempo total de esterilización para alcanzar las condiciones 56/30 y 60/1 (°C/min) mediante calor por radiofrecuencia, en madera de *Pinus radiata* para embalajes de exportación es condicionado significativamente por la separación de placa, el volumen y el espesor de la madera, en orden decreciente. El tiempo es predicho satisfactoriamente por modelos basados en los factores antes señalados. El tiempo total de tratamiento térmico con fines fitosanitarios para las condiciones de 56°C/30min y 60°C/1min, no presenta diferencias estadísticamente significativas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento de este trabajo al proyecto Conicyt- Fondef Idea 2-etapas ID14I10231.



BIBLIOGRAFÍA

- Ananías, R.A.; Venegas, R. 2005.** Secado industrial del pino radiata: Tiempo de esterilización con calor y evolución temporal de la temperatura. *Maderas-Cienc Tecnol* 7(3): 176-188.
- Ananías, R.A.; Sepúlveda, V.; Salvo, L. 2015.** Tratamientos de esterilización con calor de pino radiata para embalajes de exportación. (In Spanish). In Proceeding of XX Taller Aserraderos Expocorma, 72 pp. Concepcion, Chile.
- Ananías, R. A.; Venegas, R.; Salvo, L.; Elustondo, D. 2013.** Kiln schedule certification for industrial drying of radiata pine. *Wood and Fiber Science* 45(1): 98-104.
- Avramidis, S. 2016.** Dielectric properties of four softwood species at low-level radio frequencies for optimized heating and drying. *Drying Technol* 34(7):753-760
- Dubey, M. K.; Janowiak, J.; Mack, R.; Elder, P.; Hoover, K. 2016.** Comparative study of radio-frequency and microwave heating for phytosanitary treatment of wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 74: 491-500.
- Dwinell, L.D. 1997.** The pinewood nematode: regulation and mitigation. *Annu Rev Phytopathol* 35:153-166.
- Dwinel, L.D.; Avramidis, S.; Clark, J.E. 1994.** Evaluation of a radio-requency/vacuum dryer for eradicating the pinewood nematode in green sawn wood. *Forest Prod J* 44(4):19-24.
- NIMF-15. 2013.** Reglamentación del embalaje de madera utilizado en el comercio internacional. Normas Internacionales para Medidas Fitosanitarias. Revisión NIMF15, Anexo 1. Tratamientos aprobados que están asociados con el embalaje de madera (2013). FAO. Roma.
- Fang, F.; Ruddick, J.; Avramidis, S. 2001.** Application of radio-frequency heating to utility poles. Part 3. The use of RF heating to eradicate decay fungi in pole material. *Forest Prod J* 51(11/12):51-55.
- Fleming, M.R.; Janowiak, J.J.; Kimmel, J.D.; Halbrendt, J.M.; Bauer, L.S.; Miller, D.L.; Hoover, K. 2005.** Efficacy of commercial microwave equipment for eradication of pine Wood nematodes and cerambycidae larvae infesting red pine. *Forest Prod J* 55(12):226-232.
- Fleming, M.R.; Janowiak, J.J.; Kearns, J.; Shield, J.E.; Roy, R.; Agrawal, D.K.; Bauer, L.S.; Miller, D.L.; Hoover, K. 2004.** Parameters for scale-up of lethal microwave treatment to eradicate cerambycid larvae infesting solid wood packing materials. *Forest Prod J* 54(7/8):80-84.
- Haack, R.A., Uzunovic, A.; Hoover, K.; Cook, J.A. 2011.** Seeking alternatives to probit 9 when developing treatments for wood packaging materials under ISPM N° 15. *Bulletin OEPP/EPPO* 41:39-45.
- Henin, J.M.; Charron, S.; Luybaert, P.; Jourez, B.; Hébert, J. 2008.** Strategy to control the effectiveness of microwave treatment of wood in the framework of the implementation of ISPM 15. *Forest Prod J* 58(12):75-81.



- Hoover, K.; Uzunovic, A.; Gething, B., Dale, A.; Leung, K.; Ostiguy, N.; Janowiak, J.J. 2010.** Lethal temperatura for pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in infested wood using microwave energy. *Journal of Nematology* 42(2):101-110.
- Hopf-Biziks, A.; Schroder, T.; Schutz, S. 2017.** Long-term survival and non-vector spread of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, via wood chips. *Forest Pathology* DOI 10.1111/efp.12340
- Huang, R.; Wu, Y.; Zhao, Y.; Lu, J.; Jiang, J.; Chen, Z. 2013.** Factors affecting the temperature increasing rate in wood during radio-frequency heating. *Drying Technol* 31:246-252.
- INFOR. 2016.** La industria del aserrío 2015. (In Spanish). Boletín Estadístico N° 155, Instituto Forestal, 128 pp, Santiago, Chile.
- Koubaa, A.; Perré, P.; Hutcheon, R. M.; y Lessard, J. 2008.** Complex dielectric properties of the sapwood of aspen, white birch, yellow birch, and sugar maple. *Drying Technol* 26(5): 568-578.
- Lazarescu, C.; Breuil, C.; Avramidis, S. 2015.** Phytosanitation of mountain pine beetle infected lodgepole pine using dielectric fields at radio frequencies. *Maderas-Cienc Tecnol* 17(2):221-228.
- Lazarescu, C.; Avramidis, S. 2012a.** Heating characteristics of softwood in high frequency field. *Proligno* 8(4):18-26.
- Lazarescu, C.; Avramidis, S. 2012b.** Heating characteristics of western hemlock (*Tsuga heterophylla*) in a high frequency field. *Eur J Wood Prod* 70:489-496.
- Lazarescu, C.; Dale, A.; Uzunovic, A.; Breuil, C.; Avramidis, S. 2011.** Radio frequency heating pasteurization of pine wood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) infected wood. *Eur J Wood Prod* 69-573-578.
- Lazarescu, C.; Avramidis, S. 2011.** Radio – frequency heating kinetics of softwood logs. *Drying Technol* 29(6): 673–681.
- Lazarescu, C.; Plattner, A.; Hart, F.; Breuil, C.; Avramidis, S. 2009.** Pasteurization of hemlock by radio frequency heating: A preliminary study. *Forest Prod J* 59(4):79-83.
- Leal, I.; Alle, E.; Humble, L.; Sela, S.; Uzunovic, A. 2010.** Phytosanitary risks associated with the global movement of forest products: A commodity-based approach. Canadian Forest service, Pacific Forestry Center Information Report BC-X-419. 42p.
- Mamiya, Y. 1983.** Pathology of the pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*. *Ann Rev Phytopathol* 21: 201-220.
- Marra, F.; Zhang, L.; Lyng, J.G. 2009.** Radio frequency treatment of foods: Review of recent advances. *Journal of Food Engineering* 91(4):497-508.



- Nzokou, P.; Tourtellot, S.; Kamdem, D. P. 2008.** Kiln and microwave heat treatment of logs infested by the emerald ash borer (*Agrilus planipennis* Fairmaire)(Coleoptera: Buprestidae). *Forest Prod J* 58(7/8): 68.
- Payette, M., Work, T.; Drouin, K.; Koubaa, A. 2015.** Efficacy of microwave irradiation for phytosanitation of wood packing materials. *Industrial Crops and Products* 69:187-196.
- Petrič, M.; Pohleven, F.; Turel, I.; Šegedin, P.; White, A. J.; Williams, D. J. 1998.** Complexes of copper (II) carboxylates with 2-aminoethanol-syntheses, characterization and fungicidal activity; crystal structure of $Cu(O_2CC_8H_{17})_2(NH_2C_2H_4OH)_2$. *Polyhedron* 17(2): 255-260.
- Resch, H. 2009.** Drying Wood With High Frequency Electric Current, Society of Wood Science and Technology, Madison WI 53726-2398 (USA). ISBN 978-0-9817876-1-9.
- Skaar, C. 1998.** Wood-water relations. Springer, N. York.
- Steiner, G.; Buhrer, E.M. 1934.** *Aphelenchoides xylophilus*, n. sp., a nematode associated with blue-stain and other fungi in timber. *Journal of Agriculture Research* 48: 949-95.
- Torgovnikov, G. 1993.** Dielectric properties of wood and wood based materials. Springer, N. York.
- Torres, J. 2017.** Caracterización, instalación y puesta en marcha de un secador de madera por radiofrecuencia y vacío. Habilitación Profesional, Ingeniería Civil Mecánica, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.
- Tubajika, K.M.; Jonawiak, J.J.; Mack, R.; Hoover, K. 2007.** Efficacy of radio frequency treatment and its potential for control of sapstain and wood decay fungi on red oak, poplar, and southern yellow pine wood species. *J Wood Sci* 53:258-263.
- Uzunovic, A.; Gething, B.; Coehlo, A.; Dale, A.; Janowiak, J.; Mack, R.; Hoover, K. 2013.** Lethal temperature for pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in infested wood using radio frequency (RF) energy. *Journal of Wood Science* 59:160-170.
- Watanabe, K.; Abubakari, A.; Lazarescu, C.; Avramidis, S. 2011.** Softwood heating in radio frequency fields. *Eur J Wood Prod* 69: 295–301.
- Zhao, L.; Wang, S. 2017.** Developing treatment protocols for disinfecting pine wood product using radio frequency energy. *Eur J Wood Prod* DOI 10.1007/s00107-017-1189-4.



11. CAPÍTULO II:

Calentamiento por radiofrecuencia para esterilizar pino radiata como material para embalajes. Parte 2: Calidad de la madera

Radio frequency heating for sterilization of wood packaging material of radiata pine. Part 2: Wood quality

RESUMEN

Se estudió la calidad de la madera apilada de pino radiata sometida a calentamiento mediante radiofrecuencia para esterilizarla bajo las condiciones requeridas por las normas internacionales fitosanitarias.

Los ensayos fueron realizados en un equipo de radiofrecuencia de laboratorio de 3 m³ de capacidad. Se determinaron los alabeos y los cambios dimensionales como función del espesor, la altura de la pila y el volumen de carga de madera.

Los resultados muestran que la madera tratada con calor por radiofrecuencia con fines de esterilización no se ve afectada en la calidad, ya que en el 74.5% de los casos no se presentaron alabeos, los cambios dimensionales y la pérdida de humedad se presentó en niveles muy bajos.

Palabras clave: Alabeos, alta frecuencia, cambios dimensionales, *Pinus radiata*, tratamiento térmico.

ABSTRACT

In this paper the quality of the of radiata pine piled wood subjected to radio frequency heating for sterilization was studied under the conditions required by international phytosanitary standards.

The runs were performed on a radio frequency laboratory equipment of 3 m³ capacity. Warps and dimensional changes were determined as a function of thickness, pile height and wood volume.

The results show that the wood treated with radiofrequency heat for sterilization purposes is not affected in the quality, since in 74.5% of the cases there were no warps, the dimensional changes and the loss of humidity was presented at very high levels. low.

Keywords: High frequency, dimensional changes, heat treatment, *Pinus radiata*, warps, wood packaging material.

INTRODUCCIÓN

En Chile la industria maderera está basada principalmente en la transformación de pino radiata (INFOR, 2016). Una parte de la producción de madera aserrada, particularmente la madera juvenil, es empleada como material de embalajes y requiere ser esterilizada por norma con fines fitosanitarios, usualmente mediante calor convencional (Ananias et al. 2013).



Como proceso de esterilización con calor se requiere un buen compromiso entre el tiempo y la calidad del material tratado a costos razonables (Wang et al. 2008). El tiempo de esterilización con calor tradicional es generalmente más largo que el utilizando calor dieléctrico (Zhao & Wang 2017, Esquivel et al. 2017). Igualmente las propiedades dieléctricas de la madera condicionan su comportamiento frente al calentamiento RF (Resch 2009). En particular durante el calentamiento RF es importante la conversión de energía eléctrica en energía térmica, que está ligada al factor de pérdida, propiedad que es condicionada tanto por la humedad y la temperatura de la madera como también por la dirección del grano (Avramidis et al. 2016). A alta humedades de la madera igualmente el factor de pérdida es alto y varía poco favoreciendo el calentamiento RF (Huang et al 2013).

Igualmente un mayor tiempo de procesamiento con calor, usando más baja temperatura de tratamiento, resulta generalmente en una disminución de la calidad de la madera procesada (Simpson 2004, Straze et al. 2011). Lo ideal sería mantener tiempo y costos del proceso de tratamiento térmico, en combinación con mejoras la calidad de la madera tratada (Tarvainen 2005).

Por otra parte, la calidad de la madera para embalajes es condicionada por las características de la madera juvenil, esto es una alta desviación del grano (Moore et al. 2015), alto ángulo microfibrilar (Alteyrac 2015, Valenzuela et al. 2003), junto a anillos de crecimiento anchos y baja densidad (Salvo et al. 2004), en ocasiones asociada a madera de compresión (Thomas y Collings 2016, Xu et al. 2009), impactando en la calidad de la madera tratada térmicamente (Cown et al. 1996, Omarsson & Cown 2004). Los requerimientos de calidad de pino radiata para embalajes, son los demandados para la madera de uso estructural, entre ellos los alabeos, tales como torcedura, encorvadura, arqueadura y la acanaladura (INN 1990).

En relación al tratamiento de la madera con calor, se ha observado que la madera juvenil responde mejor a los alabeos usando elevada temperatura y alta humedad en el ambiente (Straze et al. 2011, Fruhwald 2006, Haslett et al. 1999). En particular, el calentamiento RF no cambia significativamente la calidad de la madera (Zhao y Wang 2017), en pino radiata el secado mediante radiofrecuencia induce un escaso nivel de grietas superficiales (Jung et al 2004). Otras coníferas igualmente han respondido adecuadamente al secado por radiofrecuencia en presencia de vacío (Avramidis y Zwick 1996, Avramidis y Liu 1994)

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la calidad de la madera aserrada de *Pinus radiata* verde para embalajes y tratada con calor radiofrecuencia con fines de esterilización de acuerdo a las normas fitosanitarias internacionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

Se utilizó madera de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don), procedente de plantaciones, en condición verde, madera central, de trozas al azar, cuyas dimensiones nominales como madera aserrada se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Dimensiones nominales de la madera utilizada.

| Escuadría | Espesor (cm) | Ancho (mm) | Largo (cm) |
|-----------|--------------|------------|------------|
| Uno | 5.0 | 100 | 306 |
| Dos | 7.5 | 100 | 306 |
| Tres | 10 | 100 | 306 |

Diseño experimental

Se desarrolló un diseño de experimentos multifactorial, con tres factores, en tres niveles y tres replicas, con un total de 81 ensayos los cuales fueron: altura de pila: (15cm, 20cm y 30cm), espesor: (5cm, 7cm y 10cm), volumen de carga: (50%, 75% y 100%), introduciendo 5 piezas en cada ensayo y determinar los principales alabeos, que son torcedura, arqueadura, encorvadura y acanaladura, antes y después del tratamiento, así como las medidas necesarias para determinar cambio dimensional y pérdida de masa.

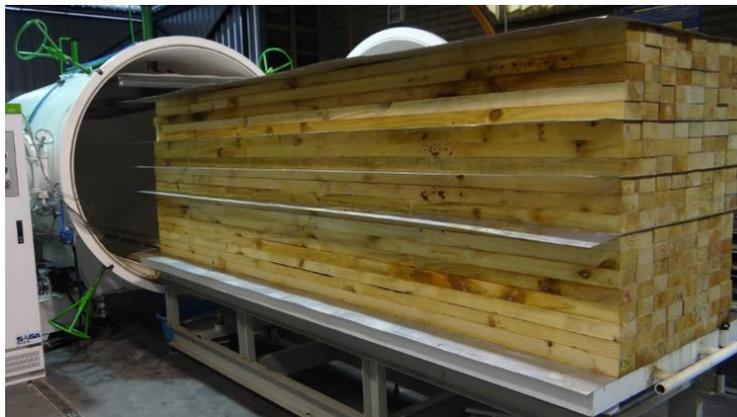
Equipos

La etapa experimental se desarrolló en el Laboratorio de Tecnologías del Secado, perteneciente al Departamento de Ingeniería en Maderas de la Universidad del Bío-Bío, el cual cuenta con la tecnología necesaria para dar tratamiento térmico a la madera, utilizando radiofrecuencia y equipo necesario para medir la calidad de la madera.

Se utilizó un secador a base de radiofrecuencia, (Saga HF-VD30SA, Shijiazhuang, Hebei, China), con una capacidad de 3 m³ de madera, carga dimensionada en (1m x 1m x 3m), que oscila a una frecuencia de 6.78 MHz, la cual ya está establecida en el equipo y desarrolla una potencia de 30 kW (Torres 2017).

Preparación de las cargas

Las cargas de madera apilada sin espacios vacíos fueron divididas en cuatro paquetes, separadas por placas metálicas, las cuales generan el campo magnético (Figura 1).

**Figura 1:** Preparación de una carga para calentamiento RF.



Las 10 piezas destinadas para medir alabeos, fueron obtenidas al azar y acomodadas dentro del paquete como se observa en la Figura 2.

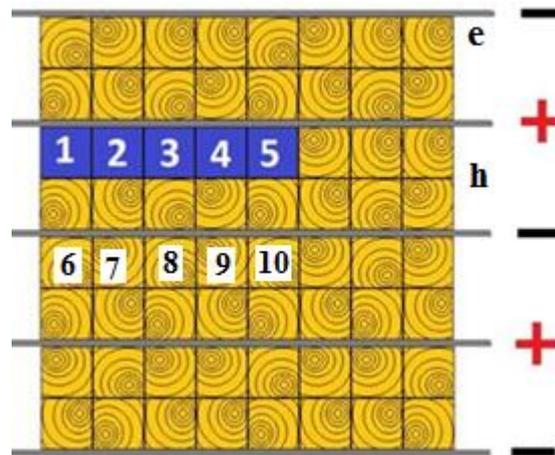
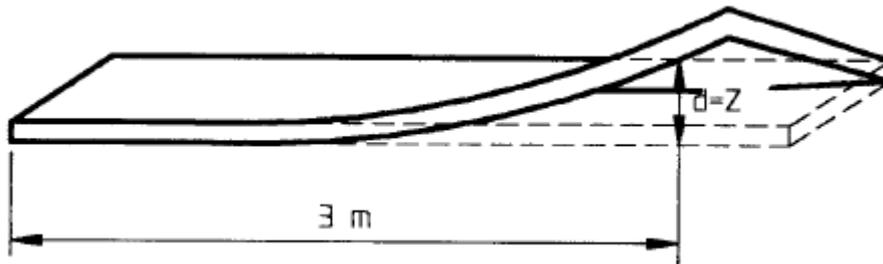


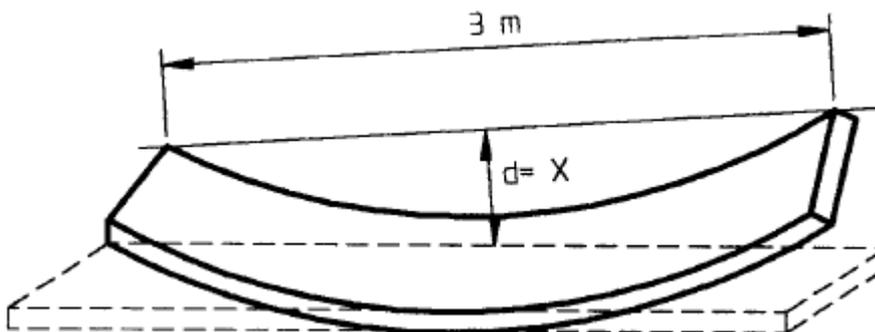
Figura 2: Esquema de distribución y ubicaciones de las 10 piezas evaluadas, dentro de la carga.

Obtención de datos

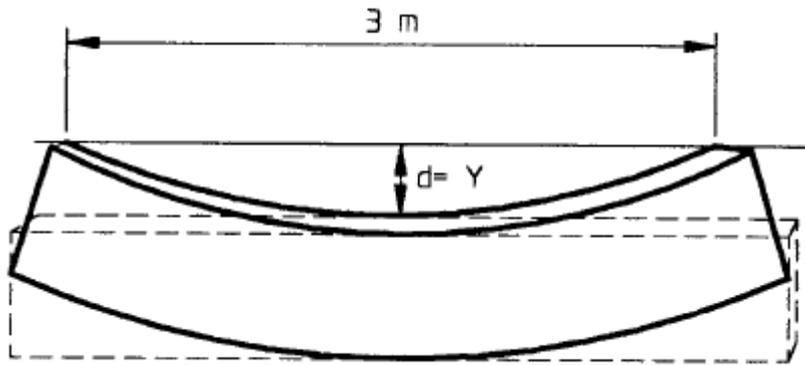
Se midieron antes y después del tratamiento, la torcedura, arqueadura, encorvadura y acanaladura (Figura 3), tomando como referencia las norma chilena NCh-993 (INN 1999).



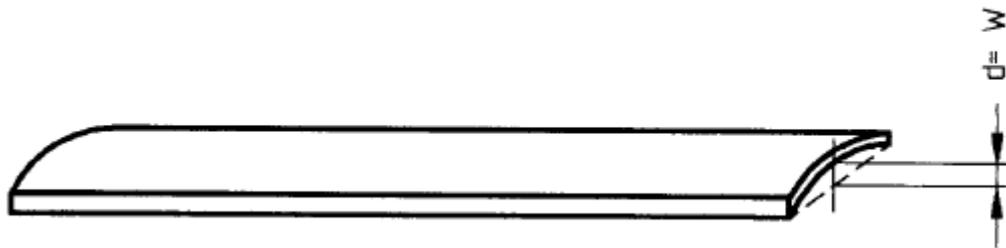
a) Torcedura. Se midió únicamente la distancia de la arista levantada sobre el plano en el cual se apoyan las aristas restantes.



b) Arqueadura. Se determinó por la distancia mayor existente entre la cara y un plano horizontal que une los dos extremos de la pieza.



c) **Encorvadura.** Se midió la luz o distancia mayor entre el canto y el plano horizontal.



d) **Acanaladura.** La medición se determinó por la distancia mayor que existe entre la arista cóncava de la pieza y el plano transversal que une las esquinas o cantos.

Figura 3: Alabeos (adaptada de la NCh 993, INN 1999).

Para la ejecución de las mediciones se utilizó una mesa de alabeos y un calibrador de espesor (Figura 4). Con el fin de disminuir la variación en la toma de datos, los realizó una sola persona, en una misma mesa y siempre con el mismo instrumento de medición digital.



a) Mesa para medir alabeos.



b) Calibrador digital.

Figura 4: Dispositivos para la medición de alabeos.

Utilizando como referencia la norma chilena Norma 176 en su apartado 3 (INN, 1984) para los cambios dimensionales, se midieron tres puntos a cada una de las 10 piezas tanto para el espesor como para el ancho, utilizando la ecuación 1.



Ecuación (1)

$$C = \frac{D_{Inicial} - D_{Final}}{D_{Inicial}} * 100$$

Dónde:

$D_{inicial}$ = Dimensión inicial de la pieza, en milímetros,

D_{final} = Dimensión final de la pieza, en milímetros.

C = Cambio dimensional.

Igualmente, en cada uno de los ensayos se midió la masa las 5 piezas antes y después del tratamiento, con lo cual se obtuvo el cambio de masa promedio y se expresó en porcentaje.

Aplicación del tratamiento térmico de esterilización con calor RF

Tomando como referencia la Norma Internacional de Medidas Fitosanitarias, en su apartado número 15, NIMF-15, la que especifica que la madera destinada al comercio internacional, ya sea como producto o como embalaje, previamente debe dársele un tratamiento térmico a una temperatura de 56° C, por un periodo de 30 minutos, por lo que las cargas fueron colocadas dentro del equipo y se le aplicó el tratamiento térmico de esterilización con calor por radiofrecuencia, desde ese punto se monitoreo la temperatura, una vez que esta llegaba a los 56° C, se continuo el tratamiento por 30 min más, antes de detener el proceso y dejar enfriar la madera por un lapso de 5 horas como mínimo solo como recomendación.

Análisis de datos

Se realizaron comparaciones múltiples mediante el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher con un 95% de confiabilidad para ello se utilizó el programa de computo STATGRAPHICS Centurion XV.II.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Presencia de alabeos en el total de los casos

Los resultados de los alabeos son presentados en la Tabla 2, el amento en la magnitud del alabeo se consideró como positivo, cuando no hay cambio en la magnitud del alabeo, se consideró como cero y cuando existió una recuperación del alabeo, se consideró como negativo, los porcentajes están expresados en relación al total de los alabeos en sus tres condiciones.



Tabla 2: Presencia de alabeos (Total de los casos)

| Presencia de alabeos (Total de los casos) | | | | | |
|---|---------|-----------|------------|-------------|-------------|
| | Total | Torcedura | Arqueadura | Encorvadura | Acanaladura |
| Nulo | 55.63% | 8.80% | 10.70% | 11.13% | 25.00% |
| Negativo | 18.87% | 6.76% | 5.77% | 6.34% | 0.00% |
| Positivo | 25.49% | 9.44% | 8.52% | 7.54% | 0.00% |
| Total | 100.00% | 25.00% | 25.00% | 25.00% | 25.00% |

Nulo: Corresponde a una ausencia de alabeos. **Negativo:** Corresponde a una disminución del alabeo. **Positivo:** Corresponde a un aumento en el alabeo.

Sumando el total de casos donde no se observa algún tipo de alabeo y donde se tuvo una disminución, se aprecia que en el 74.5% de los casos, no se afecta la calidad de la madera, sin embargo en el 25.49% donde se presenta algún tipo de alabeo, al clasificar esta madera según la norma chilena 993 (INN 1999) se obtienen en la Tabla 3, los resultados expresados en función de solo los alabeos positivos (aumenta el alabeo).

Tabla 3: Alabeos (Positivo, aumento del alabeo).

| Alabeos (Positivo) | | | | | |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Categoría | Torcedura | Arqueadura | Encorvadura | Acanaladura | Total |
| 0 | 17.2% | 54.5% | 58.9% | 0.0% | 42% |
| 1 | 41.0% | 42.1% | 40.2% | 0.0% | 41% |
| 2 | 17.2% | 2.5% | 0.9% | 0.0% | 7% |
| 3 | 14.9% | 0.8% | 0.0% | 0.0% | 6% |
| 4 | 9.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 4% |
| Totales | 37.0% | 33.4% | 29.6% | 0.0% | 100% |

Del total de casos donde se tuvo la presencia de alabeos de manera positiva, se observa que el 42% no avanza de categoría y un 41% incrementa solo una categoría, en dicha clasificación como estándar de calidad.

Observando el total de los casos con alabeo positivo, se aprecia que el 10.7% del total de los casos presentan un alabeo positivo pero no avanza de categoría, que sumado al 74.5% donde la presencia es nula o negativa, dan un total de 86.2%, en el cual la calidad se conserva o se mejora en los alabeos estandarizados.



Este análisis infiere que el tratamiento térmico utilizando radiofrecuencia marcado por la NIMF-15, no afecta la calidad de la madera, por lo cual es altamente recomendada su implementación.

Presencia de defectos de procesamiento por tipo de alabeo

Los datos obtenidos por tipo de alabeo muestran que la acanaladura tuvo una presencia nula presentándose en el 0% de las observaciones, la torcedura fue el alabeo que más se presentó de manera positiva, sin embargo también fue el que muestra el mayor nivel de piezas que presentaron una recuperación (Figura 5). Ese comportamiento es debido a la condición anatómica que caracteriza a las piezas, el hecho de ser madera central, con presencia de medula, madera juvenil e hilo en espiral, crea las condiciones idóneas para la torcedura.

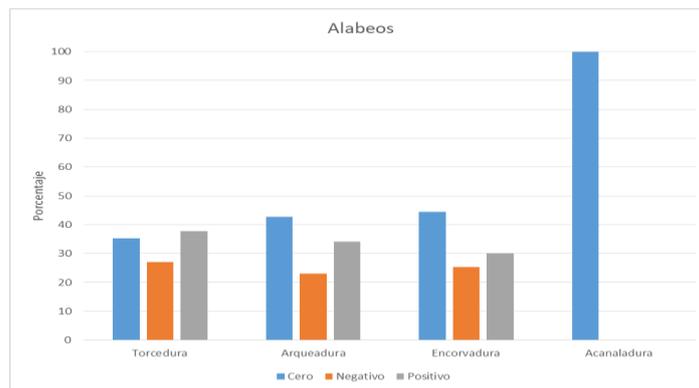


Figura 5: Presencia por tipo de alabeo Nulo: Corresponde a una ausencia de alabeos. Negativo: Corresponde a una disminución del alabeo. Positivo: Corresponde a un aumento en el alabeo.

La arqueadura y la encorvadura, presentan un comportamiento muy similar, ya que la mayoría de sus piezas no presentan estos alabeos y la cantidad de presencias positivas fueron mayores que las negativas.

Presencia de defectos de procesamiento por numero pieza

En un análisis desde el punto de vista del número de piezas, Figura 6, se aprecia que el 36% de las piezas no presentan cambios en la magnitud del alabeo, sin embargo el 34% de las piezas muestran un tipo de alabeo y el 22% restante de las piezas presentan dos tipos de alabeos, solo el 8% registran tres tipos de alabeo y en ningún caso se observan los cuatro tipos de alabeos evaluados.

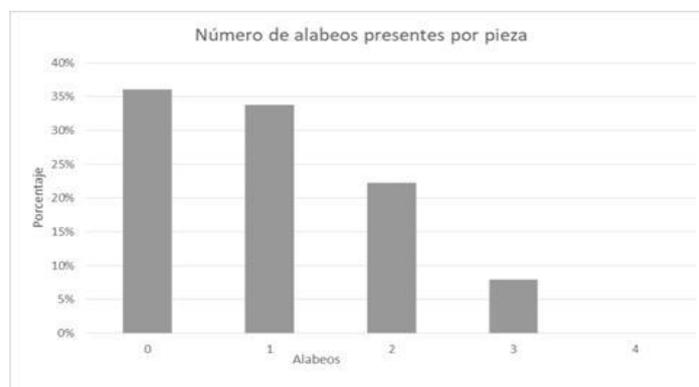


Figura 6: Número de alabeos por pieza.



Es clara la tendencia que conforme va aumentando el número de defectos presentes, disminuye el número de piezas con alabeos involucrados.

Mediante el análisis de las piezas que sólo presentan un tipo de alabeo, se observa que es la torcedura el alabeo mayoritariamente presente y tanto la arqueadura como la encorvadura se aprecian en un frecuencia similar (Figura 7), sin embargo cuando se analizan las piezas que presentaron dos alabeos, se observa que es la arqueadura el alabeo combinado de mayor presencia y cuando se presentan la torcedura y la encorvadura, su frecuencia es menor (Figura 8).

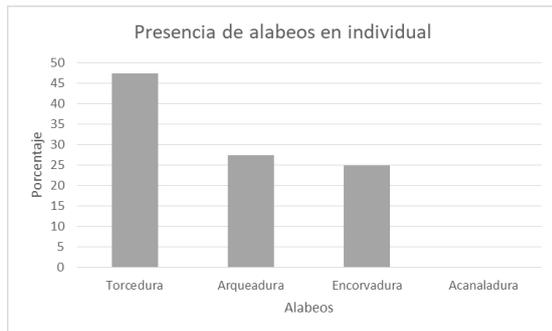


Figura 7: Presencia de alabeos en individual.

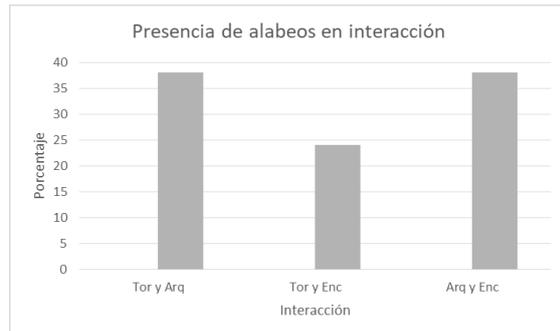


Figura 8: Presencia de alabeos en interacción.

Análisis de la presencia de alabeos, posición de las piezas en la carga

En el siguiente esquema (Figura 9), se muestra el acomodo de las piezas y su distribución del centro del paquete a la superficie:

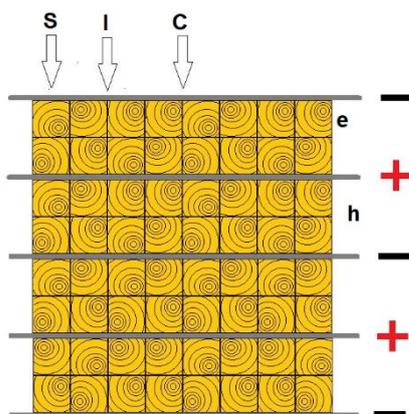


Figura 9: Posiciones en la carga de la madera a evaluar. S= Superficie, I=Intermedio y C= Centro.

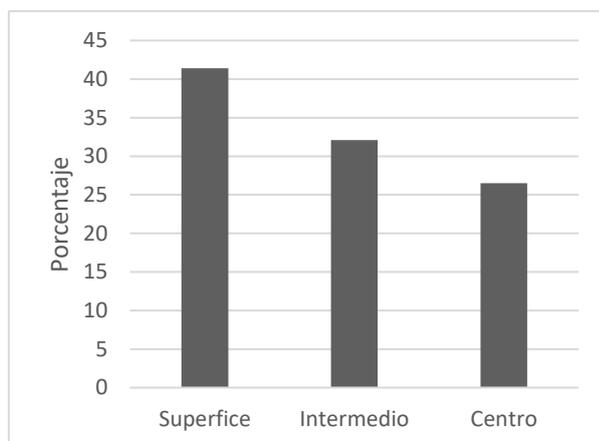


Figura 10: Presencia de alabeos por posición.



Se observa en la Figura 10, que las piezas que se encuentran en la superficie de la carga, son las que presentan mayor número de alabeos, las hipótesis que buscan describir este comportamiento son las siguientes:

- 1- La carga se aplica en el centro del paquete y esta a su vez se ve disminuida conforme se aleja del centro.
- 2- El tiempo de tratamiento térmico es mayor en la parte central de la carga que en la superficie.

Análisis de los diferentes factores y niveles

En la Figura 11, se presentan los resultados agrupados de los alabeos de acuerdo a los factores descritos por el diseño experimental. Se aprecia que es el espesor nivel 2, con valor de 7.5cm es el que se diferencia de los demás con el mayor número de alabeos presentes.

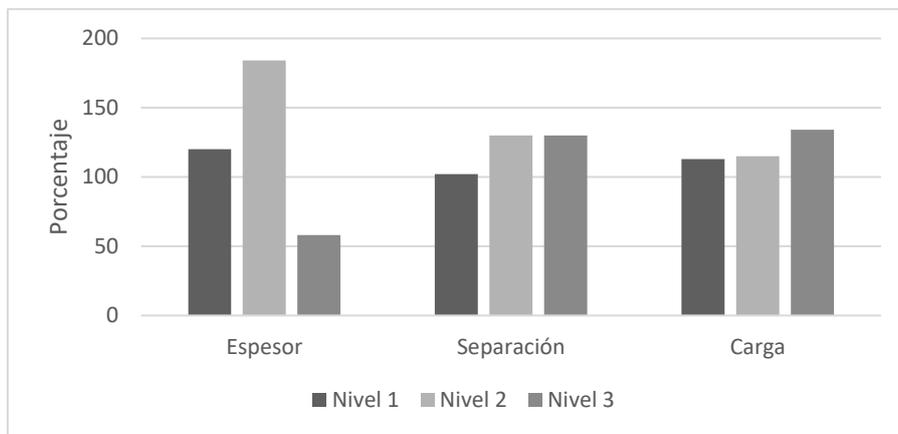


Figura 11: Presencia de alabeos por factor y nivel.

Se observa que tanto en la separación de placa como en el porcentaje de carga, no hay cambios significativos, sin embargo si hay diferencia significativa entre los diferentes espesores, desarrollando el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, al 95%, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Método LSD.

| Espesor (cm) | Casos | Media | Grupos Homogéneos |
|--------------|-------|---------|-------------------|
| 10 | 18 | 3.22222 | X |
| 5 | 26 | 4.61538 | X |
| 7.5 | 27 | 6.81481 | X |

En el caso del espesor, se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre los valores de presencia de alabeos, siendo el espesor de 10cm el que presenta la menor cantidad de alabeos,



de acuerdo con lo anterior, se puede inferir que mejora la calidad del tratamiento de esterilización con calor por radiofrecuencia cuando se usan mayores espesores en la madera.

Cambios dimensionales y pérdida de masa

Se promediaron los cambios dimensionales de acuerdo a la ecuación 1, cuyos resultados se presentaron en la Tabla 6. Se observa que la mayor parte de los cambios dimensionales son cercanos a cero y en varios casos resultan positivos, lo cual es esperado debido a que se trata de madera verde. Para la estimación de estos cambios se tomó como referencia la Norma 176 en su apartado 3 (INN, 1984).

De acuerdo al análisis estadístico (prueba LSD, 95%), se aprecia en que las medias tanto del espesor como del ancho, son cercanas a cero, lo que muestra que el cambio dimensional no es significativo (Figura 12), esto se debe en gran medida a que la madera tratada esta en condición verde y la pérdida de humedad fue escasa y bastante por arriba del punto de saturación de la fibra, donde inician las contracciones, al hacer un análisis de normalidad, se obtuvo un índice de curtosis de 2.85 para el espesor y 1.16 para el ancho, lo que demuestra una distribución leptocúrtica, que significa más apuntada que una distribución normal

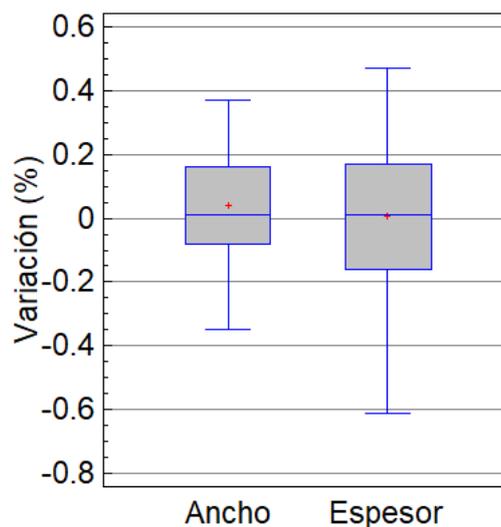


Figura 12: Variación de ancho y espesor.

Gran parte de la pérdida de masa que se registra corresponde a humedad, que durante el tratamiento sale por el calor infundido a la madera, dando un promedio de 10.79% con un registro máximo de 21.38%, lo que sin duda son niveles bajos que no permiten que la madera llegue al PSF y al rango donde se dan las contracciones, al hacer un análisis de normalidad, se obtuvo un índice de curtosis de 0.17, lo que demuestra una distribución leptocúrtica, que significa más apuntada que una distribución normal.

La variación de la pérdida de masa se presenta en la Figura 13, esto sugiere un mínimo impacto sobre la calidad y los cambios dimensionales de la madera, lo que confirma los resultados del presente trabajo y es consistente con lo reportados por otros autores (Zhao y Wang 2017, Huang et al. 2013).

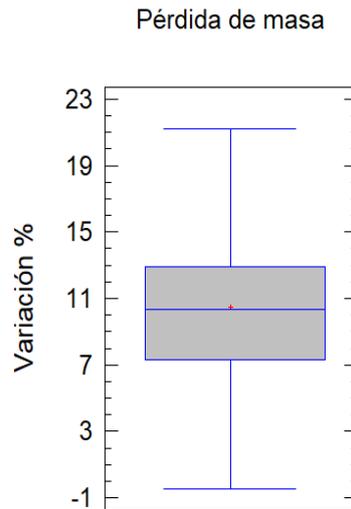


Figura 13: Variación de la pérdida de masa durante los ensayos de calentamiento RF.

CONCLUSIONES

La madera de *Pinus radiata* para embalajes de exportación tratada con calor por radiofrecuencia, conserva la calidad, los alabeos que se hicieron presentes, fueron en bajas cantidades, demostrando que la aplicación de tratamiento térmico utilizando radiofrecuencia guarda un buen compromiso entre el tiempo y la calidad de la madera tratada.

La torcedura, arqueadura y encorvadura, se presentaron como alabeos de manera similar y nula la acanaladura. A mayor espesor, el nivel de alabeos es menor.

Los cambios dimensionales y la pérdida de masa, se dan en niveles insignificantes que no afectan la calidad de la madera para embalajes de exportación tratada con calor por radiofrecuencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento de este trabajo al proyecto Conicyt- Fondef Idea 2-etapas ID14I10231.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alteyrac, J. 2015. Variation of microfibril angle of *Pinus radiata* in relation to tree spacing in Chilean plantations. *Cerne* 39(4):751-758.

Ananías, R. A.; Venegas, R.; Salvo, L.; Elustondo, D. 2013. Kiln schedule certification for industrial drying of radiata pine. *Wood Fiber Sci* 45(1): 98-104.

Avramidis, S. 2016. Dielectric properties of four softwood species at low-level radio frequencies for optimized heating and drying. *Drying Technol* 34(7):753-760.

Avramidis, S.; Swick, R.1996. Commercial scale RF/V drying of softwood lumber. Part II Drying characteristics and lumber quality. *Forest Prod J* 46(6):27-36.



- Avramidis, S., Liu, F., & Neilson, B. J. 1994.** Radio-frequency/vacuum drying of softwoods: drying of thick western redcedar with constant electrode voltage. *Forest Products Journal*, 44(1), 41.
- Cown, D.; Haslett, A.; Kimberley, M.; Mcconchie; D. 1996.** The influence of wood quality on lumber drying distortion. *Annales des Sciences Forestieres* 53(6):1177-1188.
- Elustondo, D.; Avramidis, S.; Oliveira, L. 2005.** Industrial evaluation of re-dry strategy for softwood lumber. *Maderas-Cienc Tecnol* 7(2):65-78.
- Esquivel-Reyes, H.; Sepúlveda-Rebolledo, V.; Torres-Mella, J. ; Salvo-Sepúlveda, L.; Ananías. R. A. 2017.** Radio frequency heating times for sterilization radiata pine solid piles. Proceeding of IRG48 Scientific Conference on Wood Protection. 4-8 June 2017, Ghent, Belgium. 3p.
- Frühwald, E. 2006.** Improvement of shape stability by high-temperature of Norway spruce. Effects of drying at 120 °C with and without restraint on twist. *Holz roh Werkk* 64: 24-29.
- Haslett, A.; Davy, B.; Dakin, M.; Bates, R. 1999.** Effect of pressure drying and pressure steaming on warp and stiffness of radiata pine lumber. *Forest Prod J* 49(6):67-71.
- Huang, R.; Wu, Y.; Zhao, Y.; Lu, J.; Jiang, J.; Chen, Z. 2013.** Factors affecting the temperature increasing rate in wood durin radio-frequency heating. *Drying Technol* 31(2):246-252.
- INFOR. 2016.** La industria del aserrío. Boletín Técnico N° 155. Instituto Forestal. Chile. 115p.
- INN. 1999.** Norma chilena NCH-993 EOf 72. Madera. Procedimientos y criterios de evaluación para clasificación. Instituto nacional de normalización. Santiago, Chile. 19p.
- INN. 1990.** Norma chilena NCH-1207 EOf 90. Pino radiata. Clasificación visual para uso estructural. Instituto nacional de normalización. Santiago, Chile. 17p.
- INN. 1984.** Determinación de la contracción de la madera. Norma chilena oficial 176/3 of 84. Instituto Nacional de Normalización, Chile. 13p.
- Jung, H.S.; Eom, C. D.; So, B. J. 2004.** Comparison of vacuum drying characteristics of radiata pine timber using different heating methods. *Drying Technol* 22(5):1005-1022.
- Moore, J. R.; Cown, D. J.; McKinley, R. B. 2015.** Modelling spiral grain angle variation in New Zealand-grown radiata pine. *New Zealand J For Sci* 45:15.
- Ormarsson, S.; Cown, D. 2004.** Moisture-related distortion of timber boards of radiata pine: Comparison with northway spruce. *Wood Fiber Sci* 37(3):424-436.
- Resch, H. 2006.** Drying Wood with high frequency electric current. BOKU, Austria. 84p.
- Salvo, L.; Ananías, R.A.; Cloutier, A. 2004.** Influencia de la estructura anatómica en la permeabilidad específica transversal al gas del pino radiata. *Maderas-Cienc Tecnol* 6(1):33-44.
- Simpson, W. 2004.** Effect of drying temperature on warp and downgrade of 2 by 4's from small diameter ponderosa pine. USDA-FPL-RP-624. 8pp.



- Straze, A.; Kliger, R.; Johansson, M. ; Gorisek, Z. 2011.** The influence of material properties on the amount of twist of spruce wood during kiln drying. *Eur J Wood Prod* 69(2): 239-246.
- Tarvainen, V. 2005.** Measures for improving quality and shape stability of sawn softwood timber during drying under service conditions. VTT Publication 584.
- Thomas, J.; Collings, D. 2016.** 3d visualisation of spiral grain and compression wood in *Pinus radiata* with fluorescence and circular polarised light imaging. *Wood Fiber Sci* 48(1):22-27.
- Torres, J. 2017.** Caracterización, instalación y puesta en marcha de un secador de madera por radiofrecuencia y vacío. Habilitación Profesional, Ingeniería Civil Mecánica, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.
- Valenzuela, J.; Ulloa, I.; Rallo, M. 2003.** Estudio del ángulo fibrilar y su relación con la edad cambial en *Pinus radiata*, proveniente de la Séptima Región, Chile. *Maderas-Cienc Tecnol* 5(2):117-124.
- Wang, S.; Yue, J.; Chen, B., Tang, J. 2008.** Treatment design of radio frequency heating based on insect control and product quality. *Postharvest Biology and Technology* 49: 417–423.
- Xu, P.; Liu, H.; Evans, R.; Donaldson, L. 2009.** Longitudinal shrinkage behaviour of compression wood in radiata pine. *Wood Sci Technol* 43: 423-439.
- Zhao, L.; Wang, S. 2017.** Developing treatment protocols for disinfesting pine wood product using radio frequency energy. *Eur J Wood Prod* DOI 10.1007/s00107-017-1189-4.



12. CONCLUSIONES GENERALES

En esta investigación se comprobó que la tecnología a base de radiofrecuencia, para dar tratamiento térmico a pino radiata apilado con fines fitosanitarios, se predijo el tiempo de calentamiento con modelos con más del 90% de confiabilidad

El tiempo total de tratamiento térmico para las condiciones de calentamiento de pino radiata por radiofrecuencia utilizadas, esto es, 56°C por 30 min y 60°C por 1 min, de manera práctica resultaron similares y estadísticamente no significativas.

Además el proceso de calentamiento por radiofrecuencia con fines de esterilización del pino radiata apilado, presentó un buen compromiso con la calidad de la madera, favoreciendo su implementación ya que en el 74.5% de la carga no se presentan alabeos y en el 10.7% hubieron alabeos pero no avance de su intensidad.

Igualmente durante el proceso de esterilización con calor por radiofrecuencia de madera apilada de pino radiata, la pérdida de humedad y los cambios dimensionales en la madera, resultaron estadísticamente insignificantes.

En general la técnica de calentamiento con calor por radiofrecuencia de madera apilada de pino radiata resultó con un buen compromiso entre el tiempo y la calidad de la madera, lo que permite recomendar su aplicación industrial maderera.



13. ANEXOS

Anexo 1: Resumen presentado en V Encuentro de Investigación de Estudiantes de Postgrado UBB-2016

V Encuentro de Investigación de Estudiantes de Postgrado
 UBB-2016

ESCUELA DE GRADUADOS – DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN

RESUMEN PONENCIA

I. DATOS:

| | |
|-----------------------------------|---|
| TITULO DE LA PONENCIA : | Tratamiento térmico de esterilización de pino radiata mediante radiofrecuencia: Resultados preliminares |
| AUTOR(ES)/EXPOSITORES: | Héctor Hugo Esquivel Reyes |
| PROFESOR GUÍA: | Dr. Rubén A. Ananías |
| PROGRAMA / FACULTAD / UNIVERSIDAD | Magister en Ciencia y Tecnología de la Madera, DIMAD, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío. |
| CORREO ELECTRÓNICO | hectorhugoer@hotmail.com |
| FONOS | |

MODALIDAD (marque con X): ORAL X POSTER

II. RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN:

CARACTERÍSTICAS DEL RESUMEN

1. Planteamiento del Problema

Numerosas plagas y patógenos de las plantas se mueven por todo el mundo a través del comercio internacional, desde que el transporte de madera fue reconocida como una de las vías más importantes para la introducción de plagas forestales, la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF), que es un acuerdo internacional entre (actualmente) 177 países, aprobó la



Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias No. 15 (NIMF n° 15) en 2002 (NIMF-15 2009); esta medida sirve como una guía para la regulación de madera utilizada en el comercio internacional.

El tratamiento con calor permite esterilizar la madera, se buscan alternativas más rápidas, más baratas y más amigables con el medio ambiente que el calentamiento con vapor HT.

2. Objetivos y alcance de la investigación

- ✓ Evaluar el tiempo del calentamiento para madera de pino radiata.

Se determinó el tiempo de calentamiento para esterilizar madera verde de pino radiata sometida a un tratamiento térmico por radiofrecuencia

3. Breve descripción de la metodología

El presente estudio se realizó en madera verde de pino radiata recién aserrado de 100 mm de espesor y un ancho de 100 mm, por un largo de 3 m. La madera fue empaquetada a una altura de 200 mm.

Un autoclave con calentamiento por radiofrecuencia modelo HF VD30-SA de 3 m³ de capacidad fue utilizado para los ensayos experimentales. Se monitoreo el comportamiento de la temperatura en relación al tiempo de tratamiento, usando un sistema de adquisición de datos con 6 sensores de temperatura de fibra óptica.

La madera se esterilizo de acuerdo a las especificaciones de la NIMF-15, mediante procedimiento estandarizado que indica alcanzar 56 °C por un lapso de 30 min, en la zona más fría del autoclave. Se determinó el tiempo total que demora en alcanzar la condición 56/30 (°C/min) desde la condición inicial fría de la madera.

Síntesis de los resultados

Los resultados preliminares muestran que a partir de madera fría, el tiempo total de esterilización con calor por radiofrecuencia para de pino radiata verde de 100mmx100mmx30000mm y una altura de pila de 200 mm, fue de 373 min con una desviación de 60 min. Con vapor a 100 °C, los tiempos totales para esta madera es del orden de 500 min (Ananías et al. 2013).

4. Principales conclusiones

- ✓ El tiempo de esterilización por calor con radiofrecuencia del pino radiata verde de 100mmx100mmx30000mm y una altura de pila de 200 mm, es alrededor de un 25% menor que con vapor.

5. Conceptos clave (entre 3 y 5)

- ✓ Alta frecuencia, esterilización de madera, Pinus radiata, tratamiento fitosanitario, tratamiento HT.
- ✓ 6.- Bibliografía



Ananías, R.A.; Venegas, R.; Salvo, L.; Elustondo, D. 2013. Kiln-schedules certification for industrial drying of radiata pine. *Wood Fiber Science* 45(1):98-104.

NIMF-15. 2009. Reglamentación del embalaje de madera utilizado en el comercio internacional. Normas Internacionales para Medidas Fitosanitarias. Revisión NIMF15. FAO. Roma.



Anexo 2: Presentación en Congreso Internacional del International Research Group on Wood Protection IRG48-2017

Radio frequency heating times for sterilization radiata pine solid piles

IRG/WP WP 17-40815

H. Esquivel¹, V. Sepúlveda², J. Torres³, L. Salvo⁴, R. A. Ananías⁵

¹ M. Sc. Student. Department of Wood Engineering, University of Bio-Bio, Concepción, Region del Bio-Bio, 4081112, Chile. Email: hectorhugoer@hotmail.com

^{2,3,4} Research Associates. Emails: vsepulveda@ubiobio.cl, jtorresm@egresados.ubiobio.cl, lsalvo@ubiobio.cl

⁵ Professor. Email: ananas@ubiobio.cl.

Paper prepared for the IRG48 Scientific Conference on Wood Protection

Ghent, Belgium

4-8 June 2017

Disclaimer

IRG SECRETARIAT

Box 5609

SE-114 86 Stockholm

Sweden

www.irg-wp.com



Radio frequency heating times for sterilization radiata pine solid piles

H. Esquivel¹, V. Sepúlveda², J. Torres³, L. Salvo⁴, R. A. Ananías⁵

¹ M. Sc. Student. Department of Wood Engineering, University of Bio-Bio, Concepción, Region del Bio-Bio, 4081112, Chile. Email: hectorhugoer@hotmail.com

^{2,3,4} Research Associates. Emails: vsepulveda@ubiobio.cl, jtorgesm@egresados.ubiobio.cl, lsalvo@ubiobio.cl

⁵ Professor. Email: ananias@ubiobio.cl.

1. ABSTRACT

In this work was sterilized wood packaging material of radiata pine, stacked as solid piles without stickers, and were determined the heating times using radiofrequency treatment. The experiments were performed in a radio frequency semi-industrial equipment. The results showed that the radio frequency heating times increases with wood volume and that radio frequency treatments were faster than conventional vapour heat treatment.

Keywords: Heating time, heat treatment, high frequency, *Pinus radiata*, wood packaging material.

2. INTRODUCTION

In Chile the timber industry is based mainly on the transformation of radiata pine, some of this production is oriented to the solid wood packaging market (Infor 2016). Wood packaging material (WPM) is usually sterilized by conventional vapour treatments or kiln drying. The estimated minimum time to sterilize stickered piles of radiata pine by kiln drying heat treatment ht-kd 56/30 °C/min is the 187 minutes in solid wood of 92 mm thickness (Ananias et al. 2013), this heating time increases to 3 times using solid piles (Ananias et al. 2015). On the other hand radio frequency (RF) heating have been showed as alternative method for sanitisation WPM of pinewood nematodes (Uzunovic *et al.* 2013, lazarescu *et al.* 2015) and also for phytosanitary treatments of hardwoods (Dubey *et al.* 2016). This study explore the RF heating times for sterilization WPM of radiata pine stacked as solid piled.

3. MATERIALS AND METHODS

Nine experiments were carried out using WPM of fresh green radiata pine, lumber was sawed to 50 mm x 100 mm x 3000 mm. Was used a RF heating machine (Saga HF-VD30SA, Shijiazhuang, Hebei, China) oscillating at 6,78 MHz and delivering power up to 30 kW. The WPM was stacked as solid piles that were adjusted using plate height of 150 mm size. Three levels of wood volume were utilized: 1.5, 2.25 and 3 m³. The temperature was measured on three zones equidistant, positioned from the surface to the centre of the pile and monitored using fiber optic probes; the data was collected every 10 seconds in a



data logger Oriental Rayzer (ORZ-FTM1000, Beijing, China). The RF heating times at 56/30 and 60/1 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) were evaluated.

4. RESULTS

The RF heating times according to wood volume are shown in Fig 1. It is observed that RF heating times decreases about 50% when wood volume decreases by half.

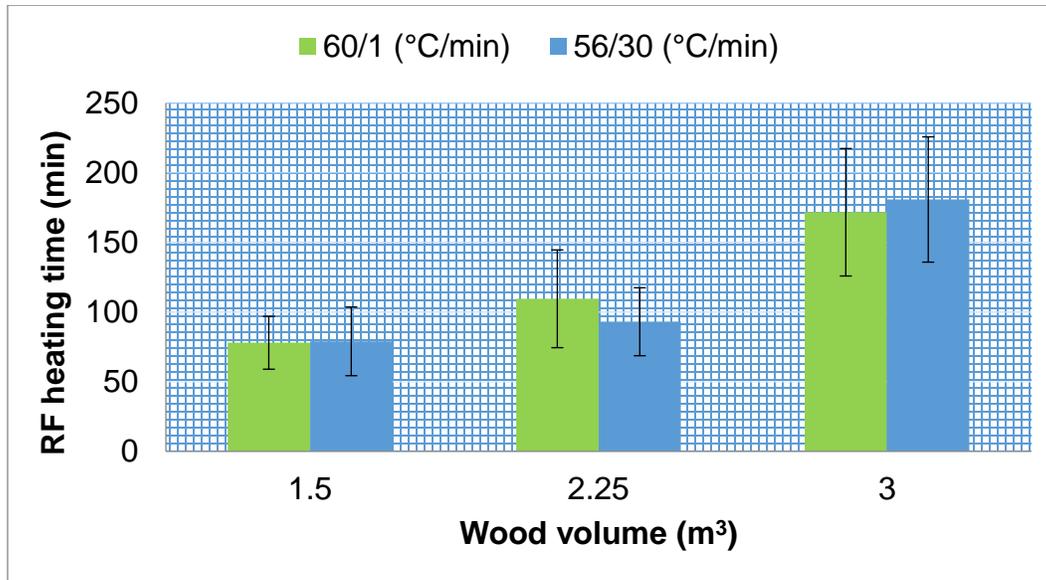


Figure 1: Variation of RF heating time as function of radiata pine volume.

In Figure 2 the heating times of WPM during RF and vapour are showed. It is observed that the RF heating time for the condition 60/1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ is similar than condition 56/30 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) and that RF heating time is about 40 per cent lower than vapour heating.

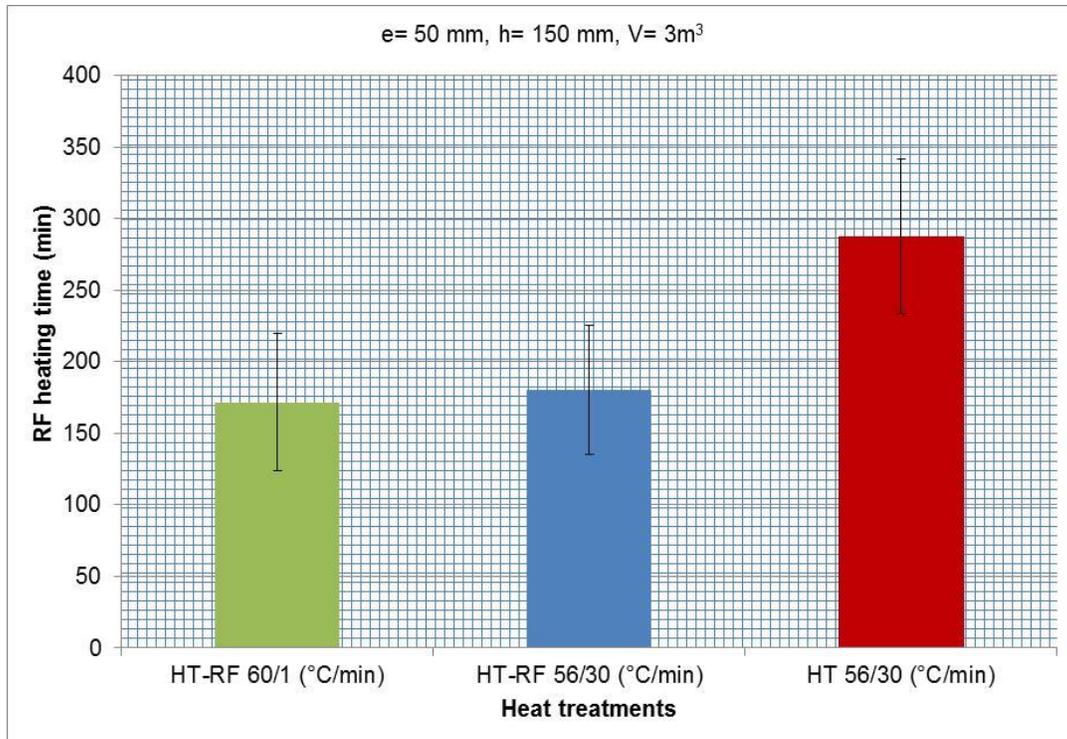


Figure 2: Heating times at RF and HT methods in radiata pine.
(e=wood thickness, h=plate height, V=wood volume)

5. CONCLUSIONS

RF heating times increases directly with wood volume.

RF heating treatment has potential for quickly sterilization of radiata pine solid piles.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors appreciate the financial support of the National Commission of Scientific & Technological Research (Conicyt) of Chile (Fondef Idea- 2 Etapas N° ID14I10231).

7. REFERENCES

Ananías, R A, Sepúlveda, V, Salvo, L (2015) Tratamientos de esterilización con calor de pino radiata para embalajes de exportación. (In Spanish). In Proceeding of XX Taller Aserraderos Expocorma, 72 pp. Concepcion, Chile.

Ananías, R A, Venegas, R, Salvo, L, Elustondo, D (2013) Kiln schedule certification for industrial drying of radiata pine. Wood and Fiber Science 45(1): 98-104.



Dubey, M K, Janowiak, J, Mack R, Elder, P, Hoover, K (2016) Comparative study of radio-frequency and microwave heating for phytosanitary treatment of wood. *European Journal of Wood and Wood Products* 74: 491-500.

INFOR (2016) La industria del aserrío 2015. (In Spanish). Boletín Estadístico N° 155, Instituto Forestal, 128 pp, Santiago, Chile.

Lazarescu, C, Breuil, C, Avramidis, S (2015) Phytosanitation of mountain pine beetle infected lodgepole pine using dielectric fields at radio frequencies. *Maderas-Ciencia y Tecnología* 17(2):221-228.

Uzunovic, A, Gething, B, Coehlo, A, Dale, A, Janowiak, J, Mack, R, Hoover, K (2013) Lethal temperature for pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in infested wood using radio frequency (RF) energy. *Journal of Wood Science* 59:160-170.