

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN MADERA DE CONÍFERAS IMPREGNADAS CON SOLUCIÓN HIDROSOLUBLE COBRE, CROMO Y ARSENICO.

SPEED OF PROPAGATION OF SOUND IN WOOD OF IMPREGNATED CONIFERS WITH HIDROSOLUBLE COPPER, CHROME AND ARSENIC SOLUTION.

Fecha de recepción:16/04/2018 // Fecha de aceptación: 05/12/2018

Estela Pan

Ing. En Industrias Forestales, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. epan@unse.edu.ar

Juan Carlos Medina

Ing. En Industrias Forestales, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. jcmolina@unse.edu.ar

Maximiliano Umlandt

Ing. En Industrias Forestales, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. maximiliano.umlandt@gmail.com

Margarita Juárez De Galíndez

Ing. Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. marga@unse.edu.ar

RESUMEN

Este trabajo tiene por objetivo determinar la velocidad de propagación del sonido en 2 especies madereras impregnadas con solución hidrosoluble cromo, cobre y arsénico; sus diferencias con las mismas maderas sin impregnar y su relación con la densidad, los módulos de elasticidad (MOE), y de rotura (MOR) y el contenido de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras. El material utilizado es madera de *Pinus elliottii* variedad *elliottii* y *Pinus taeda*, y se midieron velocidad de propagación del sonido en sentido paralelo a las fibras, densidad, contenido de humedad, peso de las muestras, tiempo de tránsito de la onda acústica, MOE, MOR y límite de proporcionalidad a la flexión. Los resultados muestran que para *Pinus taeda* la velocidad de propagación del sonido presentó diferencias estadísticas significativas entre madera impregnada (5118 m/s) y sin impregnar (4026 m/s), mientras que en *Pinus elliottii*, estas diferencias no fueron significativas entre ambas maderas (4881 m/s) y (4194 m/s). Además, se encontró que la velocidad de propagación del sonido, como el pasaje de la onda acústica y la densidad presentan diferencias estadísticas altamente significativas al disminuir la humedad por debajo del punto de saturación de las fibras (30, 20 y 10 %), mientras que, para el MOR y MOE estas

SUMMARY

The objective of this work is to determine the speed of sound propagation in two wood species impregnated with water soluble solution, chromium, copper and arsenic; their differences with the same wood without impregnation and its relationship with the density, modulus of elasticity (MOE), rupture (MOR) and moisture content below the saturation point of the fibers. The material used is wood of *pinus elliottii* variety *elliottii* and *pinus taeda*, and speed of propagation of the sound in parallel direction to the fibers, density, moisture content, weight of the samples, transit time of the acoustic wave, MOE, MOR and proportionality limit to bending were measured. The results show that for *pinus taeda* the speed of sound propagation showed significant statistical differences between impregnated wood (5118 m / s) and non-impregnated wood (4026 m / s), while in *pinus elliottii* these differences were not significant between both woods (4881 m / s) and (4194 m / s). In addition, it was found that both, the speed of sound propagation, as well as the passage of the acoustic wave and the density, present highly significant statistical differences when the humidity drops below the saturation point of the fibers (30, 20 and 10%), while for the MOR and MOE, these differences were not significant.

diferencias no fueron significativas.

Palabras claves: Velocidad de propagación del sonido, *Pinus elliottii* var. *elliottii*, *Pinus taeda*, maderas impregnadas y sin impregnar.

Key words: Speed of spread of the sound, *Pinus elliottii* var. *elliottii*, *Pinus taeda*, impregnated wood and without impregnating.

INTRODUCCION

Para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera sólida, se utilizan generalmente ensayos destructivos donde se requiere emplear una serie de procedimientos y metodologías que representan tiempos más prolongados de trabajo con mayores costos. Existe la posibilidad de determinar la calidad de la madera sólida mediante evaluaciones no destructivas, las cuales cuentan con técnicas que proporcionan con mayor rapidez información respecto a las propiedades físicas y mecánicas del material (ROSS y PELLERÍN, 1991).

Los métodos no destructivos se basan en la física de los materiales, como la emisión de ondas sonoras (ultrasonido), ondas electromagnéticas, reflexión de la luz y otros y su comportamiento depende de las características del material – madera; como la densidad, elasticidad, presencia de nudos, grietas, rajaduras y otros defectos. Una posibilidad de evaluar la calidad de la madera sólida es utilizando la velocidad de propagación del sonido (ESPINA *et al.*, 1998). El empleo de este método está basado en la transmisión de pulsos u onda acústica a través de la madera.

La determinación experimental de la velocidad de propagación del sonido, es posible obtenerla mediante la medición directa de la longitud de la muestra y el tiempo de pasaje de la onda sonora (BUCUR y ARCHER, 1984).

NIEMZ *et al.*, (1994), determinaron la velocidad de propagación del sonido y su relación con sus propiedades físico - mecánicas en once especies chilenas, encontrando que, al aumentar la densidad, el largo de fibras y el módulo elástico se produce un incremento en la velocidad de sonido. Sin embargo, las correlaciones obtenidas entre la velocidad del sonido con las 3 variables analizadas fueron de medianas a bajas, presentando diferencias notorias entre latifoliadas y coníferas.

SUAREZ MONTEIRO (1996), reporta que los cambios en el contenido de humedad de la madera es la causa decisiva sobre las emisiones acústicas, porque estas inducen a un considerable cambio en el volumen de la pieza.

PAN *et al.*, (2002), determinaron la velocidad de propagación del sonido a 3 contenidos de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras en madera de *Pinus elliottii* var. *elliottii* y *Pinus taeda* y su relación con la humedad, densidad, módulo de elasticidad (MOE), módulo de rotura (MOR) y Límite de Proporcionalidad (LP). Se encontró que existen en ambas especies correlaciones altamente significativas entre la velocidad del sonido versus las variables

elásticas y versus el tiempo de pasaje de la onda sonora para los 3 contenidos de humedad. En las 2 especies se encontró que la velocidad del sonido es independiente de la humedad, densidad y peso como consecuencia de los bajos coeficientes de correlación, excepto en el caso del *Pinus taeda* que al 30 % de humedad se obtuvo una correlación inversa y significativa.

SUAREZ MONTEIRO (1996), estudió la relación entre la emisión acústica con el contenido de humedad y algunas propiedades mecánicas en *Nothofagus dombeyi* y encontró en forma general que las correlaciones obtenidas para la emisión acústica vs. contenido de humedad no permiten predecir en forma exacta el comportamiento de la emisión acústica, ya que las funciones no permiten un ajuste adecuado, dado su distribución cíclica e irregular. Es por ello que dependiendo de la humedad de la madera las correlaciones obtenidas presentan valores altos y bajos ($R=0,82$ y $R=0,50$).

ORTIZ MANSILLA *et al.*, (2009), estudian el efecto de la dirección de medición y contenido de humedad en la velocidad de ultrasonido en madera de *Pinus radiata* D. Don, a través del análisis de varianza. Los resultados obtenidos denotan que la variabilidad inducida por la dirección de medición es estadísticamente significativa, mientras que con el contenido de humedad estas diferencias no fueron significativas, mostrando que esta última variable no es un elemento relevante en la evaluación del ultrasonido.

De acuerdo a lo señalado por ORTIZ MANSILLA *et al.*, (2009), que reportan que, debido a la naturaleza orgánica de la madera, la velocidad de propagación del ultrasonido varía dependiendo de la orientación de los componentes anatómicos que la constituyen, siendo los tiempos de transmisión de la onda acústica más cortos en el sentido longitudinal y más largo en el perpendicular. ROSS y HUNT (2000), en varios trabajos han examinado el efecto del contenido de humedad en los tiempos de transmisión del ultrasonido en maderas. Según los autores, los tiempos de transmisión del ultrasonido a partir de punto de saturación de las fibras disminuyen a medida que el contenido de humedad decrece, en tanto que sobre el punto de saturación de las fibras estos tiempos permanecen sin variaciones significativas.

Las coníferas tienen importancia como maderas aserradas para la construcción, por su estabilidad estructural y por su resistencia a las rajaduras al ser clavadas. Las especies estudiadas *Pinus elliottii* var. *elliottii* y *Pinus taeda*, constituyen

una importante fuente de materia prima para las industrias forestales en Argentina. Estas maderas son utilizadas en la construcción como material estructural, siendo necesaria su protección mediante la impregnación con preservantes químicos. Estudios indican los efectos que produce la impregnación de maderas con protectores hidrosolubles sobre las propiedades físicas y mecánicas, RODRÍGUEZ BARREAL *et al.*, (2006), reporta que la impregnación química en varias especies con fines protectores puede hacer variar las propiedades físico-mecánicas; sin embargo, no existen estudios rigurosos sobre el efecto de la impregnación en las características físico- mecánicas de la madera. Aunque se han realizado estudios aislados en distintos países, los resultados obtenidos tienen una eficacia limitada, dada la carencia de directivas o normas. GARCÍA y GUINDEO CASASUS (1990 y 1996), indican que la impregnación de las maderas con soluciones protectoras tiende a incrementar los valores resistentes de diferente forma para distintas especies. Los incrementos del valor resistente de la madera tratada frente a la sin tratar es más patente en la flexión estática que en la dinámica y la tracción perpendicular a las fibras. Por otro lado, SUIREZS (2005), estudiando el comportamiento del *Pinus taeda* impregnado frente al no impregnado encontró que no se presentan diferencias significativas en los promedios de los pesos específicos aparentes de las maderas impregnadas con respecto a la no impregnada. Las contracciones dieron valores menores en las maderas impregnadas pero sin diferencias significativas. Los módulos de rotura en las maderas impregnadas presentan valores menores respecto a la no impregnada pero las diferencias no fueron significativas, mientras que el MOE presentó mayores valores en madera impregnada. Además, SUIREZS (2005), reporta que los pesos específicos no son afectados por las retenciones de cobre, cromo y arsénico (CCA), mientras que la impregnación produce un efecto positivo en la dureza Janka transversal y en el corte paralelo a las fibras.

DÍAZ LÓPEZ y ZARZA ROJAS (2010), demostraron que la preservación con CCA produce efecto sobre el MOR y el factor de calidad de algunas especies evaluadas con ultrasonido. Los resultados indican que el módulo de elasticidad por ultrasonido no presentó cambios significativos en las especies de *Quercus sp.*, mientras que el MOR si presentó diferencias significativas en la especie Acer.

Por ello, y sobre la base de investigaciones en el campo del sonido, este trabajo tiene como objetivo determinar la velocidad de propagación del sonido en 2 especies madereras impregnadas con solución hidrosoluble CCA; sus diferencias con las mismas maderas sin impregnar y su relación con la densidad, los módulos de elasticidad, y de rotura y el contenido de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras.

MATERIALES Y METODOS

Material

El material genético está constituido por muestras de madera de *Pinus elliottii* variedad *elliottii* y *Pinus taeda*, los pinos provienen de los ensayos "Orígenes de *Pinus elliottii* var. *elliottii* y *Pinus taeda*", instalado en 1981 en la propiedad del Ingenio "La Fronterita", Departamento Famaillá, provincia de Tucumán, Argentina.

Método

La recolección de las muestras se realizó al azar y se siguió las pautas desarrolladas en investigaciones australianas indicadas por HOHEISEL (1968). Se tomaron seis (6) árboles por especie, obteniéndose resultados con una seguridad estadística del 95 %, y un intervalo de confianza de 15 %.

Se elaboraron 18 probetas por especie, de acuerdo a lo estipulado por NIEMZ *et al.*, (1994); determinando los siguientes parámetros Físico-Mecánicos: Velocidad de propagación del sonido en sentido paralelo a las fibras. NIEMZ *et al.*, (1994); Densidad, Norma IRAM 9.544 (1965/1967); Contenido de Humedad, Norma IRAM 9532 (1968); Peso de las muestras en gramos (g); Tiempo de tránsito de la onda acústica en microsegundos (μ s), NIEMZ *et al.*, (1994); Módulo de Elasticidad o Young, Norma IRAM 9542 (1965); Módulo de Rotura a la flexión, Norma IRAM 9542 (1965); Límite de Proporcionalidad a la Flexión, Norma IRAM 9542 (1965).

1 - Impregnación

Las probetas fueron sometidas a un proceso de impregnación tipo Bethel con sales hidrosolubles CCA, siguiendo las pautas indicadas por JUACIDA *et al.* (1992), Normas IRAM N° 9505 (1965), y Norma Ch N° 819 (2009).

2 - Velocidad del sonido

La determinación de la velocidad del sonido en sentido paralelo a las fibras se realizó en probetas cuyas dimensiones y características están de acuerdo a lo reportado por NIEMZ *et al.*, (1994); obteniéndose un valor que surge de la relación longitud de la muestra vs. tiempo de propagación de la onda sonora, NIEMZ *et al.*, (1994), BUCUR y ARCHER (1984). Esta experiencia fue repetida a 3 contenidos de humedad diferentes en la madera, por debajo del punto de saturación de las fibras (\leq a 30 %, 20 % y 10 %). Los ensayos físicos y mecánicos se efectuaron por métodos destructivos, de acuerdo a lo indicado por Normas IRAM N° 9532, 9544 y 9542.

3 - Análisis Estadístico

Se realizó análisis de estadísticos descriptivos, análisis de variación (ANOVA) y test de comparación de medias de Duncan, correlaciones múltiples mediante el Coeficiente de Pearson. Se utilizó para el análisis estadístico el recurso computacional Statistical Analysis System (SAS) V.6.04.

RESULTADOS

1 - Análisis estadístico descriptivo

La Tabla 1 presenta la velocidad del sonido conjuntamente con otras variables Físicas y Elastomecánicas y su comportamiento a 3 valores de humedad por debajo del Punto de Saturación de las Fibras en madera impregnada de *Pinus elliottii* var *elliottii* y *Pinus taeda*.

Realizando un primer análisis de los datos correspondientes a *Pinus elliottii* var. *elliottii* y *Pinus taeda* (Tabla 1) se observa que el comportamiento de las variables físicas, velocidad de sonido, tiempo y densidad, cuando el contenido de humedad disminuye dentro del rango higroscópico es similar en ambas especies alcanzando las mismas diferencias significativas, en tanto que por encima del punto de saturación de las fibras estos valores no son significativos.

Esto estaría de acuerdo con lo indicado por PAN *et al.*, (2002), para madera de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* sin impregnar, donde la velocidad de propagación del sonido aumenta significativamente al disminuir el porcentaje de humedad en el rango higroscópico, en tanto que, por encima de dicho punto, los valores de velocidad del sonido no presentan variaciones significativas. En relación a esto, WASSIPUL *et al.*, (1986), OKUMURA *et al.*, (1986), y RICE y SKAAR (1990), reportan que el fenómeno de la emisión acústica comienza cuando se producen pérdidas de agua en la madera y cuando se alcanza el contenido de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras. Respecto a la densidad, peso y tiempo de pasaje o tránsito de la onda sonora, las mismas muestran una disminución significativa de sus valores al decrecer el contenido de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras y así lo reporta PAN *et al.*, (2002), donde señala que las variables físicas mencionadas disminuyen al decrecer la humedad en el rango higroscópico en madera de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* sin impregnar. ROSS y HUNT (2000), al examinar el efecto del contenido de humedad en los tiempos de transmisión del ultrasonido en maderas, indican que a medida que el contenido de humedad decrece, los tiempos de transmisión disminuyen, mientras que, sobre el punto de saturación de las fibras, estos tiempos no presentan variaciones significativas. ORTIZ MANSILLA *et al.*, (2009), sostienen que los tiempos más cortos se obtienen en el sentido longitudinal.

Considerando las variables elastomecánicas la Tabla 1, muestra que el MOE, MOR y LP, incrementan al disminuir el contenido de humedad por debajo del punto de saturación de las fibras, sin embargo, los resultados del análisis de la Varianza y del Test de Duncan arrojan que las diferencias entre éstas variables no son estadísticamente significativas al 95 % de confianza.

DIAZ-VAZ y CUEVAS (1986), indican que al disminuir el contenido de humedad bajo el punto de saturación de las fibras, aumentan las resistencias mecánicas y cada 1 % de disminución en el porcentaje de humedad, se aumenta un 4 % la Flexión Estática. SUAREZ MONTEIRO (1996), reporta que a medida que transcurre el secado y la madera pierde humedad, el MOE aumenta, siendo esta tendencia más evidente bajo el punto de saturación de las fibras, lo que estaría de acuerdo con KRUG (1994). En relación a este comportamiento los resultados obtenidos por PAN *et al.*, (2002), no estarían de acuerdo, ya que obtiene para las especies estudiadas sin impregnar ningún cambio en el MOE, MOR y LP al disminuir el contenido de humedad en el rango higroscópico.

Las Tablas 2 y 3, presentan los valores promedio de las propiedades físicas (Densidad, Tiempo y Velocidad de Sonido) y los resultados del Test de Duncan en *Pinus elliottii* var. *elliottii* y *Pinus taeda* impregnados y sin impregnar.

Los resultados de las Tablas 2 y 3 indican que los valores promedio de la madera de *P. elliottii* sin impregnar son mayores que los de la impregnada para ambas especies, con excepción de la velocidad del sonido. Se encontró en *Pinus elliottii* que la densidad y el tiempo de pasaje de la onda sonora presentan diferencias significativas, mientras que para *Pinus taeda*, la densidad no es significativamente diferente, pero sí lo es la velocidad del sonido. SUIREZS (2005), reporta que en *Pinus taeda* no se encontraron diferencias significativas en el promedio de los pesos específicos aparentes de las maderas impregnadas con respecto a la no impregnada. Esto coincide con GARCÍA y GUINDEO CASASUS (1996), que indican que utilizando maderas de latifoliadas y coníferas en la determinación de densidad, se encontraron diferencias no significativas entre madera impregnada y no impregnada. No obstante, los autores indican que no existen estudios rigurosos sobre el efecto de la impregnación en las características físico mecánicas de las maderas, y los resultados obtenidos tienen una eficacia limitada.

En las Tablas 4 y 5 se muestran los valores promedio de las propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* en maderas impregnada y sin impregnar.

Tabla 1: Análisis de estadísticas descriptivas de las especies *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*, a tres contenidos de humedad diferentes, bajo el punto de saturación de la fibra (PSF), en maderas impregnadas.
Table 1: Statisticians' analysis descriptive from the species *Pinus elliottii* and *Pinus taeda*, to three different moisture contents, under the saturation point of the fiber (PSF), in impregnated wood.

	CH	<i>Pinus elliottii</i>		<i>Pinus taeda</i>	
		Media x	CV %	Media x	CV %
Humedad (H)- %	I	28,53	4,46	28,66	5,32
	II	19,92	0,95	19,93	1,67
	III	9,96	1,80	9,92	2,22
Velocidad del Sonido (V)- m/s	I	4729	7,67	4970	9,23
	II	4935	7,24	5179	8,85
	III	4980	7,53	5205	8,80
Tiempo (T)- μs	I	76,55	7,81	73,00	9,10
	II	72,11	8,64	69,87	8,46
	III	72,11	7,53	69,07	8,64
Densidad Seca (Ds)- g/cm ³	I	0,47	12,81	0,55	15,78
	II	0,39	10,26	0,46	15,22
	III	0,36	11,11	0,43	18,60
Módulo de Elasticidad de Young (MOE)- Mpa	I	5500	32,60	7500	35,92
	II	5704	32,50	7701	37,94
	III	6102	31,50	8004	36,93
Límite de Proporcionalidad (Lp)- Mpa	I	32,90	24,60	36,87	30,99
	II	33,01	23,50	39,83	31,68
	III	34,12	23,50	41,84	30,68
Módulo de Rotura (MOR)-Mpa	I	54,88	34,07	70,09	33,98
	II	57,80	32,07	73,04	32,99
	III	60,95	33,07	76,30	32,97
CH : contenido de humedad; CV % : coeficiente de variación porcentual					
Fuente. Elaboración propia.					

Tabla 2: Valores promedio y Test de Duncan de las propiedades físicas de *Pinus elliottii* var *elliottii* en madera impregnada y sin impregnar.
Table 2: Average values and Duncan's Test of the physical properties of *Pinus elliottii* var *elliottii* in impregnated wood and without impregnating.

Tratamiento	Densidad (g/cm ³)	n	Promedio	Test de Duncan
Impregnada	D	18	0,41	A
Sin impregnar	D	18	0,50	B
Tratamiento	Tiempo (μs)	n	Promedio	Test de Duncan
Impregnada	T	18	73,59	A
Sin impregnar	T	18	83,53	B
Tratamiento	Velocidad del Sonido (m/s)	n	Promedio	Test de Duncan
Impregnada	V	18	4881,00	A
Sin impregnar	V	18	4196,40	A
Valores promedio con la misma letra no son significativamente diferentes				
Fuente. Elaboración propia.				

Tabla 3: Valores promedio y Test de Duncan de las propiedades físicas de *Pinus taeda* en madera impregnada y sin impregnar.

Table 3: Average values and Duncan's Test of the physical properties of *Pinus taeda* in impregnated wood and without impregnating.

Tratamiento	Densidad (g/cm ³)	n	Promedio	Test de Duncan
Impregnada	D	18	0,48	A
Sin impregnar	D	18	0,51	A
Tratamiento	Tiempo (µs)	n	Promedio	Test de Duncan
Impregnada	T	18	70,65	A
Sin impregnar	T	18	86,66	B
Tratamiento	Velocidad del Sonido (m/s)	n	Promedio	Test de Duncan
Impregnada	V	18	5118,00	A
Sin impregnar	V	18	4027,01	B
<i>Valores promedio con la misma letra no son significativamente diferentes</i>				
Fuente. Elaboración propia.				

Tabla 4: Valores promedio y Test de Duncan de las propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* var *elliottii* en madera impregnada y sin impregnar.

Table 4: Average values and Duncan's Test of the mechanical properties of de *Pinus elliottii* var *elliottii* in impregnated wood and without impregnating.

Tratamiento	Módulo elástico (Mpa)	N	Promedio	Test de Duncan
Impregnada	MOE	18	5769,00	A
Sin impregnar	MOE	18	6755,06	A
Tratamiento	Módulo de rotura (Mpa)	N	Promedio	Test de Duncan
Impregnada	MOR	18	57,88	A
Sin impregnar	MOR	18	77,74	B
Tratamiento	Límite de proporcionalidad (Mpa)	N	Promedio	Test de Duncan
Impregnada	LP	18	33,34	A
Sin impregnar	LP	18	39,50	A
<i>Valores promedio con la misma letra no son significativamente diferentes</i>				
Fuente. Elaboración propia.				

Tabla 5: Valores promedio y Test de Duncan de las propiedades mecánicas de *Pinus taeda* en madera impregnada y sin impregnar.

Table 5: Average values and Duncan's Test of the mechanical properties of *Pinus taeda* in impregnated wood and without impregnating.

Tratamiento	Módulo elástico	N	Promedio	Test de Duncan
Impregnada	MOE	18	7735,00	A
Sin impregnar	MOE	18	6152,90	B
Tratamiento	Módulo de rotura	N	Promedio	Test de Duncan
Impregnada	MOR	18	57,88 73,14 **	A
Sin impregnar	MOR	18	77,77	B
Tratamiento	Límite de proporcionalidad	N	Promedio	Test de Duncan
Impregnada	LP	18	33,34 39,51 **	A
Sin impregnar	LP	18	38,52	A
<i>Valores promedio con la misma letra no son significativamente diferentes</i>				
Fuente. Elaboración propia.				

Los resultados de las Tablas 4 y 5 indican que para *Pinus elliottii* los valores promedio de las propiedades mecánicas son mayores en la madera sin impregnar, presentándose diferencias significativas entre ambas maderas en el módulo de rotura. En *Pinus taeda* se encontró que el MOE alcanzó un valor mayor en madera impregnada, siendo esta diferencia estadísticamente significativa, mientras que el MOR es mayor en madera no impregnada, y esta diferencia es también significativa.

Esto concuerda con lo reportado por SUIREZS (2005), para *Pinus taeda* donde encuentra el módulo de rotura a la flexión estática en madera impregnada es menor que en la no impregnada, siendo las diferencias no significativas. La madera impregnada con CCA ofrece menor resistencia al módulo de rotura, coincidiendo con SUIREZS (2005), quien manifiesta que las maderas impregnadas pierden tenacidad.

Sin embargo, no hay coincidencia con GARCÍA y GUINDEO CASASUS (1996), que trabajando con latifoliadas y coníferas de forma general indican que la impregnación de las maderas con soluciones protectoras tiende a incrementar los valores resistentes, aunque de forma diferente para las distintas especies consideradas. Encuentra que los incrementos de valor resistente de la madera tratada frente a la sin tratar, es más patente a la resistencia a la flexión estática que a la flexión dinámica y la tracción perpendicular a las fibras, indicando que estos aumentos son mayores para maderas de latifoliadas que para coníferas.

2 - Correlaciones entre la velocidad del sonido con el peso, módulo estático, resistencia a la flexión, tiempo, densidad y humedad.

Los resultados obtenidos de relacionar las variables físicas y elastomecánicas para las dos especies estudiadas a diferentes contenidos de humedad, se presentan en las Tablas 6, 7 y 8.

El análisis conjunto de todas las variables arroja coeficientes de correlación positivos y altamente significativos entre la velocidad del sonido, módulo de elasticidad y tiempo de tránsito de la onda sonora, para los tres contenidos de humedad en *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*, presentando la relación tiempo de tránsito de la onda sonora vs. la velocidad del sonido, coeficientes de correlación inversos y altamente significativos. Esto está conforme a lo indicado por PAN *et al.*, (2002), donde se encontró que existen correlaciones altamente significativas entre la velocidad de sonido, el módulo de elasticidad y el tiempo de transporte de la onda sonora en madera sin impregnar, pero difiere con el comportamiento que presenta el *Pinus elliottii* impregnado en lo que respecta a las correlaciones con las otras variables mecánicas, ya que los resultados obtenidos muestran coeficientes de correlación no significativos. Por otro lado, NIEMZ *et al.*, (1994), trabajando con *Pinus radiata* encontraron coeficientes de correlación de

medios a bajos (0,66) entre la velocidad del sonido vs. el módulo elástico. Considerando la relación velocidad del sonido vs. contenido de humedad, los coeficientes de correlación fueron negativos y no significativos, coincidiendo con PAN *et al.* (2002), que encuentra coeficientes de correlación no significativos, exceptuando el caso del *Pinus taeda* que a una humedad del 30 % presentó correlaciones significativas. En relación a la correlación densidad anhidra vs velocidad del sonido, la misma presenta diferencias no significativas en *Pinus elliottii*, acorde a los resultados obtenidos por PAN *et al.*, (2002), para madera no impregnada, y correlaciones altamente significativas en *Pinus taeda*, no coincidiendo con los resultados de PAN *et al.*, (2002), para madera sin impregnar.

Tabla 6: Correlaciones entre las variables con la velocidad del sonido para el contenido de humedad 1 de las especies estudiadas.

Table 6: Interrelations between the variables with the speed of the sound for the moisture content 1 of the studied species.

Correlaciones entre variables	Coeficientes de correlación	
	<i>Pinus elliotti var. elliotti</i>	<i>Pinus taeda</i>
Velocidad - Peso	0,2019 – ns	0,7661 - ***
Velocidad - Humedad	-0,6350 - ***	0,2411 – ns
Velocidad - Tiempo	-0,9962 - ***	-0,9948 - ***
Velocidad - Densidad anhidra	0,2258 – ns	0,7877 - **
Velocidad - Módulo elástico	0,7418 – ***	0,8665 - ***
Velocidad - Módulo rotura	0,3694 – ns	0,6630 - ***
Velocidad - Límite de Proporcionalidad	0,3653 – ns	0,7648 - ***
Fuente. Elaboración propia.		

Tabla 7: Correlaciones entre las variables con la velocidad del sonido para el contenido de humedad 2 de las especies.

Table 7: Interrelations between the variables with the speed of the sound for the moisture content 2 of the species.

Correlaciones entre variables	Coeficientes de correlación	
	<i>Pinus elliotti var. Elliotti</i>	<i>Pinus taeda</i>
Velocidad - Peso	0,2025 – ns	0,7679 - ***
Velocidad - Humedad	-0,3195 – ns	-0,0050 – ns
Velocidad - Tiempo	-0,8395 - ***	-0,9965 - ***
Velocidad - Densidad anhidra	0,2868 – ns	0,8016 - ***
Velocidad - Módulo elástico	0,7424 - ***	0,8642 - ***
Velocidad - Módulo rotura	0,3822 – ns	0,6585 - ***
Velocidad - Límite de Proporcionalidad	0,3694 – ns	0,7606 - ***
Fuente. Elaboración propia.		

Tabla 8: Correlaciones entre las variables con la velocidad del sonido para el contenido de humedad 3 de las especies.

Table 8: Interrelations between the variables with the speed of the sound for the moisture content 3 of the species.

Correlaciones entre variables	Coeficientes de correlación	
	<i>Pinus elliotti var. elliotti</i>	<i>Pinus taeda</i>
Velocidad - Peso	0,1749 – ns	0,7652 - ***
Velocidad - Humedad	-0,2457 – ns	-0,3513 – ns
Velocidad - Tiempo	-0,9954 - ***	-0,9954 - ***
Velocidad - Densidad anhidra	0,2566 – ns	0,8132 - ***
Velocidad - Módulo elástico	0,7054 - ***	0,8676 - ***
Velocidad - Módulo rotura	0,3355 – ns	0,6665 - ***
Velocidad - Límite de Proporcionalidad	0,3361 – ns	0,7668 - ***
Fuente. Elaboración propia.		

CONCLUSIONES

Existe una influencia significativa del contenido de humedad en el rango higroscópico sobre el fenómeno de la emisión acústica, tanto en lo que respecta a la velocidad como al tránsito de la onda sonora. Sin embargo, los coeficientes de correlación encontrados entre la humedad en el rango higroscópico versus velocidad de sonido fueron en general negativos y no significativos.

La densidad anhidra disminuye a medida que la humedad decrece por debajo del punto de saturación de las fibras presentándose entre éstos valores diferencias significativas.

El comportamiento de las propiedades elastomecánicas con el contenido de humedad en el rango higroscópico es análogo al que presenta con la velocidad del sonido tanto, para *Pinus elliottii* como para *Pinus taeda*. A medida que la humedad de la madera disminuye aumenta la velocidad del sonido, el módulo de elasticidad, el módulo de rotura y el límite de proporcionalidad, siendo esta tendencia más clara cuando se encuentra bajo el punto de saturación de las fibras.

La densidad anhidra en madera de *Pinus elliottii* var. *elliottii* presenta diferencias estadísticamente significativas cuando se compara las maderas impregnadas con las no impregnadas, mientras que en *Pinus taeda* la impregnación no influye en la densidad.

En general, los valores promedios de las propiedades físicas y mecánicas de la madera sin impregnar son mayores que para madera impregnada en ambas especies.

BIBLIOGRAFIA

- BUCUR, V.; Archer, R. R. 1984. "Elastic constants for Wood by an ultrasonic method". Wood Science and Technology 18(4): 255.265.
- DÍAZ LOPEZ, J. y A. Zarza Rojas. 2010. "Efecto de la preservación con sales de arsenato cromatado de cobre sobre el módulo de elasticidad. Índice material y factor de calidad de 4 especies comerciales evaluadas por ultrasonido". Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. Morelia Michoacán. México.
- DÍAZ-VAS, J. y Cuevas, H. 1986. "Mecánica de la madera". Publicación Docente N° 23. Instituto de Tecnología de Productos Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- ESPINA, I.; Niemz, P. y Poblete, H. 1998. Velocidad del sonido como predictor de propiedades en tableros de partículas. Revista Bosque 19(1): 27-35 pp. Valdivia, Chile.
- GARCÍA Esteban, L.; A. Guindeo Casaus. 1990. "Anatomía de frondosas españolas". A.I.T.I.M. Madrid.
- GARCÍA Esteban, L. y Guindeo Casaus, A. 1996. "Madera de coníferas. Anatomía de géneros". Fundación del Conde del Valle de Salazar.
- HOHEISEL, H. 1968. Estipulaciones para los ensayos de propiedades físicas y mecánicas de la madera. Instituto Forestal de Investigaciones y Capacitación- Mérida / Venezuela; 56 p.
- IRAM "Normas N° 9532 (1968); 9544 (1965/1967); 9542 (1965)". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (Catálogo de Normas IRAM). Buenos Aires. Argentina.
- IRAM "Normas N° 9505 (1965)"; Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (Catálogo de Normas IRAM). Buenos Aires. Argentina.
- JUACIDA, R.; Quintanar, J. y Berterrche, A. 1992. "Preservación de la Madera". Publicación Docente N° 35. Instituto de Tecnología de Productos Forestales. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia. Chile.
- KRUG, D. 1994. Untersuchungen ZUR Nutzung der Schallemissionsanalyse bei der Schinittholz-trocknung. Technische Universität Dresden, Dresden.
- NIEMZ, P.; A. Aguilera; A. Rolleri. 1994. "Velocidad de propagación del sonido en algunas especies crecientes en Chile y su relación con propiedades físicas". Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Instituto de Tecnología de Productos Forestales. Valdivia. Chile. BOSQUE 15 (2): 49 -54P.
- NORMA CHILENA NCh819 – OF 2009. 2009. Madera Preservada (Pino Radiata) Clasificación según Uso y Riesgo en Servicio y Muestreo.
- ORTIZ MANSILLA, R.; Baradit, E. y Navarrete, A. 2009. "Estudio del efecto de la dirección de medición y contenido de humedad en la velocidad de ultrasonido en madera de *Pinus radiata* D. Don a través del análisis de varianza". Bogotá. V. 29 n.3. ISSN 0120-5609.
- OKUMURA, S.; Kawamoto, S.; Nakagawa, S. y Noguchi, M. 1986. "Relationship Between Drying Stresses and Acoustic Emission in Wood". Bull. Kyoto Univ. For. P.58: 251-259.
- PAN, E.; Moreno, G. y Coronel, E. 2002. "La velocidad de propagación del sonido en especies madereras de uso comercial". Universidad Nacional

de Santiago del Estero. Revista de Ciencia y Tecnología. Serie Científica N° 6 y 7: 81 - 92 p.

RICE, R. y Skarr, C. 1990. "Acoustic Emission Patterns from the surfaces of Red oak Wafers under Transverse Bending Strees". Wood Sci. and Technol. P.24: 2: 123-129.

RODRIGUEZ BARREAL, J.; Omeñaca, J.; García Esteban, L.; Zazo Muncharaz, J. y Carrilero Ferrer, L. 2006. "Efectos de la impregnación de maderas con protectores en disolvente orgánico e hidrosoluble sobre las propiedades físicas y mecánicas". Departamento de Silvopascicultura y de Industrias Forestales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes y Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal.

ROSS, R. y Hunt, M. 2000. "Stress wave timing nondestructive evaluation tools for inspecting historic structures, a guide for use and interpretation". General Technical Report FPL-GTR-119. Department of Agriculture Forest Service, April, pp.15.

ROSS. R. y Pellerín. 1991. "Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structure and Review". General Technical Report. FPL-GTR-70. Madison.

SUAREZ MONTEIRO, M. A. 1996. "Relación entre la emisión acústica, contenido de humedad y algunas propiedades mecánicas en *Notofagus dombeyi* (mirb.) Oerst". Tesis de grado. Universidad Austral de Chile.

SUIREZS, T. 2005. "Comportamiento de las maderas de *Pinus taeda* impregnado con arseniato de cobre hidratado". Facultad de Ciencias Forestales. UNaM. Eldorado, Misiones, Argentina. Revista Floresta Curitiva PR, v.35, n. 1. jan/abr.

WASSIPUL, F.; Vanek, M. y Mayerhoper, A. 1986. Klima und Schallemissionen bei der Holz-trocknung. Holzforsch und Holzverwert. S.38: 73-79.