

## COMPARACIÓN ENTRE LA CLASIFICACION VISUAL Y LA MECANICA EN PIEZAS DE PINO PONDEROSA

Guillaumet, Alfredo A<sup>(1)</sup>; Filippetti, María C<sup>(2)</sup>; Manavella Roberto D<sup>(3)</sup>.; Meyer Lía C<sup>(4)</sup>

(1) Dr. Ing., Profesor Titular. GIDEC FRVT Universidad Tecnológica Nacional; Argentina.  
[aaguillaumet@frvt.utn.edu.ar](mailto:aaguillaumet@frvt.utn.edu.ar)

(2) Ing. en const., Profesor adjunto. GIDEC FRVT Universidad Tecnológica Nacional; Argentina.

(3) Ing. civil, Profesor Titular. GIDEC FRVT Universidad Tecnológica Nacional; Argentina.

(4) Ing. civil, Becaria doctoral. JTP. GIDEC FRVT Universidad Tecnológica Nacional Tuerto; Argentina.

### RESUMEN

Este trabajo es parte de una investigación desarrollada con el fin de caracterizar, para uso estructural, la madera de pino ponderosa proveniente de bosques implantados en la zona andina de la Patagonia Norte de Argentina. En el año 2002 Argentina comenzó con las normas de clasificación visual pero la tendencia en el mundo es avanzar hacia una clasificación mecánica. El objetivo de este artículo es presentar la comparación entre modelos de clasificación mecánica y de clasificación visual resistente. El programa experimental incluyó 454 cuerpos de prueba de 6 escuadrías diferentes. Los ensayos se realizaron según la norma UNE-EN:408 (2012)<sup>1</sup>. Se diseñaron cinco modelos para la clasificación mecánica. Para la clasificación visual se utilizó un método ya publicado sobre la base de la nudosidad y las dimensiones de los anillos de crecimiento. La clasificación mecánica presentó un 92,7% y 98,8% de aciertos en las calidades superior e inferior respectivamente, con rendimientos del 18% y 36%. La clasificación visual mostró rendimientos más altos, pero con un alto porcentaje de sobreestimaciones, un 64% y un 57% en las calidades superior e inferior respectivamente. Se concluye que con la clasificación mecánica se predice más acertadamente la calidad estructural de cada pieza.

### ABSTRACT

*This work is part of an investigation developed in order to characterize, for structural use, the ponderosa pine wood from forests implanted in the Andean zone of Northern Patagonia in Argentina. In 2002 Argentina started with visual classification standards but the trend in the world is to move towards a mechanical classification. The objective of this article is to present the comparison between mechanical classification and resistant visual classification models. The experimental program included 454 test corps from 6 different squads. The tests were carried out according to the UNE-EN: 408 (2012)<sup>1</sup> standard. Five models were designed for mechanical classification. For visual classification, a previously published method was used on the basis of the knots and the dimensions of the growth rings. The mechanical classification presented 92.7% and 98.8% of correct answers in the superior and inferior qualities respectively, with yields of 18% and 36%. The visual classification showed higher yields, but with a high percentage of overestimations, 64% and 57% in the superior and inferior qualities respectively. It is concluded that with the mechanical classification the structural quality of each piece is more accurately predicted.*

## 1- INTRODUCCIÓN

Argentina es un país sin tradición en la construcción con madera y esto se ve reflejado en la normativa existente para el uso estructural de este material. Las primeras normas IRAM de clasificación visual datan de los años 2002 y 2006. A la fecha solo existen normas de clasificación para la *Araucaria angustifolia*, el *Eucalyptus grandis*, el *Pinus taeda elliotii* y el *Populus deltoides* (IRAM 9670 2002<sup>2</sup>; IRAM 9662/1<sup>3</sup>/2<sup>4</sup>/3<sup>5</sup>/4<sup>6</sup> 2015).

En el año 2016 se aprobó el primer Reglamento Argentino de Estructuras de Madera (INTI-CIRSOC 601 2016)<sup>7</sup>, el mismo se redactó en base al diseño en tensiones admisibles tomando como modelo las NDS 2005<sup>8</sup>. El reglamento presenta un suplemento con los valores de las propiedades estructurales de las cinco especies forestales estudiadas a la fecha, en todos los casos existe la referencia del método de clasificación visual propuesto para cada una de ellas.

La madera es un material natural que presenta grandes variaciones de su calidad, en función de la especie, tratamiento silvicultural y condiciones ambientales. Las propiedades no solo varían de un árbol a otro, sino también dentro del árbol en función de la altura y la distancia a la médula (Glos 1995)<sup>9</sup>. Los desarrollos para obtener mejores propiedades en la madera condujeron a hibridaciones y clonaciones, por lo que debe definirse claramente no solo la especie de la que proviene la madera en estudio sino su origen genético si fuera el caso. Las propiedades estructurales de la madera no solo están afectadas por las características mencionadas precedentemente, sino también por las singularidades que presente (presencia de médula, dimensiones de los nudos, inclinación de las fibras, afectación por hongos o insectos, rectitud del tronco, dimensión de los anillos de crecimiento, entre otras) y el trabajo de aserrado que provoca cortes en las fibras. Todo ello conduce a grandes variaciones en las propiedades resistentes y al definir la resistencia característica como percentil 5% inferior, toda la muestra se encuentra condicionada por los elementos más débiles, desaprovechando las propiedades mayores del 95% de la población.

La clasificación visual presenta dos inconvenientes respecto a su confiabilidad. Uno en relación a la capacidad y precisión del operario para evaluar las singularidades apreciables a simple vista y decidir el grado resistente; y el otro la capacidad de predecir con justeza las propiedades estructurales del elemento sobre la base de estas singularidades. La clasificación mecánica por resistencia se presenta como una alternativa superadora a esta problemática. Distintos autores refieren que la clasificación sobre la base de parámetros mecánicos permite alcanzar mayores rendimientos y grados de calidad que los visuales, con una mayor confiabilidad, (Glos 1995<sup>9</sup>; Diebold y Glos 1994<sup>10</sup>). La ventaja de la clasificación visual es que resulta menos costosa su aplicación y la calidad de una pieza puede modificarse en una inspección de revisión, aún en su posición definitiva de uso, mientras que con la clasificación mecánica esto no es posible.

Se han desarrollado distintos modelos de máquinas para clasificar madera de uso estructural, (Görlacher 1997<sup>11</sup>; Diebold 1997<sup>12</sup>). La denominada máquina de flexión tiene dos formas de trabajar, durante el pasaje de la pieza de madera provoca una deformación constante y mide la fuerza necesaria para alcanzarla o aplica una fuerza

constante y registra la deformación, todo ello a intervalos regulares y sobre longitudes en general entre 0,50 m. y 1,20 m. La flexión se realiza sobre el eje de menor inercia. La combinación de parámetros ha permitido mejorar la capacidad para predecir la resistencia. La combinación de módulo de elasticidad con la medición de los nudos y la incorporación de la densidad ha permitido esa mejora (Glos 1995<sup>9</sup>; Hanhijärvi *et al* 2008<sup>13</sup>; Fank *et al.* 2017<sup>14</sup>). La presencia de los nudos puede determinarse por escaneo óptico de las cuatro caras de la pieza (Roblot *et al.* 2010<sup>15</sup>) y la densidad por medición del peso o la radiación, también es posible determinar el contenido de humedad (Glos 1995<sup>9</sup>). En la medida que aumenta la precisión de la máquina y la determinación de más parámetros aumenta el costo.

En Argentina no existen normas de clasificación mecánica, aunque hay varias publicaciones al respecto para el *Eucalyptus grandis* (Piter 2003)<sup>16</sup>, el pino resinoso (Fank *et al.* 2017)<sup>14</sup> y el *Populus deltoides* (Guillaumet *et al.* 2018)<sup>17</sup>, en todos los casos la correlación entre la resistencia y el módulo de elasticidad resulta la base de la clasificación. La publicación de estos estudios, entre otras condiciones, facilitará en nuestro país la posibilidad de que los aserraderos avancen en la opción de la clasificación mecánica de la madera para uso estructural.

El pino ponderosa es la especie forestal más plantada en la región andino patagónica de Argentina, concentrándose en la precordillera de las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut. Los árboles maduros poseen albura de color amarillento pálido y duramen rojizo claro, diseño floreado en el corte tangencial y vetado en corte radial. La transición entre madera juvenil y madura ocurre a los 20 años de edad (Letourneau *et al.* 2014)<sup>18</sup>. En la actualidad, la mitad del área forestada en la región (44.000 ha) tiene entre 20 y 30 años (Logercio y Deccechis 2006)<sup>19</sup> momento del primer raleo comercial. En consecuencia, la mayor parte de la madera presente en la región proviene de estos raleos y presenta gran proporción de madera juvenil y, en general, numerosos nudos provocados por la ausencia de podas realizadas en tiempo y forma.

No existe en Argentina una norma de clasificación para uso estructural de la madera de Pino ponderosa. En el CLEM 2019 Guillaumet *et al.* (2019)<sup>20</sup> presentaron un estudio sobre el comportamiento estructural de vigas aserradas de esta combinación de especie procedencia. En el mes julio del año 2020 el Reglamento INTI-CIRSOC 601 (2016)<sup>7</sup> incorpora en sus suplementos un método de clasificación visual y los valores admisibles para las propiedades mecánicas. Los estudios presentan a la madera de esta especie como de baja resistencia y muy bajo módulo de elasticidad. Se destaca también un bajo rendimiento en la calidad superior (18%) y un alto descarte (37%) (Guillaumet *et al.* (2019)<sup>20</sup>.

Este trabajo compara el rendimiento y la precisión en la predicción del comportamiento resistente a la flexión de piezas de Pino Ponderosa clasificadas visualmente y diferentes opciones de clasificación mecánica.

## **2- MATERIALES Y MÉTODO**

### **2.1 Material**

La madera de pino ponderosa fue obtenida de trozas de primer raleo comercial

provenientes de tres sitios: el predio La Lucha, el predio de la familia Martin y del barrio cerrado Dos Valles (26, 25 y 32 años de edad respectivamente), todos sitios de la cuenca Arroyo del Medio, próxima a la ciudad de San Carlos de Bariloche. El diámetro promedio mayor de las trozas fue 27,4 cm y el menor de 19,9 cm. Los largos variaron entre 2,35 m y 4,40 m. El volumen promedio de las trozas fue de 0,14 m<sup>3</sup> y el rendimiento del aserrío alcanzó el 50,3 %. Las trozas fueron aserradas, secadas y cepilladas en Bariloche, posteriormente fueron enviadas, envueltas en polietileno, a Venado Tuerto. En el Laboratorio de la Facultad Regional Venado Tuerto, de la Universidad Tecnológica Nacional, se confeccionaron 6 muestras con las dimensiones que se indican en la Tabla 1. Teniendo en cuenta la edad de los árboles se puede considerar que las piezas poseen una alta proporción de madera juvenil.

Muestra	Dimensiones nominales			Cantidad
	Base mm	Altura mm	Largo mm	
1	25	100	500	181
2	50	50	1000	56
3	50	75	1500	58
4	50	100	2000	53
5	50	125	2500	57
6	50	150	3000	49

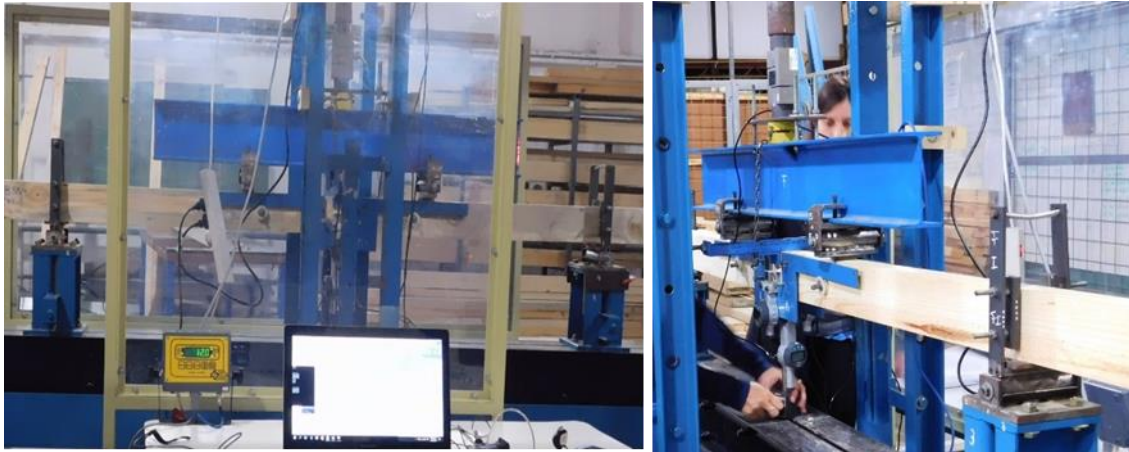
*Tabla 1: Dimensiones y cantidades de los cuerpos de prueba*

## 2.2 Metodología

En cada una de las piezas se relevaron las siguientes singularidades: presencia de médula, nudosidad, dimensiones de los anillos de crecimiento, inclinación de las fibras, fisuras, deformaciones previas al ensayo y signos de ataque biológico. El relevamiento se realizó de acuerdo a las prescripciones de la norma IRAM 9662-3<sup>5</sup> (2015). La nudosidad K se determinó a través la relación entre la dimensión del nudo mayor o agrupamiento de nudos, medida entre líneas paralelas al eje de la pieza y tangentes al mismo con la dimensión transversal de la cara donde se manifiesta (método alternativo UNE EN 1310 1997<sup>21</sup>). Para los agrupamientos de nudos se considera la proyección superpuesta una sola vez. Se considera nudos agrupados cuando la distancia entre el centro de ellos es menor de 150 mm o menor que la altura de la pieza en el plano de flexión.

Los ensayos se realizaron de acuerdo a los lineamientos de la norma UNE EN 408 (2012)<sup>1</sup>. Para la determinación del módulo de elasticidad global se consideró al módulo de elasticidad transversal "G" igual a infinito. El procedimiento es similar al determinado en la norma IRAM 9663 (2013)<sup>22</sup>. La determinación de los valores

característicos y los ajustes a las condiciones de referencia se realizó de acuerdo a la norma IRAM 9664 (2013)<sup>23</sup>. Los ensayos se efectuaron ubicando siempre los cuerpos de prueba con los mayores defectos en la zona traccionada, desatendiendo el criterio de las normas IRAM 9663 (2013)<sup>22</sup> y UNE EN 384 (2010)<sup>24</sup> que establece una selección al azar para este caso. La disposición elegida en esta investigación permite estudiar con mayor profundidad la influencia de los defectos sobre las propiedades mecánicas. Para la resistencia a flexión se determinó el percentil 7,5% en lugar del 5%, de esta manera es posible atenuar los efectos negativos que origina la ubicación de los defectos siempre en la zona traccionada (Piter 2003<sup>16</sup>; Glos & Lederer, 2000<sup>25</sup>). En la Figura 1 se puede apreciar la disposición de los elementos durante el ensayo, a la izquierda se presenta una vista general y a la derecha se aprecia el apoyo móvil, la celda de carga, el dispositivo para distribución de la carga y el posicionamiento de los comparadores.



*Figura 1: Disposición de las vigas durante los ensayos*

Al finalizar el ensayo de cada probeta se determinó el contenido de humedad y la densidad aparente. Se efectuó sobre un trozo de sección completa y libre de nudos extraído de una zona cercana a la rotura. Se respetaron los procedimientos descritos en las normas IRAM 9663 (2013)<sup>22</sup>, ISO 3131 (1975)<sup>26</sup> e ISO 3130 (1975)<sup>27</sup>.

### **3- RESULTADOS**

#### **3.1. Resultados de los ensayos de flexión**

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos en los ensayos a flexión para cada una de las muestras. Los valores de resistencia se encuentran corregidos a la altura de referencia de 150 mm mientras que el módulo de elasticidad global y la densidad se ajustaron a la humedad de referencia del 12%, todo esto según a las prescripciones de la norma IRAM 9664 (2013)<sup>23</sup>. En el caso de la resistencia se muestra la correspondiente al percentil del 7.5 % de acuerdo a lo expresado en el apartado de



metodología.

Muestra	MOR			MOE		Densidad			Cantidad n
	$f_{m,m}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{m,075}$ N/mm <sup>2</sup>	COV %	$E_{m,g,m}$ N/mm <sup>2</sup>	COV %	$\rho_m$ Kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{05}$ Kg/m <sup>3</sup>	COV %	
1	23,0	11,6	36	4886	40	385	321	13	181
2	18,6	9,7	38	4109	37	389	332	13	56
3	20,7	11,6	46	5188	39	381	341	8	58
4	18,7	9,1	44	5068	27	390	331	9	53
5	17,6	8,4	38	4979	29	392	340	10	57
6	16,4	8,5	44	4360	41	394	339	7	49
Total	20,3	10,1	41	4805	37	387	330	11	454

$f_{m,m}$ : valor medio de la resistencia a la flexión.  $f_{m,075}$ : percentil 7,5% de la resistencia a la flexión.  $E_{m,g,m}$ : valor medio del módulo de elasticidad global.  $\rho_{05}$ : percentil 0,05% de la densidad.  $\rho_m$ : valor medio de la densidad. n: número. La resistencia a la flexión está ajustada a la altura de 150 mm (IRAM 9664 2013). El Módulo de elasticidad y la densidad están ajustados a un contenido de humedad del 12% (IRAM 9664 2013).

*Tabla 2: Propiedades mecánicas y densidad para cada muestra*

En la Tabla 3 se presentan los coeficientes de correlación entre la resistencia a la flexión y las propiedades o singularidades que habitualmente tienen una mayor incidencia sobre su valor. Se puede apreciar que el módulo de elasticidad presenta la mayor correlación (0,75) y lo siguen: la nudosidad (-0,54), la dimensión del mayor anillo de crecimiento (-0,45), la densidad (0,12) y la inclinación de las fibras (-0,05).

Propiedad / Singularidad	R	n
Módulo de elasticidad	0,75	454
Nudosidad (K)	-0,54	454
Dimensión del Anillo mayor (AnM)	-0,45	454
Densidad	0,12	454
Inclinación de las fibras (IF)	-0,05	454

R: coeficiente de correlación. n: número

*Tabla 3: Correlación entre la resistencia y las propiedades / singularidades*

### 3.2. Clasificación visual

La propuesta de clasificación visual para vigas aserradas de pino ponderosa fue realizada por Guillaumet *et al.* (2019)<sup>20</sup> y se transcribe en la Tabla 4.

Defecto	Unidad	Calidad	
		Superior	Inferior
Médula	–	Se admite	Se admite
Nudosidad K	cm/cm	Menor o igual a 1/3	Menor o igual a 2/3
Anillos de crecimiento	mm	Menor que 12	Menor que 16

Tabla 4: Pautas para la clasificación visual del pino ponderosa (Guillaumet *et al.* 2019)

Como resultado de la aplicación del método de clasificación visual a las vigas aserradas de pino ponderosa se obtiene un bajo rendimiento en la calidad superior (18%) y un importante descarte (37%). Los valores para las propiedades mecánicas y físicas publicados por Guillaumet *et al.* (2019) se transcriben en la Tabla 5.

Propiedades	Unidad	Clase Resistente		
		Superior	Inferior	Descarte
Resistencia a la flexión p-7.5 %	N/mm <sup>2</sup>	18,9	9,6	7,8
Módulo de Elasticidad global p-5%	N/mm <sup>2</sup>	4097	2303	1986
Módulo de Elasticidad global medio	N/mm <sup>2</sup>	6321	4596	4312
Densidad p-5%	kg/m <sup>3</sup>	341	337	337
Densidad valor medio	kg/m <sup>3</sup>	382	392	389
Cantidad de piezas	n	41	132	100

La resistencia a la flexión está ajustada a la altura de referencia de 150 mm según las prescripciones de la norma 9664 (2013). El módulo de elasticidad global (IRAM 9663 2015<sup>22</sup>) y la densidad están ajustada a la humedad de referencia del 12 % según las prescripciones de la norma IRAM 9664 (2013<sup>23</sup>). p-7,5%: percentil 7,5%. p-5%: percentil 5%.

Tabla 5: Propiedades mecánicas y físicas de vigas aserradas de pino ponderosa clasificadas visualmente (Guillaumet *et al.* 2019)

### 3.3. Clasificación mecánica

Para la determinación de un método de clasificación mecánica se establece como

objetivo alcanzar los valores de resistencia y rigidez presentados por Guillaumet *et al.* (2019)<sup>20</sup> para vigas aserradas de esta especie y procedencia, los mismos se presentaron en la Tabla 5.

Para proponer un método de clasificación mecánica se analizaron cuatro expresiones polinómicas (PC1, PC2; PC3 y PC4) provenientes de los análisis de regresión entre la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad, la nudosidad, la densidad y la dimensión del anillo de crecimiento. Se adicionó al estudio un modelo muy simple estableciendo un valor mínimo del módulo de elasticidad para cada calidad resistente. Los cinco modelos son:

$$PC1 = 7,75402 - 0,132628*AM + 0,0108396*\rho - 8,46627*K + 0,0027923*Eg \quad (1)$$

$$PC2 = 6,04112 + 0,0117301*\rho - 8,71059*K + 0,00286755*Eg \quad (2)$$

$$PC3 = 10.1993 - 8,46045*K + 0,0029236*Eg \quad (3)$$

$$PC4 = 3.67073 + 0,00346*Eg \quad (4)$$

$$\text{Clase superior } Eg > 6.321 \text{ N/mm}^2; \text{ clase inferior } 6.321 \text{ N/mm}^2 > Eg > 4.596 \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

Donde:

PC1/2/3/4: Parámetro combinado 1/2/3/4.

AM: dimensión del anillo de crecimiento mayor en mm.

$\rho$ : densidad en kilogramos por metro cúbico.

K: nudosidad expresada en proporción a la dimensión de la cara en que se manifiesta.

$E_g$ : módulo de elasticidad global en newton por milímetro cuadrado.

En la primera ecuación se presenta la determinación del Parámetro Combinado 1 (PC1) en base a la dimensión del anillo de crecimiento mayor, la densidad, la nudosidad K y el módulo de elasticidad. En la Tabla 6 se puede apreciar que presenta un estadístico  $R^2$  que explica el 64,5% de la variabilidad del parámetro combinado, en la misma Tabla se observa que el valor-P (V-P) correspondiente al anillo mayor es superior 0,05, lo que indica que no es término estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95% por lo que se considera eliminar dicho valor. En la segunda ecuación (PC2) se eliminó el término del anillo mayor dando por resultado un estadístico  $R^2= 64,3\%$ , la densidad presenta el valor-P mayor pero inferior a 0,05. Para evaluar el ajuste en base a menos parámetros y ecuaciones más sencillas se desarrollan las ecuaciones tres (PC3) y cuatro (PC4), en el modelo del PC3 solo se deja la nudosidad y el módulo de elasticidad y en el del PC4 solo se incluye el módulo de elasticidad. En la ecuación del PC3 se aprecia una leve disminución del estadístico  $R^2$  (63,9%) mientras que en la correspondiente al PC4 baja marcadamente (55,9%).



	PC1		PC2		PC3		PC4	
	V-P	R <sup>2</sup>	V-P	R <sup>2</sup>	V-P	R <sup>2</sup>	V-P	R <sup>2</sup>
Ajuste [%]		64,5		64,3		63,9		55,9
Módulo de elasticidad	0,00		0,00		0,00		0,00	
Nudosidad K	0,00		0,00		0,00			
Densidad	0,05		0,03					
Anillo Mayor	0,22							

PC1: parámetro combinado 1. PC2: parámetro combinado 2. PC3: parámetro combinado 3. PC4: parámetro combinado 4. V-P: valor-P.

Tabla 6: Ajuste de las ecuaciones de regresión de los parámetros combinados

Para evaluar la precisión de cada método de clasificación para predecir la calidad de una pieza se compara la calidad propuesta con la que surge de los valores de ensayo. Para asignar una calidad a partir de los valores de ensayo se utilizan como referencia los valores de la Tabla 5 propuestos por Guillaumet *et al.* (2019<sup>20</sup>) (calidad superior:  $f_m > 18,9 \text{ N/mm}^2$  y  $E_{m,g} > 6.321 \text{ N/mm}^2$ ; calidad inferior:  $18,9 \text{ N/mm}^2 > f_m > 9,6 \text{ N/mm}^2$  y  $6.321 \text{ N/mm}^2 > E_{m,g} > 4.596 \text{ N/mm}^2$ ). En la Tabla 7 se presentan los resultados indicando las sobre-estimaciones, aciertos y sub-estimaciones que se generaron en la aplicación de cada método de clasificación. Para la clasificación visual se utilizó el método propuesto por Guillaumet *et al.* (2019)<sup>20</sup> transcrito en la Tabla 4. El valor del parámetro combinado para las cuatro expresiones se ajustó para tener un número similar de piezas en cada calidad, como valor de módulo de elasticidad mínimo para cada calidad se utilizaron los indicados en la Tabla 5 para vigas.

Se puede apreciar que la clasificación visual presenta en las dos calidades estructurales un bajo número de aciertos (35,7 % y 34,8%) y un alto número de sobre-estimaciones (64,3% y 57,1%), la mayor parte de las sobre-estimaciones corresponden a piezas con valor del módulo de elasticidad que no alcanzó el de referencia para esa calidad. Los cuatro parámetros combinados (PC) presentan un mayor número de aciertos que la clasificación visual, superior al 70%. Para cada uno de ellos se realizó la determinación manteniendo un número similar de piezas en cada clase, se observa que el PC4, que solo incluye al módulo de elasticidad, presenta el mayor número de aciertos en ambas calidades (85,4% y 91,2%).

La última propuesta que considera solo la comparación del módulo de elasticidad aumenta los aciertos a los valores de 92,7% y 98,8%.

Método de clasificación	Clase	Condición	Ajuste del método			n
			Sobre-estimas %	Aciertos %	Sub-estimas %	
Visual <sup>(1)</sup>	S	AM; K<1/3; AM<12	64,3	35,7	0	140
	I	AM; K<2/3; AM<16	57,1	34,8	8,1	184
	D	Descarte	0	61,5	38,5	130
PC1	S	PC1>26	26,7	73,3	0	86
	I	26>PC1>19	17,3	74,7	8	162
	D	PC<19	0	87,8	12,2	205
PC2	S	PC2>26	28,4	71,6	0	88
	I	26>PC2>19	17,5	74,4	8,1	160
	D	PC2<19	0	87,8	12,2	205
PC3	S	PC3>26	28,4	71,6	0	88
	I	26>PC3>19	17,6	74,5	7,9	165
	D	PC3<19	0	89,6	10,4	201
PC4	S	PC4>25	14,6	85,4	0	89
	I	25>PC4>19	8,8	91,2	0	171
	D	PC4<19	0	100	0	194
E <sub>g</sub>	S	E <sub>g</sub> >6321	7,3	92,7	0	82
	I	6321>E <sub>g</sub> >4596	1,2	98,8	0	165
	D	E <sub>g</sub> <4596	0	100	0	207

<sup>(1)</sup> Clasificado según propuesta de Guillaumet *et al.* (2019)<sup>20</sup>. PC: parámetro combinado. E<sub>g</sub>: módulo de elasticidad global. AM: admite médula, K: nudosidad. AnM: dimensión del anillo de crecimiento mayor

*Tabla 7: Evaluación de la precisión de cada método de clasificación*

En la clasificación visual el coeficiente de variación (COV) del módulo de elasticidad alcanzó valores de 31% y 34% para las calidades superior e inferior respectivamente, mientras que para la clasificación en base un módulo de elasticidad mínimo para cada calidad el COV bajó al 18% y al 9% para cada calidad. Tanto en la clasificación visual como en la mecánica el COV de la resistencia a la flexión se situó por debajo del 9%.

Los resultados están en línea con los publicados por Guillaumet *et al.* (2018)<sup>17</sup> que reportó un 46% de sobre-estimas en la calidad superior para madera de *Populus deltoides* clasificado visualmente y solo un 2% para las mismas piezas clasificadas

mecánicamente en base al módulo de elasticidad. Fank *et al.* (2017)<sup>14</sup> reportó mejores resultados con la clasificación mecánica del pino resinoso que con la clasificación visual, alcanzó mayores valores de módulo de elasticidad con coeficientes de variación menores a 20%.

La clasificación mecánica generó un mayor número de aciertos que la clasificación visual, corrigiendo el alto número de sobre-estimaciones que ésta provocaba, lo que se tradujo en una disminución de la cantidad de piezas en la calidad superior y un incremento del descarte.

#### **4- CONCLUSIONES**

La clasificación mecánica arrojó un porcentaje de aciertos superior al 90% en la predicción del comportamiento resistente de las piezas de pino ponderosa.

El módulo de elasticidad es el parámetro de mayor importancia para realizar la clasificación mecánica. El modelo con mayor índice de aciertos es el que establece un valor mínimo del módulo de elasticidad para cada calidad, con prescindencia de la utilización de otras singularidades, tales como, la nudosidad, la densidad o la dimensión de los anillos de crecimiento.

La clasificación mecánica permitió alcanzar en el módulo de elasticidad valores de coeficiente de variación inferiores al 20%.

Considerando el bajo número de aciertos de la clasificación visual, y la significativa mejora que se obtiene al clasificar mecánicamente las piezas en base al módulo de elasticidad, en Argentina se debería considerar incorporar a sus normas de clasificación esta metodología.

#### **REFERENCIAS**

1. Agencia Española de Normalización y Certificación. UNE-EN 408:2012. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Madrid. 2012.
- 2-. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9670 (2002). Madera estructural. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos (Pino elliotti y Pino taeda) del noroeste argentino mediante una evaluación visual. Buenos Aires. 2002.
3. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9662-1. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 1: Tablas de Pino Paraná (*Araucaria angustifolia*), Buenos Aires, 2015, 15 p.
4. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9662-2. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 2: Tablas Eucalipto (*Eucalyptus grandis*), Buenos Aires, 2015, 15 p.
5. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9662-3. Madera laminada

encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 3: Tablas de Pino Taeda y Elliotti (*Pinus taeda* y *elliottii*), Buenos Aires, 2015, 15 p.

6. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9662-4. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por Resistencia. Parte 4 – Tablas de álamo ‘australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’ (*Populus deltoides*). Buenos Aires, 2015.

7. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro de investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles INTI-CIRSOC 601 – Reglamento Argentino de Estructuras de Madera, Buenos Aires, 2013, 176 p.

8. American Forest & Paper Association. American Wood Council. National Design Specification for Wood Construction NDS 2005. Washington DC. USA. 2005.

9. Glos, P. Strength grading. Basis of design, material properties, structural components and joints. Timber Engineering STEP 1, pp: A6/1-A6/8. Centrum Hout, The Netherlands. 1995.

10. Diebold, R.; Glos, P. Verbesserte Holznutzung durch neuartige maschinelle Festigkeitssortierung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 52:222-222. 1994.

11. Görlacher, R. Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem GradeMaster 403. In *Grazer Holzbau-Fachtagung, Sortierung und Festigkeit B/2:1-10*. 1997.

12. Diebold, R. Möglichkeiten der maschinellen Holzsortierung mit dem Euro-GreComat. In *Grazer Holzbau-Fachtagung, Sortierung und Festigkeit. B/1:1-19*. 1997.

13. Hanhijärvi, A.; Ranta-Maunus, A. Development of strength grading of timber using combined measurement techniques. Report of the Combigrade - project - phase 2. *VTT Publications* 686.2008. 60 pp.

14. Fank, P.; Stefani, P.; Piter J.C. (2017). Clasificación mecánica de tablas de pinos resinosos cultivados en el nordeste de Argentina. *Maderas. Ciencia y tecnología* 19(3): 247 - 264, 2017. DOI: 10.4067/S0718-221X2017005000021

15. Roblot, G.; Bléron, L.; Mériaudeau, F.; Marchal, R. Automatic computation of the knot area ratio for machine strength grading of Douglas-fir and Spruce timber. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 14(10): 1317-1332. 2010.

16. Piter J.C. Clasificación por resistencia de la madera aserrada como material estructural. Desarrollo de un método para el Eucaliptus grandis de Argentina. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de La Plata. 2003.

17. Guillaumet, A.A.; Manavella R.D.; Filippetti, M.C. Clasificación mecánica de elementos estructurales de madera de *Populus deltoides*. 25° Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Resistencia, Chaco, Argentina. 2018. 15p.

18. Letourneau, F.J. et al. Caracterización xilo-tecnológica de la madera de una plantación adulta de *Pinus ponderosa* de la Patagonia Argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, vol. 40, núm. 2, pp. 196-201. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina. 2014.

19. Loguercio, G. A. And Dececchis, F., 2006. Forestaciones en la Patagonia Andina:

potencial y desarrollo alcanzado. Patagonia Forestal. Año XII N° 1. pp. 4-6 y N° 2. pag. 4-8. ISSN 1514-2280. 2006.

20. Guillaumet, A.A; Filippetti, MC, Manavella, RD; Meyer, LC; Caballé, G; Martinez Meier, A. Resistencia en flexión del pino ponderosa de la Patagonia norte, Argentina. 4° Congreso latinoamericano de Estructuras de Madera. Montevideo. Uruguay. 2019. 10 p.

21. Agencia Española de Normalización y Certificación. UNE EN 1310:1997. Madera aserrada y madera en rollo. Método de medida de singularidades. Certificación. Madrid. (1997)

22. Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM 9663. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Buenos Aires. 2013.

23. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 9664. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Buenos Aires. 2013.

24. Agencia Española de Normalización y Certificación. UNE-EN 384:2010. Determinación de los valores y la densidad. Madrid. 2010.

25. Glos, P.; Lederer, B. Sortierung von Buchen- und Eichenschnittholz nach der Tragfähigkeit und Bestimmung der zugehörigen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte. Bericht Nr. 98508, Institut für Holzforschung, München. 2000

26. International Organization for Standardization. ISO 3130 (1975). Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests.

27. International Organization for Standardization. ISO 3131 (1975). Wood – Determination of density for physical and mechanical tests.