

# Implicaciones financieras de la evaluación de calidad estructural de la madera sobre árboles en pie y trozas de *Pinus pinaster* mediante métodos no destructivos.

SANTACLARA ESTÉVEZ, O.<sup>1</sup>, MERLO SÁNCHEZ, E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento Innovación y Tecnología. MADERA PLUS Calidad Forestal S.L.

## Resumen

La comercialización de madera para uso estructural exige la asignación de una clase resistente, siendo la clasificación visual el método más usado. La calidad de la madera para uso estructural depende directamente de la calidad de la madera en rollo y ésta varía entre árboles y a lo largo del fuste. Por ello, la posibilidad de caracterizar la materia prima suministrada a la industria es una oportunidad clara. Este trabajo analiza las implicaciones de rendimiento y económicas derivadas de clasificar por métodos no destructivos árboles en pie y trozas. Se midieron 345 trozas obtenidas en su mayoría de árboles previamente caracterizados en pie y 849 piezas de madera aserrada obtenidas de estas trozas, que son clasificadas siguiendo la norma de clasificación visual. La clasificación acústica de trozas reduce el porcentaje de rechazos de la clasificación visual en un 7,4% respecto al lote de trozas sin clasificar. La selección de árboles en pie, permite obtener un 86% de las trozas con la velocidad adecuada. Las ventajas se traducen en un beneficio económico estimado de 6,20 €/por tonelada de rolla procesada. Para un aserradero que procese 5.000 toneladas de rolla por año supondría un aumento de 31.000 € en el beneficio anual.

## Palabras clave

*Pinaster*, madera, calidad, estructural, clasificación, velocidad acústica, métodos no destructivos, HM200.

## 1. Introducción

La madera para uso estructural es un material técnico y normativizado, obligado a cumplir estándares de calidad y resistencia establecidos y su calidad depende directamente de la calidad de la madera en rollo de la que procede y del despiece realizado. Las propiedades mecánicas de la madera varían de un modo importante entre árboles y a lo largo del fuste, incluso en piezas que han sido clasificadas visualmente con la misma calidad, procedentes de árboles de la misma edad y de la misma parcela (HUANG et al, 2003). Por ello la posibilidad de realizar una caracterización de la materia prima suministrada a la industria es claramente una oportunidad para optimizar el uso del recurso forestal.

En los últimos años la tecnología acústica está considerada como una herramienta eficaz para la clasificación de trozas por sus propiedades mecánicas, como evidencian numerosos trabajos donde se demuestra la eficacia de la clasificación sónica de trozas en el rendimiento y calidad final de la madera obtenida tras el procesado (MATHESON et al, 2002; CARTER et al, 2005; WANG et al, 2009; ACHIM et al, 2011; SANTACLARA & MERLO, 2011). La tecnología sónica también permite caracterizar la calidad estructural sobre árbol en pie (CHAUHAN & WALKER, 2006; SANTACLARA et al, 2011, SEARLES, 2012). Estas herramientas acústicas son de uso común en países como Australia, Nueva Zelanda, Estados

50 Unidos (HUANG et al, 2003) y en menor medida en Europa (MOORE et al, 2009). La técnica  
51 de resonancia acústica, basada en la frecuencia natural de vibración de la fibra de la madera,  
52 ha conseguido el reconocimiento de la industria de estos países y es la que ha mostrado  
53 mejores resultados y aplicabilidad industrial para la clasificación de trozas. En España,  
54 algunas empresas como MADERA PLUS ([www.maderaplus.es](http://www.maderaplus.es)) ya ofrecen este servicio de  
55 caracterización desde el árbol en pie trabajando en colaboración con los diferentes actores de  
56 la cadena monte-industria, para optimizar el aprovechamiento del recurso forestal y mejorar  
57 los rendimientos y la calidad de la madera aserrada.

58 La Directiva de Productos de la Construcción (Directiva 89/106/CE) exige que se  
59 asigne una clase resistente a la madera que se comercializa en la UE destinada hacia  
60 aplicaciones estructurales. Esto hace que la posibilidad de predecir la calidad estructural de la  
61 madera en rollo y del árbol en pie antes del procesado tome una gran importancia.

62 Existen dos sistemas de clasificación estructural de la madera aserrada, visual y  
63 mecánica, establecidos por la serie de normas europeas EN-14081, siendo el visual el único  
64 utilizado hasta el momento en España. Sin embargo, estudios previos han demostrado la  
65 tendencia de este sistema a subestimar el valor real de resistencia, y por lo tanto a que un  
66 porcentaje importante de la madera con una clase resistente válida sea rechazada (ACUÑA et  
67 al, 2006; ÍÑIGUEZ, 2007; CARBALLO et al, 2009). Para reducir esta proporción de rechazos  
68 sería interesante incorporar el sistema de clasificación acústica sobre la madera aserrada como  
69 colofón a una selección previa de árboles y trozas más adecuados para la producción de  
70 madera estructural.

71 La mayoría de los trabajos realizados hasta el momento relacionan la velocidad acústica  
72 de las trozas con los valores de módulo de elasticidad o módulo resistente obtenido tras un  
73 ensayo a flexión o clasificación mediante máquina de flexión de las piezas aserradas  
74 (MATHESON et al, 2002; WANG et al, 2009; ACHIM et al, 2011; SANTA CLARA &  
75 MERLO, 2011) y en algún caso con valores de clasificación sónica de las piezas, pero tan  
76 sólo se ha encontrado un trabajo que también relacione la velocidad de la troza con el  
77 rendimiento de clasificación visual de la madera aserrada (WANG et al, 2009).

78 Puesto que el método de clasificación visual es el único (o el más común) utilizado  
79 actualmente en España, se considera de gran interés poder demostrar la efectividad de la  
80 clasificación acústica de trozas y de árboles en pie respecto al rendimiento de clasificación  
81 visual de la madera obtenida y estimar la repercusión sobre el rendimiento en piezas y sobre  
82 la rentabilidad por la venta de la madera. Para la industria de la madera, mejorar el sistema de  
83 clasificación de árboles y trozas, identificando aquellos con la mejor calidad estructural,  
84 significaría un mayor beneficio económico y optimizar el recurso forestal y los procesos. El  
85 aserradero evitaría pagar más por trozas de peor calidad y procesarlas, reduciendo de este  
86 modo el porcentaje de rechazos y se beneficiaría también del ahorro del coste de reaserrado  
87 de estos en piezas para aplicaciones no estructurales.

88

## 89 2. Objetivos

90

91 Analizar la efectividad de un método de clasificación de madera en rollo, basado en  
92 tecnología sónica, para aumentar el rendimiento final de tablas de calidad estructural  
93 clasificadas visualmente obtenidas de dichas trozas.

94 Demostrar los beneficios económicos asociados a la utilización madera en rollo  
95 previamente clasificada para la industria de aserrado.

96 Promover la implementación de tecnología en la cadena de aprovechamiento del sector  
97 forestal y de la madera desde el árbol en pie.

98

### 3. Metodología

Para este trabajo se utilizaron los datos previamente obtenidos en un estudio anterior sobre un total de 345 trozas, procedentes en su mayoría de árboles de varias masas forestales que habían sido caracterizados en pie por métodos sónicos y variables dendro- y dasométricas (SANTACLARA et al, 2011). Las trozas fueron obtenidas a lo largo de todo el fuste, llevando a cabo un aprovechamiento máximo del tronco y bajo el siguiente esquema de despiece: la primera troza de 3 m, y el resto del fuste en trozas de 3, 4 y 5 m dependiendo de la posibilidad de cada árbol dada por su rectitud. Todas las trozas han sido identificadas para poder mantener la trazabilidad a lo largo de todo el proceso.

#### Evaluación de trozas

La evaluación de trozas y procesado para obtención piezas estructurales se realizó en un único aserradero. Esta evaluación se llevó a cabo en la semana siguiente al apeo, por lo que se considera el mismo contenido de humedad para todas las trozas, entorno al 100%. En cada troza se midió la longitud, y el diámetro de la base en algunas de ellas para testar la conveniencia de incluirlo en el modelo según describe WANG et al (2009). En todas las trozas se midió la velocidad acústica utilizando el equipo Director HM-200<sup>TM</sup> (Fibre-gen, New Zealand) basado en la técnica de resonancia acústica. Golpeando con un martillo sobre una de las testas de la troza se induce una onda de resonancia longitudinal en la madera que viaja repetidas veces a lo largo de la longitud de la troza. El equipo consta de un acelerómetro que mide la frecuencia natural de vibración de la madera, calculando la velocidad a partir del segundo armónico y la longitud de la troza (ACHIM et al, 2011).

#### Aserrado

Las trozas se aserraron en piezas estructurales de pequeña y gran escuadría, considerando estas últimas como aquellas piezas con un grosor mayor de 70 mm, según indica la UNE 56544. El esquema de aserrado fue el de máximo aprovechamiento según el diámetro de la troza para obtener piezas de las dimensiones especificadas. La primera troza de 3 m se destinó únicamente a la obtención de piezas de pequeña escuadría de sección 100x40 y 150x50 mm y el resto de trozas para piezas de gran escuadría. En total 849 piezas de madera aserrada, 169 de 100x40 mm, 509 de 150x50 mm, 43 de 150x100 mm, 70 de 200x150 mm y 58 de 200x200 mm de sección transversal. Todas las piezas fueron secadas por debajo del 18% de humedad y clasificadas visualmente.

#### Clasificación visual de la madera aserrada

La clasificación visual de todas las piezas obtenidas se ha llevado a cabo según la Norma UNE 56544:2007, que describe el sistema de clasificación visual aplicable a la madera aserrada de uso estructural de las principales especies de coníferas de procedencia española, pino silvestre, laricio, pinaster y radiata. Se asignaron 3 clases de calidad, ME1 (madera estructural de primera), ME2 (madera estructural de segunda) y la clase MEG (madera estructural de gran escuadría) para piezas de grosor mayor de 70 mm. Las piezas que no cumplieron ninguna de estas clases se calificaron como rechazos. Según la Norma, la clase MEG de gran escuadría no es aplicable al *Pinus pinaster*, sin embargo, en este trabajo se ha decidido clasificar las piezas de gran escuadría bajo esta clasificación por carecer de otra referencia oficial a nivel nacional. Dado el objetivo de este trabajo, para la clasificación visual no se han tenido en cuenta los criterios de presencia de gemas, fenda y deformaciones, por ser defectos propios del proceso de aserrado y secado.

## 148 **Evaluación de la rentabilidad**

149 Para evaluar la mejora en el beneficio económico derivada de la clasificación acústica  
150 de trozas, se han planteado dos propuestas de clasificación acústica fijando una velocidad de  
151 corte. El análisis consiste en comparar el rendimiento obtenido en la clasificación visual de  
152 las piezas obtenidas a partir de las trozas seleccionadas en cada propuesta, frente al total de la  
153 muestra sin clasificar. Los datos económicos de precios de venta y rendimientos de procesado  
154 provienen de las consultas realizadas a varios aserraderos de Galicia.

155 También se ha estudiado la relación entre la clasificación acústica propuesta para trozas  
156 y el modelo propuesto por SANTA CLARA et al (2011), denominado en este trabajo como  
157 índice de selección de árbol (ISA). Dicho modelo estima el módulo de elasticidad medio  
158 sobre árbol individual a partir de velocidad acústica, medida sobre árbol en pie, y variables  
159 de masa y árbol, como el diámetro, área basimétrica de la masa y el índice de sitio. De este  
160 modo es posible proponer un rango de valores del ISA que permita caracterizar el árbol, y  
161 poder llevar a cabo una selección previa en el monte de aquellos pies y masas con mejores  
162 cualidades para la producción de madera estructural, aumentando la efectividad y rentabilidad  
163 del aprovechamiento.

164

## 165 **4. Resultados**

166

### 167 **4.1 Rendimiento de la clasificación visual para madera estructural**

168

169 La Tabla 1 muestra el rendimiento en porcentajes de los resultados de la clasificación  
170 visual de las piezas de pequeña y gran escuadría en las clases establecidas por la Norma. Para  
171 el total de las piezas de la muestra, sin haber aplicado ninguna clasificación acústica a las  
172 trozas, el 26 % se ha clasificado como rechazo y el 74% como madera estructural (ME). El  
173 grupo de pequeña escuadría presenta un rendimiento más alto de clasificación que el grupo de  
174 gran escuadría, un 23,3% de piezas rechazadas frente a un 33,8% respectivamente. Los  
175 principales criterios de rechazo en gran escuadría han sido la desviación de la fibra y en  
176 menor medida el diámetro de nudos agrupados de cara. Mientras que en pequeña escuadría  
177 han sido el diámetro de nudos individuales y agrupados.

178

179

*Tabla 1. Rendimiento de la clasificación visual para pequeña y gran escuadría*

Dimensión	ME1 (%)	ME2 (%)	MEG (%)	R (%)	ME (%)	R (%)
PE	33,3	43,4	--	23,3	76,7	23,3
GE	--	--	66,2	33,8	66,2	33,8
Total					74,0	26,0

PE: Pequeña escuadría; GE: Gran escuadría; ME1, ME2 y MEG: Clases visuales; R: Rechazos; ME: Madera estructural

180

### 181 **4.2 Efectividad de la clasificación acústica de trozas**

182

183 Para cuantificar la mejora en el rendimiento de producción de madera estructural en el  
184 aserradero a partir de la clasificación acústica de trozas, se ha simulado una clasificación  
185 fijando la velocidad acústica de corte en 2,74 km/s y en 3 km/s. La elección de estas dos  
186 velocidades parte de los resultados obtenidos por SANTA CLARA & MERLO (2011). En la  
187 Figura 1 se observa el aumento del porcentaje de madera clasificada visualmente como  
188 estructural (ME) con respecto a la velocidad de corte, 74% en el grupo sin clasificación,  
189 76,7% para el grupo  $V > 2,74$  y 79,5% para el grupo  $V > 3,00$ . Es decir, el rendimiento de la  
190 clasificación visual aumentaría un 7,4% si la madera se obtuviese de trozas con velocidad  
191 acústica mayor de 3 km/s.

192

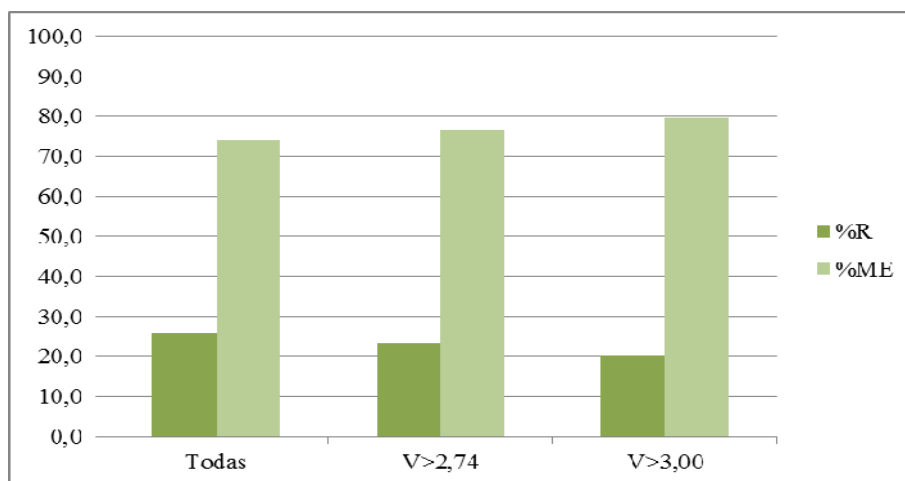


Figura 1. Porcentaje de madera estructural (ME) y rechazos (R) para cada clase de velocidad

193  
194  
195  
196  
197  
198  
199  
200

Si se hiciese la clasificación teniendo en cuenta una producción separada de piezas de pequeña y gran escuadría (Figuras 2 y 3) el resultado es similar. La mejora en el rendimiento de la clasificación visual sería de un 6,4% para la madera de pequeña escuadría y de un 9,1% para la madera de gran escuadría.

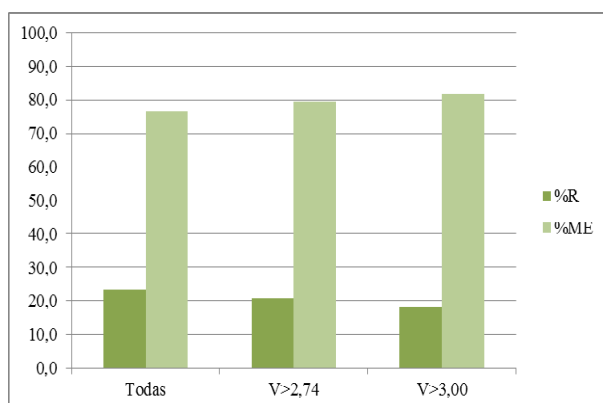


Figura 2. Pequeña escuadría. Porcentaje de madera estructural (ME) y rechazos (R) para cada clase de velocidad

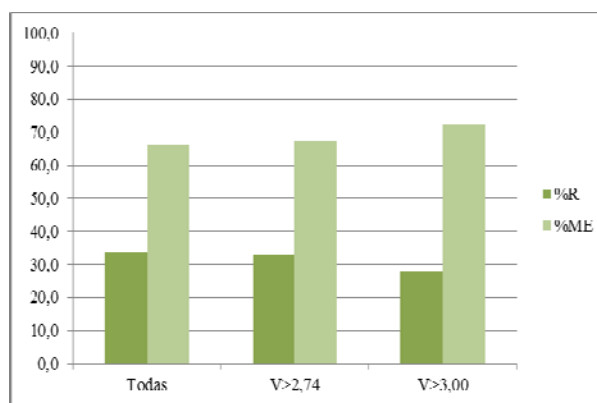


Figura 3. Gran escuadría. Porcentaje de madera estructural (ME) y rechazos (R) para cada clase de velocidad

201  
202  
203  
204  
205  
206  
207  
208  
209  
210  
211  
212  
213  
214

#### 4.3 Beneficio económico del clasificado acústico de trozas

Para el cálculo del beneficio económico se ha planteado una situación en que la clasificación acústica es llevada a cabo en el parque de maderas sobre trozas de distintas longitudes y diámetros destinadas a la producción de madera estructural. Se han establecido dos precios de venta para la madera estructural de pinaster seca, en función de la sección y para las clases ME2 y MEG: 230 €/m<sup>3</sup> para pequeña escuadría y 380 €/m<sup>3</sup> para gran escuadría. Para las piezas clasificadas como rechazos se les ha supuesto una clasificación estética de “quintas” con un precio de venta de 190 €/m<sup>3</sup>. Como rendimiento de transformación rolla-madera aserrada se ha tomado un valor de 2,2 t rolla/m<sup>3</sup> madera aserrada. Se asume una compensación entre el coste añadido de clasificar las trozas acústicamente y el coste de reaserrado de las piezas rechazadas de gran escuadría, en parte debido a la complejidad de calcular este último por los múltiples casos que pueden valorarse.

215 Por ello los costes de explotación se consideran iguales para el grupo sin clasificar que para el  
216 clasificado.

217  
218 Se demuestra que una selección previa de las trozas proporciona un aumento de la  
219 calidad estructural de la madera aserrada obtenida. El mayor rendimiento obtenido en la  
220 clasificación visual de las piezas se traduce en un aumento de 13,65 €/m<sup>3</sup> por la venta de  
221 madera, o lo que es lo mismo, 6,20 € por tonelada de rolla procesada (Tabla 2). Para un  
222 aserradero pequeño que procese 5000 t/año de pinaster, el beneficio sería de 31027,46 €  
223 anuales.

224  
225

Tabla 2. Cálculo y beneficio económico resultante del clasificado acústico de trozas

	Sin clasificar	Clasificación V>3,00 km/s
Volumen producción (m <sup>3</sup> )	100	100
Volumen estructural (m <sup>3</sup> )	74	79,5
Volumen “quintas” (m <sup>3</sup> )	26	20,5
Precio pequeña escuadría (€/m <sup>3</sup> )	230	230
Precio gran escuadría (€/m <sup>3</sup> )	385	385
Precio “quintas” (€/m <sup>3</sup> )	190	190
Rendimiento rolla (t/m <sup>3</sup> )	2,2	2,2
Valor de venta (€)	53983,43	55348,64
Beneficio clasificación (€/m <sup>3</sup> )		13,65
Beneficio clasificación (€/t rolla)		6,20

226  
227 Esta estimación se ha basado en un mismo precio de venta para todas las clases visuales  
228 (ME1, ME2 y MEG), por lo que sería posible mejorarlo atendiendo a esta diferenciación por  
229 clases de resistencia.

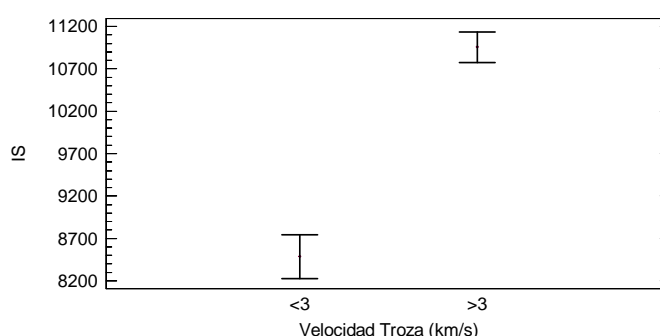
230

#### 231 4.4 Eficiencia de la clasificación desde árbol en pie

232

233 Para comprobar si las trozas con mayor velocidad provienen de árboles con un índice de  
234 selección de árbol (ISA) más alto, se ha llevado a cabo un análisis de varianza estableciendo  
235 dos grupos de trozas a partir de la velocidad acústica de referencia, 3 km/s. El gráfico de  
236 medias (Figura 5) muestra la existencia de diferencias significativas entre ambos grupos,  
237 corroborando de esta forma la hipótesis.

238



239  
240 *Figura5. Gráfico de medias del ISA de árbol en pie asociado a la obtención de trozas de distinta velocidad acústica*

241

242 En el gráfico de medias se observa que es posible diferenciar aquellos árboles de los que  
243 se han obtenido trozas con velocidad acústica superior a 3 km/s. Por lo tanto se podría definir  
244 un valor de selección para árbol en pie aplicando un modelo de regresión para asociar las



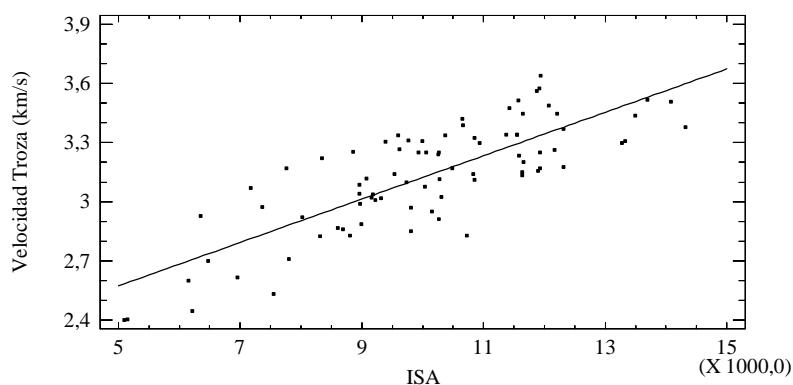
245 clasificaciones de árbol y de troza. El resultado del análisis de regresión lineal entre ambas  
 246 clasificaciones indica una relación moderada ( $R^2=0,64$ ,  $p<0,0001$ ). La ecuación de regresión  
 247 entre el ISA del árbol y la velocidad acústica media de las trozas obtenidas del mismo (Figura  
 248 6) es:

249

250

251

$$\text{Velocidad Troza (km/s)} = 2,02172 + 0,000110162 * \text{ISA}$$



252

253

Figura 6. Relación lineal entre el ISA de árbol en pie y el promedio de velocidad acústica de las trozas del árbol.

254

255 A partir de aquí, y teniendo en cuenta el error estándar de la regresión para fijar los  
 256 límites de predicción, es posible fijar un índice de selección de árbol en pie que permita  
 257 caracterizar aquellas masas de las que obtener madera en rollo con una mejor calidad  
 258 estructural para asegurar un mayor rendimiento y rentabilidad en su aprovechamiento por la  
 259 industria de procesado. Fijando un valor para el ISA, se podría conseguir que el 86% de las  
 260 trozas obtenidas de los árboles seleccionados presenten una velocidad superior a 3 km/s.

261

## 262 5. Discusión

263

264 Los resultados de la clasificación visual del total de las piezas, procedentes de las trozas  
 265 sin clasificar, muestran un importante porcentaje de rechazos, 26%, que no se pueden  
 266 considerar como madera estructural, a pesar de no haber considerado los criterios de gema,  
 267 fendas y deformación. Este porcentaje es mayor y más importante en las piezas de gran  
 268 escuadría, 33,8%, ya que, debido a las dimensiones de este grupo, implica tener que reaserrar  
 269 y adecuar sus dimensiones a otros destinos como carpintería o embalaje, con el consiguiente  
 270 coste y pérdida para el aserradero. Realizar previamente al procesado una clasificación  
 271 acústica de las trozas ha demostrado ser efectiva para reducir este porcentaje de rechazos  
 272 mejorando en un 7,4% para el total de la muestra. Algunos autores como WANG et al (2009)  
 273 incluyen en el modelo de clasificación acústica de trozas el diámetro medio de las dos testas y  
 274 la posición dentro del fuste. En este caso tan sólo se disponía del diámetro medio de unas  
 275 pocas trozas, por lo que será un punto a considerar en futuros trabajos.

276

277 Hay que tener en cuenta la baja eficiencia de la clasificación visual frente a los métodos  
 278 acústicos al asignar una clase resistente a las piezas, como demuestran diversos estudios  
 279 llevados a cabo (ACUÑA et al, 2006; ÍÑIGUEZ, 2007). La subjetividad de la clasificación  
 280 visual frente a una estimación objetiva de las propiedades de la fibra de la madera conseguida  
 281 con los métodos sónicos, presenta a estos últimos como una herramienta eficaz de  
 282 clasificación para mejorar el rendimiento. De hecho, la disminución en el porcentaje de  
 283 rechazos podría ser mayor si la clasificación de las piezas aserradas se hiciese mediante el  
 sistema de clasificación mecánico en vez del visual, bien sea por máquina de flexión o por

284 métodos sónicos como han demostrado diversos autores (HERMOSO, 2001; MOORE et al,  
285 2009; ACHIM et al, 2011). De este modo, si además de la clasificación acústica de trozas se  
286 implementase en la línea de producción una clasificación mecánica para las piezas aserradas  
287 basada en métodos sónicos, se estima que se podría multiplicar por 4 la mejora obtenida en el  
288 porcentaje de rechazos, debido al mayor acierto en la asignación de la clase resistente.

289 Los beneficios económicos de la clasificación acústica de trozas también han quedado  
290 patentes. Al ser la madera estructural un material técnico que ha de cumplir con los requisitos  
291 establecidos por la normativa también es el producto de mayor valor añadido. Dada la  
292 diferencia en el precio, un aumento en el rendimiento de clasificación se convierte en un  
293 aumento de valor importante. Hay que tener en cuenta, que si la clasificación estructural de la  
294 piezas fuese mecánica o directamente con métodos sónicos, el beneficio de la clasificación  
295 acústica de trozas podría triplicarse hasta los 18 € por tonelada de rolla procesada.  
296 Obviamente la clasificación acústica de trozas cuenta con un coste añadido que, en cualquier  
297 caso, sería perfectamente asumible con respecto al beneficio total y frente al ahorro de costes  
298 de reaserrado. Obtener un beneficio de 6,44 € por tonelada de rolla procesada no repercute  
299 sólo sobre el aserradero, sino también sobre el productor forestal. Para la industria, además  
300 del beneficio, permite mejorar su competitividad ajustando precios y costes, pero también le  
301 da cierto margen para que invierta en una mejora del suministro, solicitando madera  
302 procedente de masas con la calidad adecuada para sus procesos y aumentar los rendimientos,  
303 de este modo se adecuaría el precio de la madera en pie y rolla a su calidad y valor  
304 tecnológico.

305 Se ha demostrado la posibilidad de selección desde árbol en pie para obtener madera  
306 con las propiedades mecánicas deseadas. La relación entre el índice de selección del árbol y la  
307 velocidad acústica en troza es moderada,  $R^2 = 0,64$ , pero acorde con la bibliografía  
308 consultada, donde varía de 0,47 hasta 0,75 (MATHESON et al, 2002; CHAUHAN &  
309 WALKER, 2006; SEARLES, 2012). Aplicando la corrección por el error estándar del  
310 modelo, se consigue un aumento de la probabilidad de acierto. Fijando un valor para el índice  
311 de selección es posible obtener trozas con mejor calidad estructural y por lo tanto con un  
312 mayor rendimiento de clasificación visual.

313 La utilidad de esta información es enorme para optimizar los recursos e incrementar el  
314 rendimiento en la industria, permitiendo a productores forestales y empresas de explotación  
315 conocer qué proporción del recurso es potencialmente válido para madera clasificada  
316 estructuralmente y, por la contra, identificar y localizar aquellas masas con baja calidad y  
317 destinarlas hacia un producto más apropiado.

318 Se abre por lo tanto una buena oportunidad para propietarios forestales, productores e  
319 industria, de intervenir para mejorar la calidad de la madera, implementando tecnología  
320 sónica en el proceso de valoración de las masas, optimizando el sistema de aprovechamiento  
321 en el momento de corta y clasificando las trozas por su calidad adecuada para un producto  
322 concreto antes de su procesado con la tecnología acústica como una herramienta óptima para  
323 tal fin.

324

## 325 **6. Conclusiones**

326

327 Se ha demostrado la mejora en el rendimiento de la clasificación visual de la madera  
328 para uso estructural mediante la clasificación previa de árboles en pie y trozas a partir de  
329 mediciones acústicas.

330 Realizar previamente al procesado una clasificación acústica de las trozas ha reducido el  
331 porcentaje de rechazos de la madera obtenida en un 7,4% respecto al lote de trozas sin  
332 clasificar.



333 La selección de árboles en pie, basado en velocidad acústica y parámetros del árbol y la  
 334 calidad de estación, permite conseguir que el 86% de las trozas obtenidas de dichos árboles  
 335 presenten la velocidad que asegure una reducción de más del 7% en los rechazos.

336 La aplicación de esta tecnología ofrece un medio rentable y eficaz al identificar trozas  
 337 con la calidad adecuada para fines estructurales. Esta mejora se traduce en un mayor beneficio  
 338 económico para la industria de procesamiento y también en una puesta en valor de la madera de  
 339 calidad al existir un método objetivo para su evaluación.

340 Para que los beneficios asociados a la tecnología acústica y clasificación de trozas sean  
 341 una realidad, es necesaria su implementación a lo largo de toda la cadena monte-industria.

342

## 343 7. Agradecimientos

344

345 Este trabajo se ha llevado a cabo principalmente dentro del proyecto regional gallego  
 346 PIDGT (07MRU004CT) y el proyecto nacional MICINN PSE.310000-2008 cofinanciado con  
 347 fondos FEDER de la Unión Europea.

348

## 349 8. Bibliografía

350

351 ACHIM, A.; PARADIS, N.; CARTER, P.; HERNÁNDEZ, R.E.; 2011. Using acoustic  
 352 sensors to improve the efficiency of the forest value chain in Canada: a case study with  
 353 laminated veneer lumber. *Sensors* 2011, 11, 5716-5728.

354

355 ACUÑA, L.; DÍEZ, M.R.; CASADO, M.; 2006. Los ultrasonidos y la calidad de la madera  
 356 estructural. Aplicación a *Pinus pinaster Ait.* Boletín del CIDEU 2: 7-26 (2006).

357

358 AENOR; 2007. UNE 56544:2007. Clasificación visual de la madera aserrada para uso  
 359 estructural. Madera de coníferas. AENOR. Madrid.

360

361 CARBALLO, J.; HERMOSO, E.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I.; 2009. Mechanical properties  
 362 of structural maritime pine sawn timber from Galicia (*Pinus pinaster Ait. ssp. atlantica*)".  
 363 *Invest Agrar: Sist Recur For* (2009) 18(2), 152-158.

364

365 CARTER, P.; BRIGGS, D.; ROSS, R.J., WANG, X.; 2005. Acoustic Testing to enhance  
 366 western forest values and meet customer wood quality needs. Productivity of western forest: a  
 367 forest products focus. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-642. U.S. Department of Agriculture,  
 368 Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 121-129.

369

370 CHAUHAN, S.S.; WALKER, J.C.F.; 2006. Variations in acoustic velocity and density with  
 371 age, and their interrelationships in radiata pine. *Forest Ecology and Management* 229 (2006)  
 372 388-394.

373

374 HERMOSO, E.; 2001. Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris*  
 375 L. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

376

377 HUANG, C.; LINDSTRÖM, H.; NAKADA, R.; RALSTON, J.; 2003. Cell wall structure and  
 378 wood properties determined by acoustics. A selective review. *Holz Roh-Werkst* 61(5), 321-  
 379 335.

380

- 381 ÍÑIGUEZ, G.; 2007. Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las  
382 propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso  
383 estructural. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.  
384
- 385 MATHESON, A.C.; DICKSON, R.L.; SPENCER, D.J.; JOE, B.; ILLIC, J.; 2002. Acoustic  
386 segregation of *Pinus radiata* logs according to stiffness. *Ann. For. Sci.* 59 (2002) 471-477.  
387
- 388 MOORE, J.; LYON, A.; SEARLES, G.; RIDLEY-ELLIS, D.; 2009. The use of acoustic-  
389 based NDT to predict the wood properties of UK-grown sitka spruce at different stages in the  
390 wood supply chain. *Proceedings of 16<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing  
391 and Evaluation of Wood.* 65-70.  
392
- 393 SANTACLARA, O.; ÁLVAREZ, J.G.; MERLO, E.; 2011. Modeling structural lumber  
394 quality for *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain using standing tree acoustic assesment,  
395 tree characteristics and stand variables. *Proceedings of 17<sup>th</sup> International Nondestructive  
396 Testing and Evaluation of Wood Symposium.* Sep. 2011. Sopron, Hungary.  
397
- 398 SANTACLARA, O.; MERLO, E.; 2011. Acoustic segregation of *Pinus pinaster* logs for  
399 structural lumber production according to strength classes. *Proceedings of 17<sup>th</sup> International  
400 Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium.* Sep. 2011. Sopron, Hungary.  
401
- 402 SEARLES, G.J.; 2012. Acoustic segregation and structural timber production. Thesis.  
403 Edinburgh Napier University.  
404
- 405 WANG, X.; VERRILL, S.; LOWELL, E.; ROSS, R.J.; HERIAN, V.; 2009. Acoustic sorting  
406 models for log segregation. *Proceedings of 16th International Symposium on Nondestructive  
407 Testing and Evaluation of Wood.* Beijing. 45-51.