

SELECCIÓN GENÉTICA DE PROCEDENCIAS DE *PINUS PINASTER* POR CRECIMIENTO Y CALIDAD DE MADERA PARA USO ESTRUCTURAL EN EDADES TEMPRANAS

GENETIC SELECTION OF *PINUS PINASTER* PROVENANCES FOR GROWTH AND STRUCTURAL WOOD QUALITY IN YOUNG TREES

Esther Merlo ⁽¹⁾, Gonzalo Caballé ⁽²⁾, Oscar Santaclara ⁽³⁾, Francisco J. Lario Leza ⁽⁴⁾

(1) Dra. Ing. Ftal., MADERA PLUS, SL. Ourense, España

(2) Dr. Ing. Ftal., Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Bariloche, Argentina

(3) Ing. Ftal., MADERA PLUS, SL. Ourense, España

(4) Ing. Ftal., TRAGSA, Maceda, España

Dirección de contacto: Esther Merlo - maderaplus@maderaplus.es

Código de identificación: T1-03

Resumen

La efectividad de la predicción del potencial genético y el potencial de ganancia por selección en los programas de mejora requiere el conocimiento de parámetros genéticos de las variables por la que se quiere seleccionar. En este estudio se estiman los parámetros genéticos de propiedades tecnológicas de la madera, asociadas con la calidad para uso estructural en *Pinus pinaster*. Este estudio se realizó sobre un ensayo de procedencias de *P. pinaster* de 9 años de edad con un diseño de bloques completos al azar. La caracterización estructural de la madera se llevó a cabo mediante métodos destructivos y no destructivos sobre una muestra de 10 procedencias previamente seleccionadas por crecimiento. En cada árbol en pie se midieron variables de crecimiento y forma junto con la velocidad de propagación de onda sónica a lo largo del fuste y la densidad en verde. Posteriormente, los árboles fueron apeados y se realizaron los ensayos a flexión sobre el fuste completo para obtener el módulo de elasticidad, módulo de rotura y densidad de la madera. Se comprobaron diferencias significativas en las principales propiedades tecnológicas evaluadas y su correlación con distintos parámetros de crecimiento y forma del árbol. Se estimaron los coeficientes de Heredabilidad en sentido amplio para todas las variables de calidad de madera y se observa una buena capacidad predictiva de estas variables a través de métodos sónicos. Los resultados muestran la capacidad de ganancia en calidad de madera estructural por selección genética en los programas de mejora.

Palabras clave: MOR; MOE; métodos no destructivos; velocidad acústica; selección; procedencias

Abstract

*Accurate prediction of genetic potential and response to selection in breeding requires knowledge of genetic parameters for important selection traits. In this study, we estimated genetic parameters for wood properties in *Pinus pinaster*. This study was performed on 9 year old provenance test of *P. pinaster* with a randomized complete block design. The wood characterization was carried out by destructive and non-destructive methods on a sample of 10 provenances previously selected by growth. In each standing tree, growth and shape variables were measured and the sonic wave propagation velocity along the stem and the green density were also measured. Afterwards, the trees were felled and the standard test method for elasticity (MOE) and rupture modulus (MOR) of entire stem and density of the wood were performed in all trees. Significant differences were verified in the main technological properties evaluated and their correlation with different growth parameters and tree shape. The coefficients of heritability for all wood quality variables were estimated and a good predictive capacity of these variables is observed through sonic methods. The results show the structural wood quality gain by genetic selection in the improvement programs.*

Keywords: MOR; MOE; non-destructive methods; sonic wave propagation velocity; selection; provenances

1. INTRODUCCIÓN

Los programas de mejora deben responder a las demandas del sector forestal, incluyendo caracteres de interés económico. Las características tecnológicas de la madera determinan, en gran medida, las posibilidades de uso del recurso y, por tanto, la rentabilidad de las plantaciones. Así, la inclusión de parámetros de calidad de madera en los programas de mejora de especies forestales con fines productivos es considerada fundamental por numerosos autores [1]. En el momento actual, se tiende a masas forestales con crecimientos anuales cada vez mayores y turnos de aprovechamiento más cortos, lo que implica que el porcentaje de madera juvenil, en el momento de la corta sea muy elevado. Es por esto que realizar una selección de material genético en base a propiedades de madera juvenil se considera fundamental para optimizar la rentabilidad de la masa y la calidad final del producto [2].

La madera de *Pinus pinaster Ait* está caracterizada para su uso estructural y tiene asignada en España las clases resistente C18 y C24, siendo la densidad, el módulo de elasticidad y el módulo de rotura, los parámetros más importantes que definen la calidad para este uso. Estudios anteriores sobre las masas de *P. pinaster* en este país, han mostrado el potencial de esta especie para suministrar madera para uso estructural de alta calidad, así como una gran variabilidad entre y dentro de procedencias [3]. La selección de nuevo material genético con buenas propiedades tecnológicas para uso estructural, optimizaría la rentabilidad del aprovechamiento de este recurso y mejoraría el porcentaje de madera de mayor clase resistente, aumentando la competitividad ante un mercado global exigente y competitivo de madera.

Actualmente diferentes ensayos de procedencias de esta especie, han sido instalados en distintas regiones productivas de nuestro país, con el objetivo de seleccionar aquellas que mejor se adaptan a las condiciones de crecimiento y los cuales han permitido analizar la variabilidad de comportamiento entre y dentro de las procedencias. Por otro lado, estudios de correlación juvenil-adulto a nivel poblacional han mostrado que es posible realizar una selección temprana por caracteres de crecimiento sin pérdida de ganancia [4,5]. Sin embargo, es arriesgado realizar la selección de los materiales de mejora basado sólo en variables de crecimiento, ya que en algunos casos existe una correlación negativa entre el crecimiento y las propiedades que definen la calidad de la madera. En el caso de *P. pinaster*, trabajos recientes muestran una correlación negativa del diámetro con el módulo de elasticidad y con la densidad [6], aunque también una amplia variabilidad de las propiedades de calidad estructural de madera, dentro de la especie, lo que hará posible realizar una selección conjunta de ambos caracteres con adecuadas estrategias de selección.

Este estudio se enmarca en una red de 8 parcelas de ensayo distribuidas en distintas localizaciones del interior de Galicia con 24 procedencias españolas de *P. pinaster* y una procedencia del material mejorado de Francia. Esta red de parcelas tiene un gran valor por cuanto ensaya las procedencias de mejor comportamiento productivo en gran parte del rango de la especie y lo hace en los distintos Subtipos Fitoclimáticos presentes en la Región de Procedencia 1b definida por Alía et al (1996) [7].

El objetivo de este trabajo es conocer, a nivel procedencia, las diferencias en crecimiento y en propiedades tecnológicas para uso estructural y determinar los patrones de variación y la repetitividad para delinear posibles estrategias de selección.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La evaluación se realizó sobre una réplica del ensayo de procedencias de *Pinus pinaster* de 9 años de edad, instalado sobre macetas de 150 l en el vivero forestal de la empresa TRAGSA (42°16'43''N, 7°37'29''O), Maceda, Ourense, España. Se evaluaron un total de 86 árboles seleccionados al azar, sobre cuatro bloques del ensayo, en las 10 procedencias con mejor desempeño (tasa de crecimiento y volumen) de las 25 procedencias existentes.

En cada árbol se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura total (h). Como variable predictiva de rigidez de la fibra se midió la velocidad de propagación de onda acústica en sentido longitudinal por el fuste (V_{ST300}), utilizando el equipo ST300 (Fibre-Gen, NZ), en la cara opuesta a la dirección de inclinación del árbol y sobre una distancia de 80 cm centrada a 1 m de altura desde la base (Figura 1).



Figura 1: Medición de velocidad de desplazamiento de onda acústica sobre árbol en pie



a)



b)

Figura 2: a) medición de velocidad de desplazamiento sobre troza con equipo de resonancia; b) ensayo de flexión estática hasta rotura en las instalaciones de la Plataforma Pemade, Universidad de Santiago de Compostela, USC.

Se aparearon 4 árboles representativos por procedencia y se obtuvo la primera troza de 2 m, sobre la que se midió la frecuencia de resonancia de la fibra de madera utilizando el equipo de resonancia HM200 (Fibre-Gen, NZ) (Figura 2a). La velocidad de desplazamiento (V_{HM200}) se calculó considerando el segundo armónico y longitud de la troza. Para cada troza se calculó el Módulo de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR) en estado verde, contenido de humedad superior al 30%, mediante ensayo de flexión estática hasta rotura (Figura 2b). Finalizado el ensayo se extrajo un trozo libre de defectos para el cálculo de la densidad básica (ρ).

El módulo de elasticidad dinámico, MOE_{din} , se calculó a partir de la expresión:

$$MOE_{din} = V^2 * \rho \quad (1)$$

Siendo V (m/s) la velocidad de desplazamiento de onda acústica en el interior de la madera en sentido longitudinal de la fibra y ρ (kg/m³) la densidad de la madera.

Para el análisis estadístico y obtención de los componentes de varianza se usó el procedimiento estadístico GLM, utilizando dos modelos lineares de análisis:

Modelo 1: para las variables medidas sobre árbol en pie considerando el diseño experimental:

$$y_{ijk} = \mu + P_i + B_j + E_{ijk} \quad (2)$$

Modelo 2: para las variables medidas sobre la madera, sin considerar diseño experimental:

$$y_{ij} = \mu + P_i + E_{ij} \quad (3)$$

Siendo y el valor de la variable medida, μ el valor medio de la variable en el ensayo, P el efecto de la procedencia sobre la variable, B el efecto del bloque y E el error experimental. La procedencia se consideró factor aleatorio y el bloque factor fijo.

Para cada una de las variables se obtuvieron los coeficientes de varianza asociados a la procedencia, bloque y error, y se calculó la Repetitividad o Heredabilidad en sentido amplio a nivel procedencia utilizando la ecuación según el modelo de análisis aplicado:

Modelo 1:
$$Hp = \frac{V_P}{V_P + V_E/n} \quad (4)$$

Modelo 2:
$$Hp = \frac{V_P}{V_P + V_E} \quad (5)$$

Siendo V_P la varianza de la procedencia, V_E la varianza del error y n el número de bloques

Para poder estimar la ganancia asociada a la selección de procedencias se calcula el coeficiente de variación de la procedencia con la ecuación:

$$COV_P = \frac{\sqrt{V_P}}{\mu} \quad (6)$$

La ganancia por selección de procedencias se obtuvo según la fórmula:

$$G = i * COV_P * H_p^2 \quad (7)$$

siendo i la intensidad de selección dentro de procedencias.

3. RESULTADOS

La Tabla 1 muestra los valores obtenidos de crecimiento y propiedades de calidad estructural de la madera. Los coeficientes de variación son mayores en las propiedades tecnológicas de la madera que en las variables de crecimiento, probablemente debido a que la población evaluada ya había sido seleccionada previamente por crecimiento entre el total de las procedencias a estudiar. Los resultados muestran una variabilidad moderada en las propiedades tecnológicas, que definirán su potencial para uso estructural sobre los árboles de la muestra.

Tabla 1: Resumen estadístico de variables medidas

Variable	n	media	SD	mín	max	CV%
V _{ST300} (m/s)	79	2597	380,06	1510	3267	14,6
h (m)	86	4,41	0,64	2,6	6,25	14,6
DAP (cm)	86	7,8	1,2	4,29	10,75	15,56
Dens. básica (kg/m ³)	40	361	59,5	200	470	16,48
(MOE) (MPa)	40	1655	0,675	637	3449	40,78
(MOR) (MPa)	40	18,49	5,3	8,46	30,13	29,06
MOEdin	40	5,51	1,6	2,6	8,85	29,60

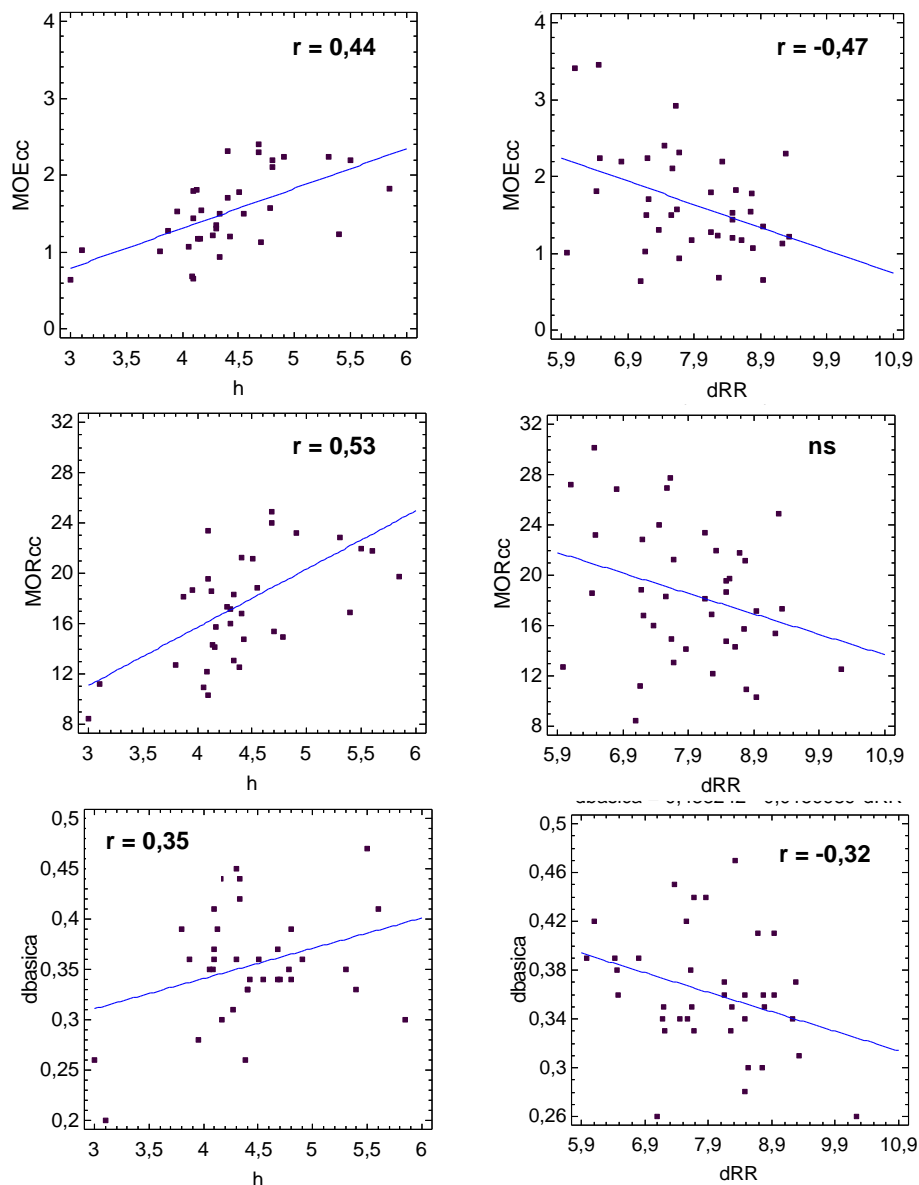


Figura 3: Gráficos de correlación lineal (r) entre Módulo de elasticidad (MOEcc, MPa), Módulo de rotura (MORcc, MPa,) y densidad básica (dbasica, Kg/m³) y los parámetros de crecimiento altura (h, m) y diámetro (dRR, cm).

Las correlaciones entre las propiedades de la madera y las variables de crecimiento expresadas en la Figura 3, muestran una correlación negativa con el diámetro, pero positiva con la altura.

En la Figura 4 se aprecian diferencias significativas entre procedencias para el MOEdin, MOE y MOR, pero no en los valores de densidad, siendo la procedencia 25 la que se diferencia significativamente del resto. El ranking de procedencias obtenido a partir del MOEdin demuestra la efectividad de los métodos sónicos para seleccionar los extremos de mayor y menor calidad.

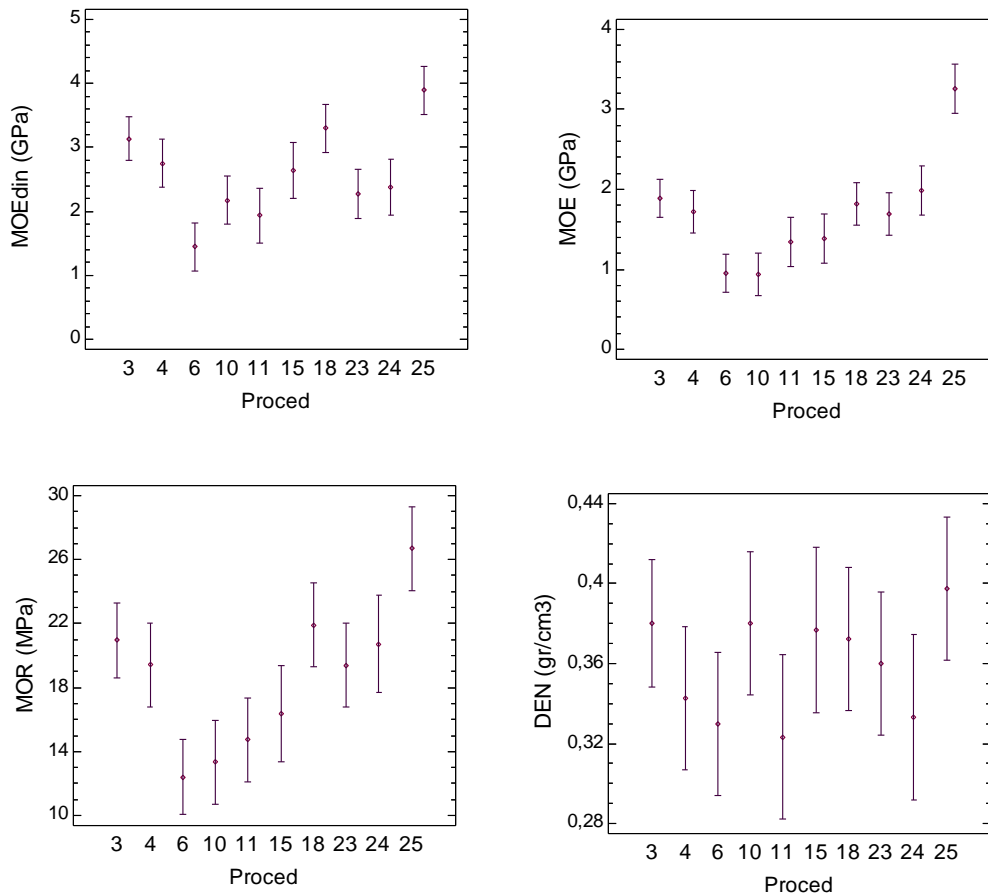


Figura 4: Ranking de las procedencias (Proced) en las propiedades de calidad estructural de la madera y diferencias significativas entre ellas.

La Tabla 2 resume los resultados obtenidos de coeficiente de variación de la procedencia (COVp), Heredabilidad (Hp) y G% (ganancia por selección de procedencias expresada como porcentaje). Se observaron mayores valores de heredabilidad (Hp) en las características resistentes de la madera (MOE, MOR) respecto a las variables de crecimiento (DAP y h). Aplicando una misma intensidad de selección, la máxima ganancia por selección se obtendría para el módulo de elasticidad estático (26%, Tabla 2).

Tabla 2: Ganancia de selección por variable

	COV _P	H _P	G%
h	8,1	0,34	2,754
DAP	4,6	0,14	0,644
MOE	36,3	0,72	26,136
MOEdin	25,0	0,70	17,500
MOR	22,3	0,56	12,488

4. DISCUSIÓN

En la estrategia de selección de una especie, es fundamental definir la correlación entre las propiedades tecnológicas de la madera y las variables de crecimiento. Es necesario conocer esta relación debido a que puede ser moderadamente positiva (más crecimiento mejores características tecnológicas) a moderadamente negativa (más crecimiento con pérdidas de aptitud tecnológica) [8,9]. En el presente caso de estudio, se observa una correlación negativa de las propiedades tecnológicas para madera estructural (MOR y MOE) con el diámetro, pero positiva con la altura, acorde con lo observado en otros estudios de evaluación genética [10] y concordante con la influencia de la altura y la esbeltez de la planta sobre las propiedades tecnológicas de su madera encontradas en este mismo ensayo (datos no presentados).

Tradicionalmente, ha sido la densidad de la madera el parámetro más utilizado para seleccionar árboles superiores dentro de los programas de mejora. Sin embargo, algunos autores [8, 11] concluyen que la rigidez es mejor parámetro que la densidad para estos fines. Las comparaciones realizadas con densidad, MOE y MOR, muestran al MOE como mejor parámetro de selección, tanto a nivel de procedencia, por tener mayor índice de repetitividad o heredabilidad ($H_P = 0,72$, Tabla 2), como a nivel individual, por tener el mayor coeficiente de variación ($COV_P = 36,3$, Tabla 2) y conseguir el mayor porcentaje de ganancia ($G\% = 26,2$, Tabla 2). La mayor variabilidad obtenida en MOR y MOE frente a densidad fue también observada por otros autores [13]. En este sentido, Cave et al, 1994 [12], mostraron para diferentes coníferas que la rigidez cambia de la madera juvenil a la madera madura, del orden de 5 a 6 veces en proporción a la disminución del ángulo de la microfibrilla, mientras que la densidad sólo cambia aproximadamente 0,4 veces.

Las heredabilidades obtenidas en este estudio para las propiedades tecnológicas de la madera (MOE y MOR), han sido mayores que las heredabilidades para los rasgos de crecimiento (h, DAP). Estudios anteriores también mostraron heredabilidades bajas para variables de crecimiento y de moderadas a altas para MOE [10,14]. Los niveles de repetitividad obtenidos han sido elevados, al igual que en otros trabajos observados sobre material juvenil de otras especies [15] y obedece al hecho de que las heredabilidades para la rigidez de la madera son superiores en árboles jóvenes que en árboles adultos [16,17]. Los altos valores de repetitividad obtenidos indican que las variables están bajo un moderado control genético y que la selección y ganancia por dichas variables será efectiva. Las diferencias significativas observadas entre procedencias así como la alta variabilidad individual, suponen una oportunidad en el programa de mejora de esta especie para seleccionar material genético superior en propiedades tecnológicas de calidad estructural combinando superioridad en crecimiento con propiedades tecnológicas de madera.

Los bajos valores de MOE obtenidos pueden estar asociados a diversas causas como el carácter juvenil de la madera, el elevado porcentaje de madera de compresión debido a la tendencia a la curvatura de esta especie o a la dificultad de realizar un ensayo de flexión estática sobre fustes con alta conicidad, elipticidad y presencia de curvaturas. Valores bajos de MOE, entre 4 y 6 GPa o inferiores, han sido obtenidos en probetas pequeñas cercanas a la médula [18] o estimados por métodos indirectos como Silviscan sobre muestras de barrena obtenidas a la altura del DAP (1,30

m) [19]. El hecho de haber utilizado el fuste completo aumenta el porcentaje de anillos con baja edad cambial, influyendo en que el valor del MOE sea menor. Según algunos autores, el MOE en el cilindro de madera juvenil puede llegar a ser del orden de 5 a 6 veces menor que en madera adulta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco de diferentes proyectos de investigación que se definen a continuación: Proyecto "IMAGINE" convocatoria, FEDER ININTERCONECTA n°: ITC-20151167 con título "Innovación en la sinergia de la cadena de valor de la madera gallega de coníferas para una industria más eficiente"; Proyecto "TOPWOOD" Convocatoria H2020-MSCA-RISE-2014, n°: 645654 con título "Wood phenotyping tools: properties, functions and quality"; y Beca FAPESP. 2015/11926-7 con título "Antecipação do conhecimento de propriedades da madeira utilizando ensaio de propagação de ondas em plantas jovens". Especial agradecimiento al apoyo técnico del personal del vivero de TRAGSA y del personal del laboratorio PEMADE, en la Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.

REFERENCIAS

- [1] Rozenberg, Ph, Franc, A. y Cahalan, C. Incorporating wood density in breeding programs for softwoods in Europe: a strategy and associated methods. *Silvae Genet* (2001) 50: 1-7.
- [2] Missanjo, E. y Matsumura, J. Genetic improvement of wood properties in *Pinus kesiya* Royle ex Gordon for sawn timber production in Malawi. *Forests* (2016), 7: 253-259. doi:10.3390/f7110253.
- [3] Carballo, J., Hermoso, E., Fernández-Golfín, JI. Mechanical properties of structural maritime pine sawn timber from Galicia (*Pinus pinaster* Ait. ssp. *atlantica*). *Invest Agrar Sist Recur For* (2009) 18: 152-158.
- [4] Merlo, E., Díaz, R., Zas, R. y Fernández-López, J. Propuesta de utilización de ensayos de procedencias de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco como material de base para la obtención de material forestal de reproducción. *Inv. Agrar.; Ser. Rec. For.* (2002) 13: 492- 505.
- [5] Zas, R., Merlo, E., Fernandez-Lopez L. Juvenile-mature genetic correlations in *Pinus pinaster* under different nutrient \times water regimes. *Silvae Genet.* (2004) 53: 124-129.
- [6] Merlo, E., Alvarez, JG, Santaclara, O. y Riesco, G. Modeling modulus of elasticity of *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain with standing tree acoustic measurements, tree, stand and site variables. *Forest Systems* (2014) 23 (1): 153-166.
- [7] Alía, R., Gil, L. and Pardos, JA. Performance of 43 *Pinus pinaster* Ait. provenances on 5 locations in central Spain. *Silvae Genet.* (1995) 44(2-3): 75-81.
- [8] Johnson, GR., Gartner, BL. Genetic variation in basic density and modulus of elasticity of coastal Douglas-fir. *Tree Genet. Genomes* (2006) 3: 25-33.
- [9] Jayawickrama, KJS., Ye, TZ., Howe, GT. Heritabilities, intertrait genetic correlations, GxE interaction and predicted genetic gains for acoustic velocity in mid-rotation coastal Douglas fir. *Silvae Genet.* (2011) 60: 8-18.
- [10] Gapare, WJ., Baltunis, BS., Ivković, M., Wu, HX. Genetic correlations among juvenile wood quality and growth traits and implication for selection strategy in *Pinus radiata* D. Don. *Ann. For. Sci.* (2009) 66: 606-612.
- [11] Kumar, S., Dungey, H.S., Matheson, A.C. Genetic parameters and strategies for genetic improvement of stiffness in *Radiata* pine. *Silv. Genet.* (2006) 55: 77-84.
- [12] Cave I.D., Walker J.C.W. Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle. *For. Prod. J.* (1994) 44: 43-48.
- [13] Walker, JCF., Nakada, R. Understanding corewood in some softwoods: a selective review on stiffness and acoustics. *International Forestry Review* (1999) 1(4): 251-259.
- [14] Dungey, HS., Matheson, AC., Kain, D., Evans, R. Genetics of wood stiffness and its component traits in *Pinus radiata*. *Can. J. For. Res.* (2006) 36: 1165-1178.
- [15] Lenz, P., Auty, D., Achim, A., Beaulieu, J., Mackay, J. Genetic improvement of white spruce mechanical wood traits. Early screening by means of acoustic velocity. *Forests* (2013) 4: 575-594.

- [16] Chen, Z-Q, Gil, MRG, Karlsson B, Lundqvist, S-O, Olsson, L., Wu HX. Inheritance of growth and solid wood quality traits in a large Norway spruce population tested at two locations in southern Sweden. *Tree Gene Genom* (2014) 1–13. doi: 10.1007/s11295-014-0761-x.
- [17] Chen, Z.Q., Karlsson, B., Lundqvist, SO., Garca Gil, M.R., Olsson, L., Wu, H. X. Estimating solid wood properties using Pilodyn and acoustic velocity on standing trees of Norway spruce. *Annals of Forest Science* (2015), 72 (4), pp.499-508. 10.1007/s13595-015-0458-9.
- [18] Burdon, RD., Britton A.J. y Waldord G.B. Wood stiffness and bending strength in relation to density in four native provenances of *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* (2001) 31 (1): 130-146.
- [19] Ivkovic, M., Gapare, WJ., Abarquez, A.; Ilic, J.; Powell, M.B.; Wu, H.X. Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine. *Wood Sci. Technol.* (2009) 43: 237–257.