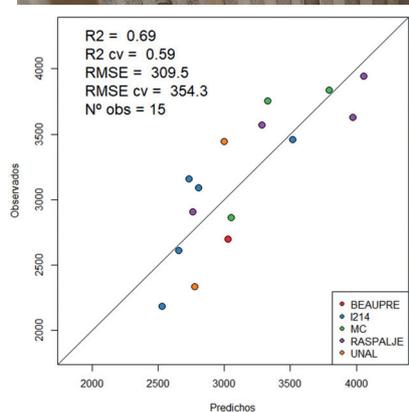


Influencia del clon y de la altura en el árbol en las propiedades tecnológicas del producto final.



Troza	MOE _L	MOR _L	MOE _T	MOR _T
1	5568,5	34,3	2444,9	18,6
2	7452,3	40,9	3238,3	22,7
3	7560,7	42,7	3464,4	24,5

Clon	MOE _L	MOR _L	MOE _T	MOR _T
I-214	5988,6	33,1	2648,2	19,3
UNAL	6053,3	35,6	2698,3	19,4
RASPALJE	7241,4	41,3	3135,6	22,7
MC	7295,7	41,3	3220,4	24
BEAUPRE	7159,9	42,9	3288,4	22,6



CLON	MOE (N/mm ²)	MOR (kN/mm ²)	Densidad (kg/m ³)
UNAL	7770,2	25,6	657,5
BEAUPRE	9201,8	27,5	628,5
I-214	9849,2	31,4	639,9
MC	10168,5	29,0	628,2
RASPALJE	10774,5	33,1	649,5

Esther Merlo Sánchez
Miguel Piñeiro García
Madera Plus Calidad Forestal SL
Gonzalo Caballé
Saúl Gutierrez García
Mario Azaña Galán
Laura Gómez Pérez
Fundación Cesefor

Oskia Saldise, Javier Saldeise
Tabsal SCL SL
Izaskun Garrido Fuertes
Grupo Garnica Plywood SA

5. INFLUENCIA DEL CLON Y DE LA ALTURA EN EL ÁRBOL EN LAS PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DEL PRODUCTO FINAL

Introducción

La madera tiene unas propiedades tecnológicas muy variables que dependen de la genética, y de las condiciones de crecimiento tanto ambientales como selvícolas. En España el chopo es una especie de madera muy importante utilizada para la producción de tablero contrachapado y productos tecnológicos de madera como el LSL (Laminated Strand Lumber). Actualmente las plantaciones productivas se realizan con diferentes clones, siendo los más abundantes los clones I-214 (56.2%), Beaupré (13.5%), Raspalje (10.1%) Unal (8.8%) y MC (5.7%).

La madera de chopo es una madera de poro difuso, que muestra un mismo tamaño y proporción de fibras y vasos a lo largo del anillo durante todo periodo vegetativo. Estudios previos han demostrado que sus propiedades anatómicas y tecnológicas apenas varían a lo largo de los años y aunque pueda haber una ligera variación los primeros dos, tres años, pasa a tener propiedades y características relativamente estables a partir del año 5. Sin embargo, diversos estudios reflejan una influencia significativa del clon en las propiedades de la madera y resaltan la importancia

de considerar el clon de cara a asegurar su adecuación según las exigencias de la industria. En cuanto al efecto del sitio, los resultados son diversos y en algunos casos se ha observado una anatomía e incluso densidad de madera similar del mismo clon en sitios distintos (Zhao et al, Fig. 1) aunque existen ciertos patrones ligados sobre todo a la duración del periodo vegetativo y disponibilidad de agua.

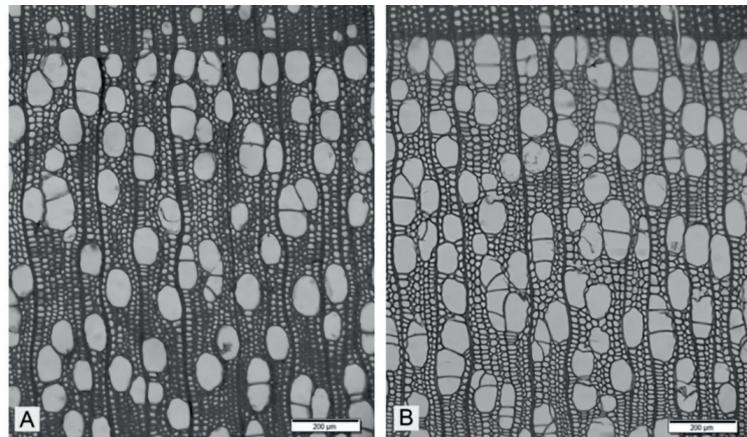


Figura 1. Imágenes de la sección transversal del cuarto anillo de crecimiento del clon *Populus x euroamericana* cv. 74/76 creciendo en dos sitios diferentes A y B (Fuente: Zhao et al. 2014).

Las propiedades tecnológicas de la madera tienen un impacto en el procesado, rendimiento y calidad final del producto. Las propiedades físicas y mecánicas como el módulo de elasticidad, módulo de ruptura y densidad son esenciales para optimizar la rigidez y el comportamiento mecánico del producto final y su idoneidad para su uso en diferentes aplicaciones.

La calidad de la madera se puede evaluar en la cadena de suministro. El uso de técnicas no destructivas (NDT) en las últimas décadas (Ross 2002; Schimleck et al, 2002), la técnica acústica se convierte en el método más factible y práctico (Chauhan y Walker 2006). Estas técnicas han evolucionado desde la aplicación para la evaluación del producto y el control de calidad hasta la evaluación de troncos. Entre los parámetros que se pueden medir por este método se encuentra el módulo de elasticidad dinámico (MOEdyn), donde MOE es el criterio más importante para evaluar las propiedades de la madera, especialmente para aplicaciones estructurales.

Estas propiedades varían según el clon, la edad de la plantación, la calidad del sitio, la densidad de la plantación e incluso entre árboles (Gallego et al, 2021, Rescalvo et al., 2020, Zobel y Buijtenen 1989; Zhang et al., 2002, Jiang et al., 2007)). La variación de las propiedades de la madera a lo largo del fuste, apenas ha sido estudiada en el chopo, aunque sí se conoce la importancia de la edad cambial en el proceso de formación de la madera siendo el ángulo de la microfibrilla y la longitud de la fibra las que se ven más influenciadas. En otras especies como el eucalipto estudios recientes muestran una variación significativa en densidad y módulo de elasticidad a distintas alturas dentro del árbol (Balasso et al 2021).

En el marco del GO BIOPOPTECH, estudiamos la variación en propiedades tecnológicas de la madera en función del clon y de la altura del fuste y su repercusión en la calidad del producto final. Este estudio se ha llevado a cabo

utilizando tecnologías no destructivas para caracterizar tanto la chapa como la madera en rollo obtenida de las plantaciones productivas evaluadas en pie y cuyos resultados ya han sido comentados en capítulos anteriores.

Se ha realizado el seguimiento en la cadena de procesado de diferentes lotes representativos de madera en rollo extraídas de parcelas clonales productivas guardando su trazabilidad respecto de la altura de la troza en el árbol y realizando posteriormente el análisis de la calidad final de la chapa, del tablero contrachapado y del laminated strand lumber (LSL) de los mismos lotes de trozas.

Metodología

El estudio se realizó con madera de 10 parcelas productivas de diferentes clones localizadas a en las cuencas del Duero y del Ebro (Fig. 2).

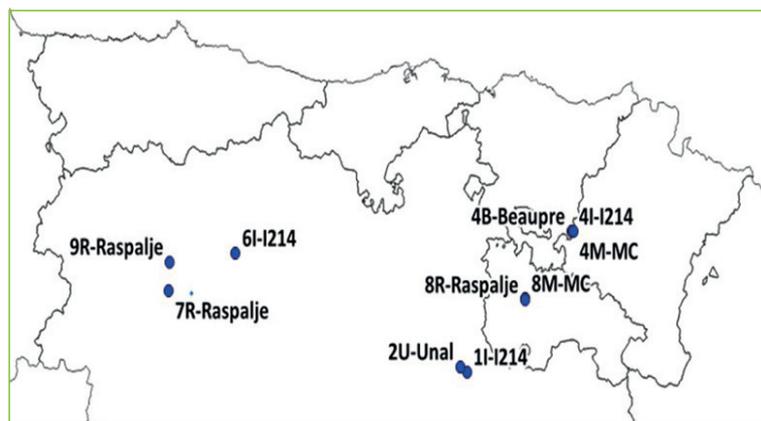


Figura 2. Mapa de distribución de las parcelas del estudio.

Las parcelas de donde proviene la madera tenían una edad entre los 14 y 19 años, una altura comercial similar y un diámetro entre 32 y 49 cm y estaban localizadas en un gradiente altitudinal entre 534 y 959 m según se expone en la tabla 2 donde se muestran también otras variables descriptivas de las masas.

Tabla 1. Variables descriptivas de las parcelas de donde se extrajo la madera del estudio. N: densidad (pies/ha), G: área basimétrica (m²/ha), Db: diámetro en la base (cm), Gg: diámetro normal (cm), Hcom: altura comercial (m).

Parcela	Clon	Altitud	N	G	Db	Dg	Hcom	Edad
1_I	I-214	959	353	25,8	33,4	30,5	14,0	16
2_U	Unal	943	283	18,8	33,3	29,1	14,0	16
4_B	Beaupre	543	388	39,8	38,6	36,2	17,0	19
4_I	I-214	541	365	59,9	49,7	45,8	16,0	19
4_M	MC	543	363	45,8	43,4	40,1	17,0	19
6_I	I-214	829	368	35,6	39,2	35,1	15,0	14
7_R	Raspalje	781	300	36,4	43,1	39,3	16,0	15
8_M	MC	534	368	27,2	32,9	30,7	16,0	15
8_R	Raspalje	538	358	35,6	39,7	35,6	16,0	18
9_R	Raspalje	831	401	35,3	37,0	33,5	15,0	16

1. Caracterización no destructiva de calidad tecnológica de la madera

Se ha realizado la caracterización de 1638 trozas procedentes de las parcelas productivas previamente caracterizados en pie, resultados presentados en capítulos anteriores. Durante las actividades de aprovechamiento, se han diferenciado y mantenido

separadas las trozas según su altura en el fuste (primeras, segundas, terceras y tronquillo). Las trozas se trasladaron identificadas por altura a la planta de Baños de Río Tobia del socio Garnica para la fabricación de tablero contrachapado. El tronquillo, parte superior del fuste con menos de 22 cm de diámetro, se trasladó a la planta del socio Tabsal para la fabricación de LSL (Fig. 3).



Figura 3. Esquema de seguimiento y caracterización de la madera en rollo al producto.

Se han evaluado una muestra de entre 30 y 50 trozas por cada altura dentro de cada parcela productiva de un clon concreto. La longitud de las trozas variaba de 5,15-5,30m en las primeras trozas, de 3.95 a 5,30m en las segundas trozas, de 2,60m a 5,30 las terceras troza y el tronquillo de 2.20m a 2.35m.

Sobre cada troza se ha estimado el Módulo dinámico utilizando un equipo sónico de resonancia Hitman HM200 (FiberGen, NZ) y se han extraído cores a 5 cm de las testas con ayuda de un taladro sobre el que se acopla la barrena de presler que fueron evaluados en laboratorio para estimar la densidad en verde, la densidad básica, y la humedad. Los diámetros de las testas y longitudes se han medido con cinta métrica, con precisión de 5mm (Imágenes 2,3, 4 y 5).

Tabla 2. Número de muestras por parcela productiva

Parcela	Nº trozas evaluadas con sónicos HM200	Nº de muestras de madera extraídas
4_B	130	15
4_I	178	20
4_M	154	20
6_I	113	20
7_R	163	20
8_M	156	20
8_R	141	22
9_R	145	20
10_B	146	15
1_I	179	18
2_U	130	17
Total	1638	207



Imagen 2. Medición por método de resonancia de la velocidad de propagación de onda acústica en trozas. Equipo Hitman HM200, FiberGen, NZ.



Imagen 3. Medición de diámetro de las testas de cada troza con cinta métrica.



Imagen 4. Medición por método de resonancia de la velocidad de propagación de onda acústica en tronquillo, porción superior del fuste. Equipo Hitman HM200, FiberGen, NZ.



Imagen 5. Obtención de cores en cada troza con barrena de pressler para estimación de densidad de la madera.

2. Control de la influencia de humedad en la toma de datos de velocidad en troza

Al igual que para los árboles en pie y de cara a evaluar la influencia de la humedad en las mediciones de las trozas y desarrollar un modelo para corregirla, se han llevado a cabo 6 medidas de velocidad y humedad sobre un lote de 41 trozas de chopo que han permanecido durante sucesivas semanas en el parque de la fábrica de Garnica de Valencia de Don Juan (Fig. 4).

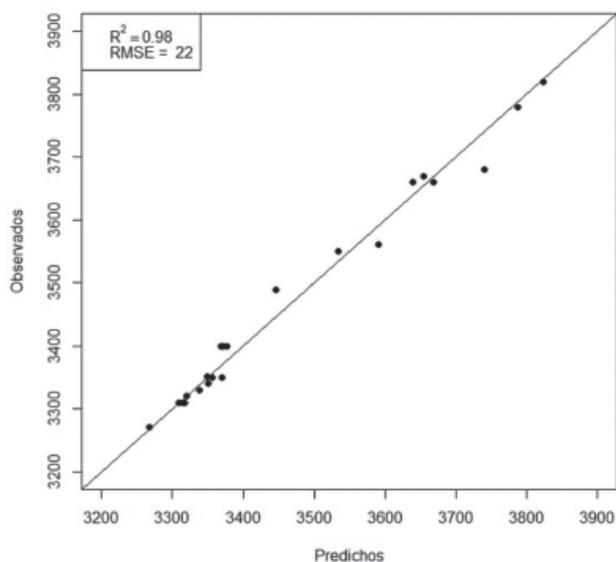


Figura 4. Observados Vs Predichos del modelo de troza con humedad superior al 80%.

3. Obtención de productos de cada troza y clon y caracterización de propiedades tecnológicas

En el parque de madera de Garnica, las trozas se mantuvieron separadas según parcela productiva de origen, clon y posición dentro del tronco, primera, segunda y tercera. De esta manera, al realizar el desenrollo se pudieron separar y obtener chapas de las diferentes partes del tronco (Imagen 6).

Para todas las parcelas, clones y trozas se han fabricado 8 tableros

contrachapados de 1220 x 1220 mm y 20 mm de espesor y se ha enviado una muestra de las chapas al socio Madera Plus para su caracterización con métodos no destructivos (Imagen 7).



Imagen 6. Proceso de obtención de chapa mediante desenrollo de las trozas en las instalaciones de Garnica



Imagen 7. Detalle de medición con ultrasonidos sobre una muestra de la chapa utilizada para realizar el tablero procedente del mismo grupo de trozas por altura y parcela.

Los tableros se enviaron al laboratorio del socio Cesefor para su caracterización siguiendo la norma UNE-EN 789:2006. Para cada combinación clon-troza, se obtuvo en la chapa el módulo de elasticidad dinámico obtenido tras la medición con ultrasonido y en los tableros se realizaron ensayos de flexión para

obtener el módulo de elasticidad local en flexión longitudinal a la fibra (MOE_L), el módulo de elasticidad local en flexión transversal a la fibra (MOE_T), el módulo de rotura longitudinal y transversal (MOR_L y MOR_T), la resistencia a compresión longitudinal y transversal (Fc_L y Fc_T) y la resistencia a tracción longitudinal (Ft).

El tronquillo, material que se astilla para fabricar el LSL, se obtiene de trozas con un diámetro inferior a 22 cm, diámetro mínimo con el que se puede realizar el desarrollo del chopo en la fabricación de tableros contrachapados. Realizadas las tareas de aprovechamiento, el tronquillo fue enviado a Tabsal. Se mantuvo debidamente identificado en función de su parcela de origen y clon. En total, se fabricaron 80 probetas (1000x100x40 mm), 8 por clon y parcela que se mantuvieron individualizadas con pintura de color asegurando su trazabilidad monte industria (Imagen 8).

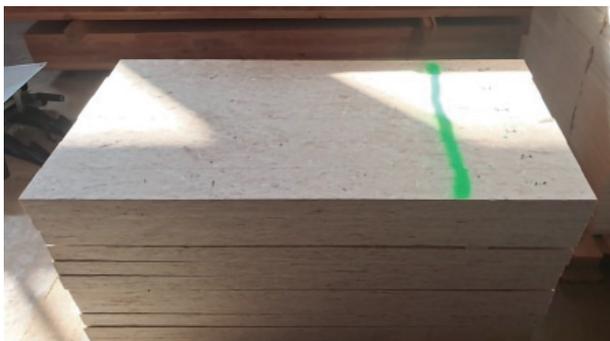


Imagen 8. Detalle de producto de LSL fabricado por Tabsal

Las probetas se enviaron al laboratorio de Cesefor, donde se realizaron los ensayos de caracterización físico-mecánica. Siguiendo la norma UNE-EN 408:2003 se obtuvo el módulo de elasticidad (MOE) y resistencia a flexión (MOR). La densidad se evaluó según norma UNE-EN 408:2004 para conocer el valor medio de toda la muestra.

4. Procesado de datos y análisis estadístico

Una vez preparada la base de datos, se examinaron las correlaciones entre los módulos de elasticidad a diferentes niveles (tronco, chapa y producto). Se compararon los valores promedio de las tres alturas de troncos y chapas así como con el promedio general por cada clon. Adicionalmente, se examinaron los cambios en las propiedades tecnológicas a lo largo del fuste y entre clones mediante análisis ANOVA. Una vez obtenidos los resultados, se han enfrentado los datos de MOE estático tras los ensayos a flexión en laboratorio y las evaluaciones de MOE dinámico realizadas con los equipos sónicos en troza y chapa por parcela y altura de troza, dentro de cada clon. Como resultados se presentan modelos de ajuste que permiten estimar el MOE estático del tablero contrachapado a partir de las mediciones desde troza o chapa que podrían ser de interés para promover un suministro más eficiente a lo largo de toda la cadena de producción. La evaluación del desempeño del modelo se basó en dos índices estadísticos: el error cuadrático medio (RMSE), que analiza la precisión de las estimaciones; y el coeficiente de determinación ajustado (R^2), que refleja la parte de la varianza total que es explicada por el modelo.

Se evaluaron cuatro requisitos previos que debe cumplir un modelo de regresión lineal: ausencia de multicolinealidad entre variables, homocedasticidad de los residuos, normalidad de los residuos y ausencia de autocorrelación de los residuos. La multicolinealidad se evaluó utilizando el factor de inflación de la varianza (VIF), que debe ser menor a 5

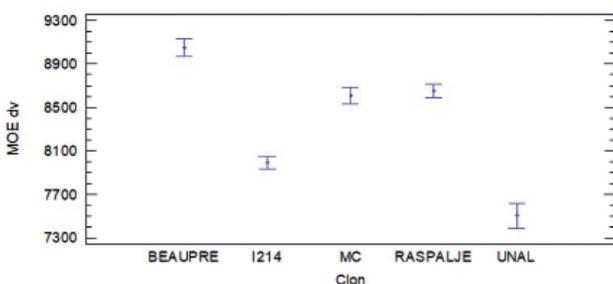
para todas las variables independientes. Respecto al análisis residual, se emplearon las pruebas de Breusch-Pagan, Shapiro-Wilk y Durbin-Watson para comprobar la homocedasticidad, la normalidad y la ausencia de autocorrelación, respectivamente. Finalmente, se mostraron gráficos observados vs. predichos para mostrar el rendimiento del modelo.

Resultados

1. Efecto del clon en las variables medidas en trozas

Se encontraron diferencias significativas entre clones en todas las variables analizadas en las trozas. En módulo de elasticidad dinámico (MOE din, Fig. 5) destaca el clon Beaupre, seguido de MC y Raspalje, mostrando los valores más bajos I-214 e Unal.

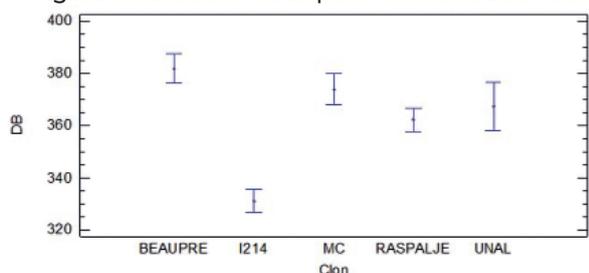
Figura 5. Resultados del test de medias por mínimos cuadrados del módulo de elasticidad



dinámico (MOE din) medido en trozas.

En relación a la densidad básica (DB, Fig. 6), los clones Beaupre y MC, presentaron valores superiores al clon Raspalje y Unla, siendo el clon I-214 el que mostró el menor valor.

Figura 6. Test de medias por mínimos cuadrados



de la densidad básica (DB) de las trozas por clon.

Sin embargo, en densidad en verde (Dv, Fig. 7) aunque el clon I-214 sigue teniendo la densidad más baja, el clon más pesado en el suministro a fábrica es Unal, seguido de MC y Raspalje por encima de Beaupre.

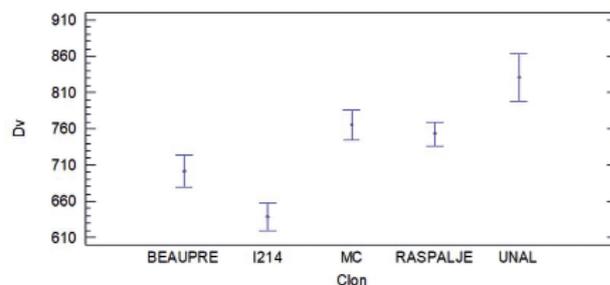


Figura 7. Test de medias por mínimos cuadrados de densidad en verde (Dv) en trozas de diferentes clones.

En el caso de la conicidad (Fig. 8), el clon MC es significativamente el más cilíndrico con un nivel de conicidad por debajo de 1cm por metro. Los clones Beaupre, y Raspalje tienen conicidades similares cercanas a 1,2cm por metro y algo superiores, aunque no significativamente, al clon I-214. En este caso, el clon Unal, fue el de mayor conicidad.

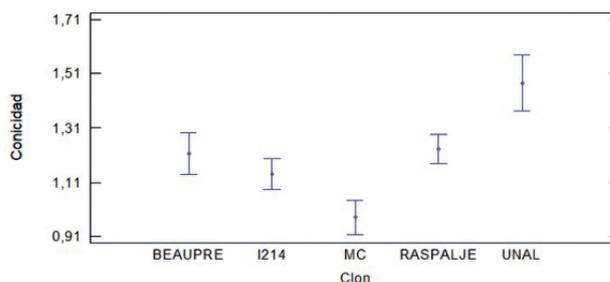


Figura 8. Resultados del test de medias por mínimos cuadrados de la conicidad de trozas por clon.

La influencia del clon es significativa como puede apreciarse en los gráficos. Los valores de todas las trozas de las diferentes parcelas han sido analizados en función del clon mediante un análisis de varianza. En la Tabla 3 se muestran las medias por clon y los errores estándar de las diferentes variables evaluadas en las trozas.

Tabla 3. Valores medios y errores estandar de las variables evaluadas en las trozas por clon.

Clon	N	MOEdin. N/mm2		Densidad básica Kg/m3		Densidad verde Kg/m3		Conicidad cm/m	
		Media	Error estandar	Media	Error estandar	Media	Error estandar	Media	Error estandar
BEAUPRE	266	9049,0	59,0	381,9	4,2	701,5	15,6	1,2	0,05
I214	451	7992,5	45,3	331,1	3,2	638,9	13,8	1,1	0,04
MC	301	8614,2	55,5	374,0	4,2	764,9	14,6	0,9	0,04
RASPALJE	408	8655,4	47,6	362,2	3,1	753,4	11,7	1,2	0,03
UNAL	130	7505,2	84,4	367,3	6,6	830,8	23,1	1,4	0,07

2. Efecto de la altura en el árbol en las variables medidas en trozas

Se ha encontrado una influencia significativa de la altura de la troza en el árbol en las propiedades tecnológicas de la madera, con un patrón que se mantiene independientemente del clon. Se presentan los resultados del Test de medias por mínimos cuadrados en la Tabla 4.

La representación gráfica de los resultados del ANOVA en este caso, muestra que la troza basal tiene un módulo de elasticidad dinámico (MOEdin) significativamente menor que el resto, y dicho valor va aumentando según se sube en la altura en el fuste y con una tendencia a descender en la última parte definida como tronquillo (Fig. 9).

Respecto a la densidad básica, se observa que las dos primeras trozas (aproximadamente los 10 primeros metros) tienen valores semejantes subiendo significativamente en la tercera troza y aún más en el tronquillo (Fig. 10).

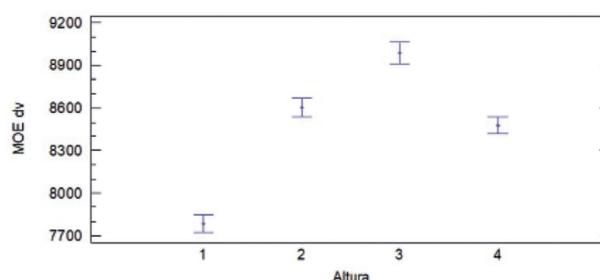


Figura 9. Test de medias por mínimos cuadrados de módulo de elasticidad dinámico (MOE din) en trozas de diferentes alturas, 1: troza basal (0,3 a 5,50m), 2: segunda troza (5,50 a 10,50m), 3: tercera troza (10,50 a 15,50m), 4: Tronquillo, porción superior del fuste con diámetro inferior a 22 cm.

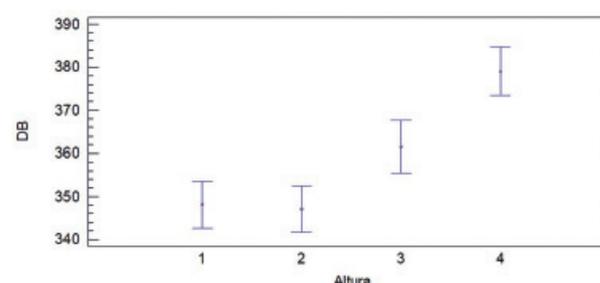


Figura 10. Test de medias por mínimos cuadrados de densidad básica (DB) de las trozas a diferentes alturas, independientemente del clon.

Tabla 4. Valores medios y errores estándar, de las variables evaluadas en las trozas por altura.

Altura en el árbol	N	MOEdin. N/mm2		Densidad básica Kg/m3		Densidad verde Kg/m3		Conicidad cm/m	
		Media	Error estandar	Media	Error estandar	Media	Error estandar	Media	Error estandar
Troza 1	422	7784,88	44,0	348,15	3,9	719,35	14,9	1,54	0,03
Troza 2	403	8601,89	46,6	347,05	3,8	700,55	14,5	0,95	0,03
Troza 3	301	8988,23	54,2	361,54	4,3	736,95	16,5	1,05	0,04
Troza4 Tronquillo	427	8476,08	43,6	379,02	3,9	753,76	14,9	1,07	0,03

En cuanto a la densidad verde, no hay diferencias significativas a lo largo del fuste (Fig. 11).

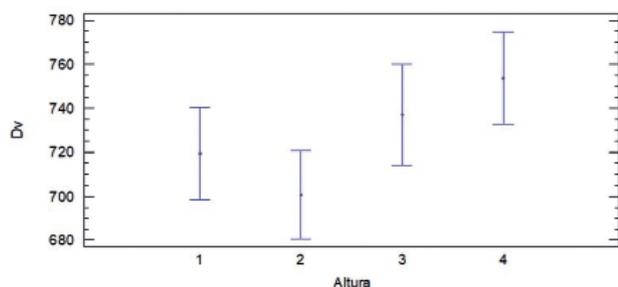


Figura 11. Valores medios de densidad verde (Dv) en trozas de diferentes alturas.

Respecto a la conicidad, la troza basal es la más cónica con mucha diferencia. Se observa que la pieza más cilíndrica en todos los clones es la segunda troza seguida de la 3ª y 4ª troza (Fig. 12).

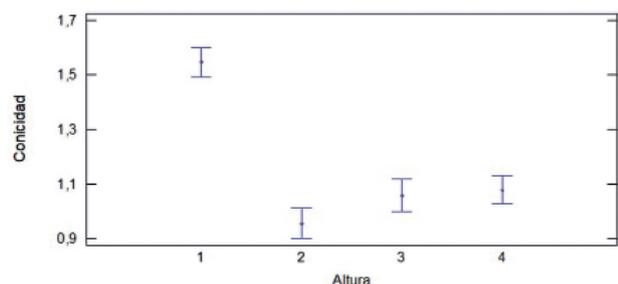


Figura 12. Resultado test de medias por mínimos cuadrados de la conicidad de las trozas a diferentes alturas independientemente del clon.

En la Tabla 5, se presentan los valores medios de módulo de elasticidad dinámico (MOEdin) de las trozas agrupados por clon y altura dentro del árbol.

3. Análisis de la influencia del clon y de la altura en el árbol de la troza en las propiedades tecnológicas de los productos: tablero contrachapado y el LSL

La evaluaciones de los tableros contrachapados muestran diferencias entre los clones. Los resultados indican que tanto el MOE como el MOR son

Tabla 5. Valores medios de módulo de elasticidad dinámico (MOEdin) para cada clon y altura dentro del árbol

Clon-Altura	N	Media N/mm ²	Error Std.	Mín.	Máx.
BEAUPRE 1	71	8005,7	102,0	7805,6	8205,7
BEAUPRE 2	75	9633,9	99,2	9439,3	9828,5
BEAUPRE 3	37	9523,1	141,3	9246,0	9800,2
BEAUPRE 4	83	9201,7	94,3	9016,7	9386,7
I-214 1	118	7444,5	79,1	7289,3	7599,6
I-214 2	109	8306,7	82,3	8145,3	8468,2
I-214 3	109	8118,0	82,3	7956,5	8279,4
I-214 4	115	8138,1	80,1	7980,9	8295,3
MC 1	72	8056,9	101,3	7858,2	8255,5
MC 2	87	8476,2	92,1	8295,5	8656,9
MC 3	58	9185,9	112,9	8964,6	9407,2
MC 4	84	8840,1	93,8	8656,2	9024,0
RASPALJE 1	111	8028,2	81,6	7868,2	8188,2
RASPALJE 2	98	8809,9	86,8	8639,6	8980,1
RASPALJE 3	97	8988,2	54,2	8881,8	9094,6
RASPALJE 4	99	8773,8	86,4	8604,4	8943,2
UNAL 1	50	7389,0	121,1	7150,6	7627,3
UNAL 2	34	7782,5	147,4	7493,5	8071,6
UNAL 4	46	7426,5	126,7	7178,0	7675,0

superiores en los clones Beaupre, Raspalje y MC respecto a los clones I-214 y Unal (Tabla 6).

En cuanto a la influencia de la altura en el árbol, en todos los casos, y especialmente para el MOE, los tableros fabricados con madera proveniente de la segunda y tercera troza presentan valores notablemente superiores (Tabla 7)

Para el producto LSL, los resultados de los ensayos también muestran

diferencias en MOE y MOR entre clones (Tabla 8). El clon Raspalje presentó los mayores valores de MOR (33 N/mm²) y MOE (10774 N/mm²) diferenciándose de manera significativa del clon Unal. Respecto a la densidad del producto apenas hay variación entre clones. La densidad media de toda la muestra fue de 637 kg/m³ sin diferencia entre clones debido a que en el proceso de fabricación del LSL se aplica la misma presión densificando las muestras de similar manera.

Tabla 6. Valores medios de módulo de elasticidad local en flexión longitudinal a la fibra (MOEL), módulo de elasticidad local en flexión transversal a la fibra (MOET), módulo de rotura longitudinal y transversal (MORL y MORT), resistencia a compresión longitudinal y transversal (Fc_L y Fc_T) y resistencia a tracción longitudinal (Ft) de tableros contrachapados fabricados con diferentes clones. Letras diferentes representan diferencias significativas.

Clon	MOE _L		MOR _L		MOE _T		MOR _T		Fc _L		Fc _T		Ft	
I-214	5988,6	a	33,1	a	2648,2	a	19,3	a	24,3	a	20,7	ab	18	a
UNAL	6053,3	a	35,6	a	2698,3	a	19,4	a	24,6	ab	19,9	a	18,8	a
RASPALJE	7241,4	b	41,3	b	3135,6	b	22,7	b	24,2	a	20,6	ab	14,7	a
MC	7295,7	b	41,3	b	3220,4	b	24	b	26,6	c	21,7	b	17,5	a
BEAUPRE	7159,9	b	42,9	b	3288,4	b	22,6	b	26,2	bc	21,8	b	19,9	a

Tabla 7. Valores medios por posición de la troza de módulo de elasticidad local en flexión longitudinal a la fibra (MOEL), módulo de elasticidad local en flexión transversal a la fibra (MOET), módulo de rotura longitudinal y transversal (MORL y MORT) y resistencia a compresión longitudinal y transversal (Fc_L y Fc_T). Letras diferentes representan diferencias significativas.

Troza	MOE _L		MOR _L		MOE _T		MOR _T		Fc _L		Fc _T	
1	5568,5	a	34,3	a	2444,9	a	18,6	a	23,6	a	19,8	a
2	7452,3	b	40,9	b	3238,3	a	22,7	b	25,8	b	21,5	b
3	7560,7	b	42,7	b	3464,4	c	24,5	c	26,1	b	22	b

Tabla 8 Valores medios de módulo de elasticidad en flexión (MOE), módulo de rotura (MOR) y densidad de LSL fabricado con diferentes clones. Letras diferentes representan diferencias significativas.

CLON	MOE (N/mm ²)	MOR (kN/mm ²)	Densidad (Kg/m ³)
UNAL	7770,2 a	25,6 a	657,5 a
BEAUPRE	9201,8 ab	27,5 ab	628,5 a
I-214	9849,2 ab	31,4 b	639,9 a
MC	10168,5 b	29,0 ab	628,2 a
RASPALJE	10774,5 b	33,1 b	649,5 a

4. Modelos de predicción del Módulo de elasticidad del tablero contrachapado a partir de las mediciones con métodos no destructivos en troza y chapa

Este apartado se ha realizado analizando la relación entre el valor de MOE dinámico estimado con sónicos sobre las trozas y chapas y el valor de MOE estático calculado sobre el tablero contrachapado realizado con madera

del mismo lote de trozas. Para ello, se calculan previamente los valores medios por parcela para un clon concreto y para cada altura de troza en el árbol. Las mejores correlaciones se obtuvieron con el MOE global obtenido según la norma UNE-EN 789:2006.

La relación observada entre el MOE dinámico de las trozas y chapas y el MOE estático de los productos tras el ensayo a flexión ha sido muy elevada y ha permitido

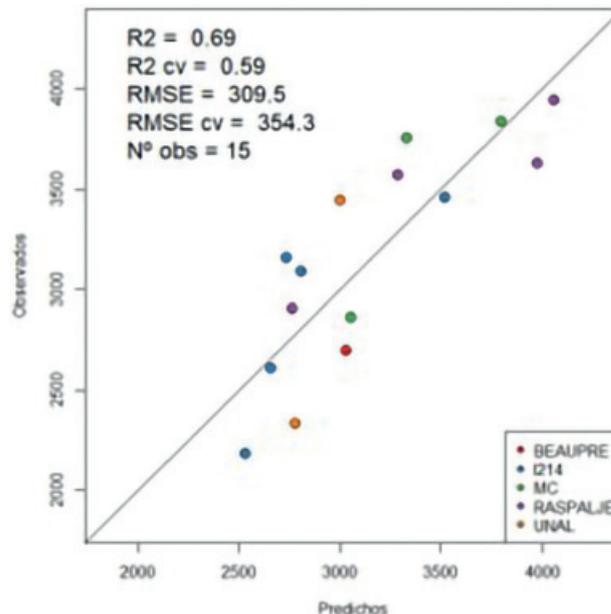
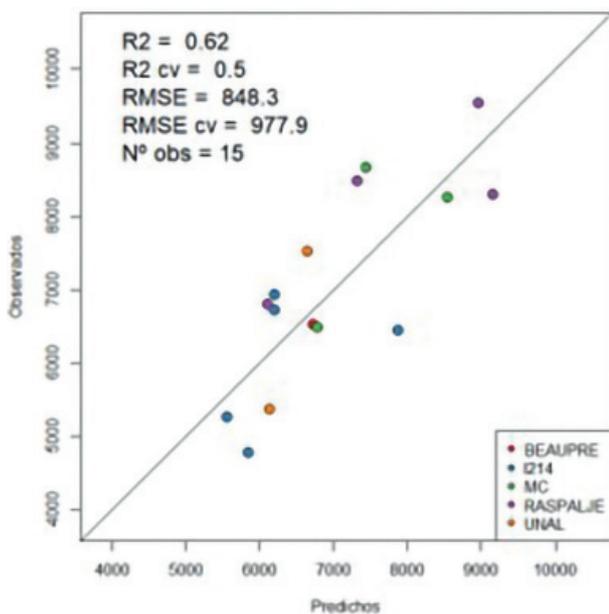


Figura 13 Observados Vs Predichos desde troza del MOEG longitudinal (izda) y transversal (derecha) (Norma UNE-EN 789:2006)

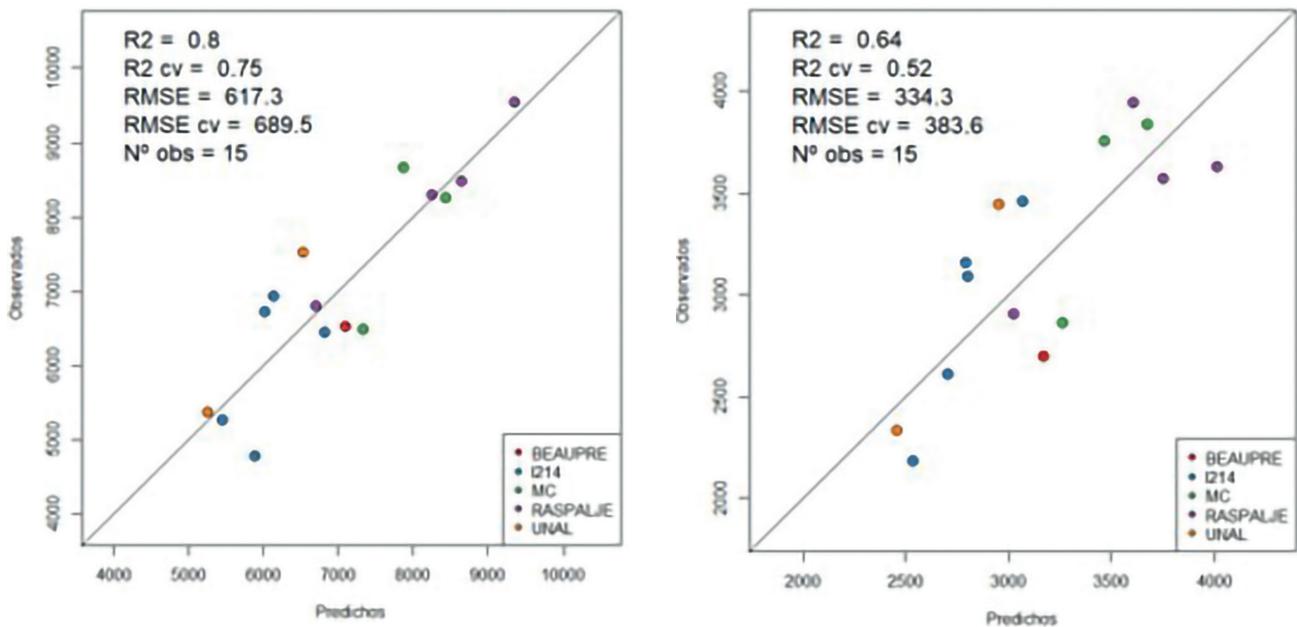


Figura 14. Observados Vs Predichos desde chapa del MOEG longitudinal (izda) y transversal (decha) (Norma UNE-EN 789:2006).

desarrollar modelos predictivos de la calidad final de los productos a partir de mediciones con métodos no destructivos en trozas y chapas. Las gráficas de observados/predichos de las regresiones realizadas para las trozas y las chapas se exponen a continuación (Fig. 13 y 14).

Conclusión

Los resultados han mostrado que el clon influye significativamente en la calidad tecnológica de los productos de madera. Además, se ha observado un aumento de las propiedades tecnológicas de la madera en altura a lo largo del tronco y se han obtenido correlaciones sólidas entre los diferentes niveles de medición (tronco, chapa y producto), lo que destaca el potencial significativo del uso de equipos sónicos para optimizar el abastecimiento de madera.

Con base a estos hallazgos, fue posible desarrollar un modelo de regresión utilizando datos medidos en madera en rollo y en chapa lo que permite una estimación razonablemente precisa del MOE del producto. La posibilidad de una

evaluación no destructiva ofrece una oportunidad para seleccionar madera en rollo y mejorar la calidad tecnológica de los productos finales, según los diferentes requisitos de uso final de una manera muy efectiva.

En base a los resultados obtenidos, se podría evaluar la posibilidad de fabricar tableros contrachapados de chopo con características estructurales haciendo una correcta selección del clon y clasificando las trozas por su posición en el tronco, ampliando la gama de productos.

Comparando la resistencia del contrachapado de *Pinus radiata* (6110 - 8819 N/mm²) y con otros contrachapados de chopo (4865,4 - 8666 N/mm²), se obtuvieron resistencias similares, demostrando la capacidad estructural y competitiva del contrachapado de chopo frente a otros tipos de contrachapados.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a los técnicos del laboratorio de Cesefor: Juan Carlos Rubio, Álvaro Sánchez, Cristian Ribas, Nacho Monforte y Pablo Blanco. Su dedicación, conocimiento y esfuerzo han sido fundamentales para el desarrollo de este capítulo.

Bibliografía

Balasso, M., Hunt, M., Jacobs, A., & O'reilly-Wapstra, J. (2021). Development of non-destructive-testing based selection and grading strategies for plantation eucalyptus nitens sawn boards. *Forests*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/f12030343>

Gallego, A., Ripoll, M. A., Timbolmas, C., Rescalvo, F., Suarez, E., Valverde, I., Rodríguez, M., Navarro, F. B. y Merlo, E. (2021) Modulus of elasticity of I-214 young poplar wood from standing trees to sawn timber: influence of the age and stand density. *Eur. J. Wood Prod.* 79, 1225-1239. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01675-5>

Huda, A. S. M. A., Koubaa, A., Cloutier, A., Hernández, R. E., & Fortin, Y. (2014). Variation of the Physical and Mechanical Properties of Hybrid Poplar Clones. *BioResources*, 9(1). <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.1456-1471>

Jiang, Z. H., Wang, X. Q., Fei, B. H., Ren, H. Q., & Liu, X. E. (2007). Effect of stand and tree attributes on growth and wood quality characteristics from a spacing trial with *Populus xiaohei*. *Annals of Forest Science*, 64(8). <https://doi.org/10.1051/forest:2007063>

Madhoushi, M., & Daneshvar, S. (2016). Predicting the static modulus of elasticity in eastern cottonwood (*Populus deltoides*) using stress wave non-destructive testing in standing trees.

European Journal of Wood and Wood Products, 74(6). <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1043-0>

Papandrea, S. F., Cataldo, M. F., Bernardi, B., Zimbalatti, G., & Proto, A. R. (2022). The Predictive Accuracy of Modulus of Elasticity (MOE) in the Wood of Standing Trees and Logs. *Forests*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/f13081273>

Rescalvo FJ, Ripoll MA, Gallego A, Abarkane C, Rodríguez M, Merlo E. (2020). Propiedades mecánicas de la madera de chopo. ISBN: 978-84-09-21107-4. Grupo IDIE-Universidad de Granada.

Wang, X. (2013). Acoustic measurements on trees and logs: A review and analysis. In *Wood Science and Technology* (Vol. 47, Issue 5). <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0552-9>

Yu, Q., Zhang, S. Y., Pliura, A., MacKay, J., Bousquet, J., & Périnet, P. (2008). Variation in mechanical properties of selected young poplar hybrid crosses. *Forest Science*, 54(3). <https://doi.org/10.1093/forestscience/54.3.255>

Zhang, S. Y., Chauret, G., Ren, H. Q., & Desjardins, R. (2002). Impact of initial spacing on plantation black spruce lumber grade yield, bending properties, and MSR yield. *Wood and Fiber Science*, 34(3).

Zhao Rongjun¹, Yao Chunli², Cheng Xianbao¹, Lu Jianxiong¹, Fei Benhua³ and Wang Yurong. 2014. Anatomical, chemical and mechanical properties of fast-growing *Populus × euramericana* v. '74/76',* *IAWA Journal* 35 (2), 158-169 *IAWA Journal* 35 (2), International Association of Wood Anatomists, DOI 10.1163/22941932-00000057

Zobel BJ, Buijtenen JP (1989) Wood variation-its cause and control. Springer-verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo