

## Physical and mechanical properties of particle board of *Pinus radiata* D. Don and maize residues

### Propiedades físicas y mecánicas de tableros de partículas de *Pinus radiata* D. Don y residuos de maíz

Emilio E. Vergara-Sanhueza<sup>1</sup>; Víctor M. Rosales-Garcés<sup>2</sup>; Rodrigo Vallejos-Urrea<sup>2</sup>; Marcela A. Vidal-Vega<sup>1</sup>; Claudio A. Montero-Nahuelcura<sup>\*1,3</sup>

<sup>1</sup>Universidad del Bío-Bío, Laboratorio de Adhesivos y Materiales Compuestos. Av. Collao 1202. Concepción, Chile.

<sup>2</sup>Universidad del Bío-Bío, Departamento de Ciencias de la Construcción, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño. Avenida Collao 1202. Concepción, Chile.

<sup>3</sup>Universidad del Bío-Bío, Laboratorio Diseño y Tecnología de la Madera. Av. Collao 1202, Concepción, Chile.

\*Corresponding author: [cmontero@ubiobio.cl](mailto:cmontero@ubiobio.cl); tel.: (56-41) 3111508.

#### Abstract

**Introduction:** Particle board production is based on the use of sawmill and remanufacturing residues; however, the availability of this raw material has decreased significantly due to its use as biomass for firewood fuel.

**Objective:** To evaluate the effect of the replacement level of maize (*Zea mays* L.) and *Pinus radiata* D. Don residues on physical and mechanical board properties.

**Materials and methods:** Maize and *P. radiata* residue proportions between 0 % (control) and 30 % maize were evaluated. Urea-formaldehyde adhesive was used in proportions of 7.5 % and 9.5 % for fine and thick particles, respectively; pressing was based on industrial parameters with a thickness of 10 mm and 0.77 g·cm<sup>-3</sup> density. Physical and mechanical properties were determined according to particle board standards.

**Results:** Thickness, density, moisture, modulus of elasticity and modulus of rupture were similar among maize residue proportions and met the industrial requirement. At 2 and 24 h, absorption and swelling met the industrial and regulatory requirement, except for swelling at 2 h when 30 % maize residues was used. The internal bond (IB) met the industrial requirement with all proportions, but from 20 % onwards there was a significant decrease ( $P < 0.05$ ).

**Conclusions:** Maize residue proportions between 0 and 10 % had similar performance. A proportion of up to 20 % maize provided regulatory and industrial compliance, so it has potential for the particle board industry.

**Keywords:** *Zea mays*; radiata pine; agricultural residue; particle board industry; maize residues.

#### Resumen

**Introducción:** La producción de tableros de partículas se sustenta en el uso de residuos de aserraderos y remanufactura; no obstante, la disponibilidad de materia prima se ha reducido debido a su uso como biomasa para combustibles.

**Objetivo:** Evaluar el efecto del nivel de reemplazo de partículas de rastrojo de maíz (*Zea mays* L.) y *Pinus radiata* D. Don sobre las propiedades físicas y mecánicas de tableros.

**Materiales y métodos:** Se evaluaron proporciones de rastrojo de maíz y pino radiata entre 0 % (control) y 30 %. Se empleó adhesivo urea-formaldehído en proporción 7.5 % y 9.5 % para partículas finas y gruesas, respectivamente; el prensado se basó en parámetros industriales con un espesor de 10 mm y 0.77 g·cm<sup>-3</sup> de densidad. Las propiedades físico-mecánicas se determinaron según la normativa de tableros de partículas.

**Resultados:** El espesor, densidad, humedad y los módulos de elasticidad y de ruptura fueron similares entre las proporciones de rastrojo de maíz y cumplieron con el requerimiento industrial. A las 2 y 24 h, la absorción e hinchamiento cumplieron con el requerimiento industrial y normativo, exceptuando el hinchamiento a 2 h cuando se utilizó la proporción 30 %. La tracción perpendicular cumplió el requerimiento industrial con todas las proporciones, pero a partir del 20 % hubo reducción significativa ( $P < 0.05$ ).

**Conclusiones:** Las proporciones de rastrojo maíz entre 0 y 10 % tuvieron desempeño similar. Una proporción de hasta 20 % de maíz aseguró el cumplimiento normativo e industrial, por lo que esta tiene potencial para la industria de tableros de partículas.

**Palabras clave:** *Zea mays*; pino radiata; residuo agrícola; industria de tableros; rastrojo de maíz.

## Introduction

The particle board production in Chile has been mainly based on the use of wood residues from sawmills and remanufacturing; however, the availability of this raw material has decreased significantly, due to its use as biomass for boilers and fuel pellet production. Therefore, it is necessary to evaluate other sources of raw material to supply the domestic demand for particleboard (Gysling & Soto, 2018; Instituto Forestal [INFOR], 2014, 2019a). An alternative is the use of agricultural residues, which are widely available in central Chile, particularly maize (*Zea mays* L.). Between 2014 and 2016, only in the Bío-Bío Region, the availability of maize residues varied between 670 000 and 911 000 t without including corncobs (Ruiz, Wolff, & Claret, 2017). This represents an opportunity to recover the lignocellulosic material present in crop residues derived from the agroindustrial sector. These figures show the potential of maize residues as raw material for the production of PB (particle board) and MDP (medium density particleboard), which totaled 544 000 m<sup>3</sup>, equivalent to 380 000 t of finished product in 2019 (INFOR, 2019b). The availability of maize residues exceeds the amount of particle board produced, so there is evidence that this lignocellulosic residue can supply, even if only partially, the particleboard industry. In general, these raw materials tend to be lower cost and have desirable attributes for consumers as they are evaluated as sustainable products that reduce environmental impact, which represents an opportunity for both the agricultural and particleboard industries (Balboa & Somonte, 2014; Chávez & Rodríguez, 2016).

Several studies have evaluated the physical and mechanical properties in particle board from agricultural residues for non-structural construction use (Akgül, Güler, & Çöpür, 2010; Amenaghawon, Osayuki-Aguebor, & Okieimen, 2016; Garay, MacDonald, Acevedo, Calderón, & Araya, 2009; Güler, Sahin, & Yeniay, 2016; Scatolino, Silva, Mendes, & Mendes, 2013); the results vary according to the particle size and the proportion of residues used. This evidences the growing need to evaluate alternative sources of raw material for the PB industry; however, it is required to consider the characteristics of these and the process variables, to know their effect on the physical and mechanical properties of the board.

To promote the use of *P. radiata* PB combined with maize residues, it is necessary to comply certain quality requirements for these products. Therefore, the objective of this research was to evaluate the effect of the replacement level of maize and *P. radiata* residue particles on physical and mechanical properties of the boards. The results of this initiative aim to contribute to the valorization of one of the main agricultural

## Introducción

La producción de tableros de partículas (*particle board*) en Chile se ha basado principalmente en el uso de residuos provenientes de aserraderos y remanufactura; no obstante, la disponibilidad de esta materia prima ha disminuido notoriamente, debido a que se utiliza como biomasa para calderas y fabricación de *pellets* combustibles. Por lo anterior, es necesario evaluar otras fuentes de materia prima para suplir la demanda interna de tableros de partículas (Gysling & Soto, 2018; Instituto Forestal [INFOR], 2014, 2019a). Una alternativa es el uso de residuos del sector agroalimentario que tienen gran disponibilidad en la zona central de Chile, específicamente el maíz (*Zea mays* L.). Entre el 2014 y 2016, tan solo en la Región del Bío-Bío, la disponibilidad de rastrojo de maíz varió entre 670 000 y 911 000 t sin considerar corontas (Ruiz, Wolff, & Claret, 2017). Esto representa una oportunidad de valorización del material lignocelulósico presente en rastrojos, paja y, en general, de todo residuo derivado del sector agroindustrial. Dichas cifras evidencian el potencial del rastrojo de maíz como materia prima para la producción de PB (particle board, por sus siglas en inglés) y MDP (medium density particleboard, por sus siglas en inglés), los cuales sumaron 544 000 m<sup>3</sup>, equivalentes a 380 000 t de producto terminado en el 2019 (INFOR, 2019b). La disponibilidad de rastrojo de maíz supera la cantidad producida de tableros de partículas, por lo que hay evidencia que este residuo lignocelulósico puede abastecer, aunque sea de forma parcial, a la industria de tableros. En general, estas materias primas suelen ser de menor costo y cuentan con atributos deseables para el consumidor al ser evaluados como productos sustentables que reducen el impacto ambiental, lo cual representa una oportunidad tanto para la industria agroalimentaria como para la de tableros (Balboa & Somonte, 2014; Chávez & Rodríguez, 2016).

Diversas investigaciones han evaluado las propiedades físicas y mecánicas en tableros de partículas a partir de residuos agrícolas para uso constructivo no estructural (Akgül, Güler, & Çöpür, 2010; Amenaghawon, Osayuki-Aguebor, & Okieimen, 2016; Garay, MacDonald, Acevedo, Calderón, & Araya, 2009; Güler, Sahin, & Yeniay, 2016; Scatolino, Silva, Mendes, & Mendes, 2013); los resultados varían en función del tamaño de partículas y la proporción de residuos utilizada. Esto evidencia la necesidad creciente de evaluar fuentes alternativas de materia prima para la industria de los PB; sin embargo, se requiere considerar las características de estas y las variables de procesos, para conocer su efecto en las propiedades físicas y mecánicas del tablero.

Para promover el uso de PB a partir de pino radiata combinado con rastrojo de maíz, es necesario que se cumplan con determinados requerimientos industriales y con la normativa para estos productos. En este sentido, el

residues in Chile, which in turn would compensate for the shortage of raw material in the board industry.

## Materials and Methods

### Source of raw material

Maize residues were taken from the Huilquilemu sector in the province of Talca, Maule Region. This area has a warm temperate climate with a dry season lasting four to five months, marked thermal contrasts and abundant frontal precipitation in winter, averaging 750 mm·yr<sup>-1</sup> (Dirección Meteorológica de Chile [DMC], 2001). *Pinus radiata* wood particles were provided by the company MASISA MAPAL plant located in Coronel, province of Concepción; at the time of reception, they had moisture content between 2 % and 4 %, which was determined as specified by the NCh 176/1 standard (Instituto Nacional de Normalización [INN], 2019).

### Raw material preparation

Maize residues were transported to the Adhesives and Composite Materials Laboratory of the Universidad del Bío-Bío, here these residues were placed in a Binder oven at 80 °C until reaching a humidity between 10 and 15 %. The density was determined according to ASTM D2395 (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2017).

The material was ground in a Ming Lee mill and then sieved to the size required by the particleboard industry, based on ASTM C-136 (ASTM, 2001a) and ASTM E-11-01 (ASTM, 2001b). For this purpose, sieves of 6.3, 4.75, 2.36, 1.19, 0.425 and 0.25 mm mesh openings were used. The fractions were grouped into a batch of fine particles (sieves between 0.25 and 2.36 mm) for the production of the board faces and another batch of thick particles (sieves between 2.36 and 6.3 mm) for the center of the boards. Both batches were dried in an oven until they reached a final moisture content between 2 % and 4 % to be pressed.

### Boards production and experimental design

The boards were manufactured at the Dieffenbacher laboratory press of MASISA's MAPAL plant. Batches were formed with the proportions of maize residues glued with urea-formaldehyde adhesive in a laboratory rotary mixer in batches of thick particles (center of the board) and thin particles (faces of the board) for 180 ± 10 seconds. The adhesive ratio was 7.5 % and 9.5 % for the outer and inner layers respectively, with a weight ratio of 50 % per layer and a final thickness of 10 mm. Catalyst was added only in the middle layer and a water repellent (solid paraffin) in both outer layers of the boards.

objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto del nivel de reemplazo de partículas de rastrojo de maíz y de *P. radiata* sobre las propiedades físicas y mecánicas de los tableros. Los resultados de esta iniciativa pretenden aportar a la valorización de uno de los principales residuos agrícolas en Chile, lo que a su vez compensaría la escasez de materia prima en la industria de tableros.

## Materiales y métodos

### Procedencia de la materia prima

El rastrojo del tallo de maíz se obtuvo del sector Huilquilemu, provincia de Talca, Región del Maule. Esta zona presenta clima templado cálido con estación seca de cuatro a cinco meses, contrastes térmicos acentuados y precipitaciones abundantes de origen frontal en invierno que alcanzan 750 mm·año<sup>-1</sup> en promedio (Dirección Meteorológica de Chile [DMC], 2001). Las partículas de madera de pino radiata fueron proporcionadas por la empresa MASISA planta MAPAL ubicada en Coronel, provincia de Concepción; al momento de la recepción presentaron humedad entre 2 % y 4 %, la cual se determinó según lo especificado por la norma NCh 176/1 (Instituto Nacional de Normalización [INN], 2019).

### Preparación de la materia prima

El rastrojo de maíz se trasladó al Laboratorio de Adhesivos y Materiales Compuestos de la Universidad del Bío-Bío, donde se acondicionó en estufa marca Binder a 80 °C hasta alcanzar humedad entre 10 y 15 %. La densidad se determinó según la norma ASTM D2395 (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2017).

El material se trituró en un molino marca Ming Lee y después se cribó al tamaño utilizado por la industria de tableros de partículas, con base en las normas ASTM C-136 (ASTM, 2001a) y ASTM E-11-01 (ASTM, 2001b). Para ello, se usaron mallas de 6.3, 4.75, 2.36, 1.19, 0.425 y 0.25 mm de abertura. Las fracciones se agruparon en un lote de partículas finas (tamizadas entre 0.25 y 2.36 mm) para la elaboración de las caras del tablero y otro lote de partículas gruesas (tamizadas entre 2.36 y 6.3 mm), para el centro de los tableros. Ambos lotes se acondicionaron en estufa hasta alcanzar humedad final entre 2 % y 4 % para ser prensados.

### Elaboración de tableros y diseño experimental

Los tableros se fabricaron en el laboratorio de la empresa MASISA planta MAPAL. Se formaron lotes con las proporciones de rastrojo de maíz encoladas con adhesivo urea-formaldehído en una mezcladora rotatoria de laboratorio en lotes de partículas gruesas (centro del tablero) y finas (caras del tablero) durante

In a 300×300 mm mold, half of the fine particles were added to the face of the board, coarse particles to the center, and another half of fine particles to the opposite face. Each board was cold pressed and then hot plate pressed (Dieffenbacher brand) for consolidation at 200 °C, maximum specific pressure of 26 kg·cm<sup>-2</sup> and total time of 110 seconds.

The experimental design was completely randomized. The replacement of *P. radiata* wood particles with maize residues was considered in five proportions: 0, 5 %, 10 %, 20 % and 30 %. Four repetitions per proportion were used and the operational variables of the pressing process were kept constant, as well as the grammage of the urea-formaldehyde adhesive.

### Sampling and properties studied

Modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) in bending were evaluated according to EN 310 (European Committee for Standardization [EN], 1993c), and perpendicular tensile strength or internal bond (IB) with EN 319 (EN, 1993b).

The physical properties absorption and swelling were determined according to EN 317 (EN, 1994), board density with EN 323 (EN, 1993) and moisture with EN 322 (EN, 1993d). Samples were extracted as shown in Figure 1 to meet the requirements of the above-mentioned standards.

### Statistical analysis

A descriptive analysis of the results was carried out, determining the measures of central tendency and dispersion. The data were analyzed by ANOVA and Tukey's test ( $P = 0.05$ ) to detect the effect of each level of replacement of *P. radiata* wood particles with maize residues (0, 5 %, 10 %, 20 % and 30 %) on the physical (AB, DEN, swelling and moisture) and mechanical (MOE, MOR and IB) properties. Finally, the results per condition were compared with the standard used by the company. All analyses were carried out with the statistical package Statgraphics Centurion XVI (Statgraphics Centurion, 2013).

## Results and Discussion

### Physical properties of maize residues

Maize residues had a mean density of 104.7 kg·m<sup>-3</sup> with a standard deviation of 9.2 kg·m<sup>-3</sup>, which yielded a coefficient of variation of 8.8 % evidencing low density dispersion. These results were similar to that reported by Tumuluru (2014), who recorded a density of 111 kg·m<sup>-3</sup>. Moreover, it was also corroborated the lower density of maize residues compared to *P. radiata* wood, with values ranging between 367.8 and 385.9 kg·m<sup>-3</sup> for

180 ± 10 segundos. La proporción de adhesivo fue de 7.5 % y 9.5 % para las capas exterior e interior respectivamente, con una proporción en peso de 50 % por capa y un espesor final de 10 mm. Se agregó catalizador solo en la capa central y un hidrofugante (parafina sólida) en ambas capas de los tableros.

En un molde de 300×300 mm se agregó la mitad de las partículas finas en la cara, las partículas gruesas al centro y otra mitad de partículas finas en la cara opuesta. Cada tablero fue prensado en frío y luego en prensa de platos calientes (marca Dieffenbacher) para su consolidación a 200 °C, presión específica máxima de 26 kg·cm<sup>-2</sup> y tiempo total de 110 segundos.

El diseño experimental fue completamente al azar. Se consideró el reemplazo de partículas de madera de pino radiata por partículas de rastrojo de maíz en cinco proporciones: 0, 5 %, 10 %, 20 % y 30 %. Se tuvieron cuatro repeticiones por proporción y se mantuvieron constantes las variables operacionales del proceso de prensado, así como el gramaje del adhesivo de urea-formaldehído.

### Muestreo y propiedades evaluadas

Los módulos de elasticidad (MOE) y de ruptura (MOR) en flexión se evaluaron según la norma EN 310 (European Committee for Standardization [EN], 1993c), y la resistencia a la tracción perpendicular (IB) con la norma EN 319 (EN, 1993b). Las propiedades físicas absorción e hinchamiento se determinaron según la norma EN 317 (EN, 1994), la densidad del tablero con la norma EN 323 (EN, 1993) y la humedad con EN 322 (EN, 1993d). Para dar cumplimiento a lo requerido por las normas mencionadas se extrajeron muestras según lo indicado en la Figura 1.

### Análisis estadístico

Se efectuó un análisis descriptivo de los resultados, determinando las medidas de tendencia central y de dispersión. Los datos se sometieron a un análisis de varianza y prueba de Tukey ( $P = 0.05$ ), para detectar el efecto de cada nivel de reemplazo de partículas de madera de pino radiata por rastrojo de maíz (0, 5 %, 10 %, 20 % y 30 %) sobre las propiedades físicas (AB, DEN, hinchamiento y humedad) y mecánicas (MOE, MOR e IB). Por último, los resultados por condición se compararon con el estándar empleado por la empresa. Todos los análisis se realizaron con el paquete estadístico Statgraphics Centurion XVI (Statgraphics Centurion, 2013).

## Resultados y discusión

### Propiedades físicas del rastrojo de maíz

El rastrojo de maíz tuvo una densidad media de 104.7 kg·m<sup>-3</sup> con una desviación estándar de 9.2 kg·m<sup>-3</sup>, lo cual dio un coeficiente de variación de 8.8 % que evidenció

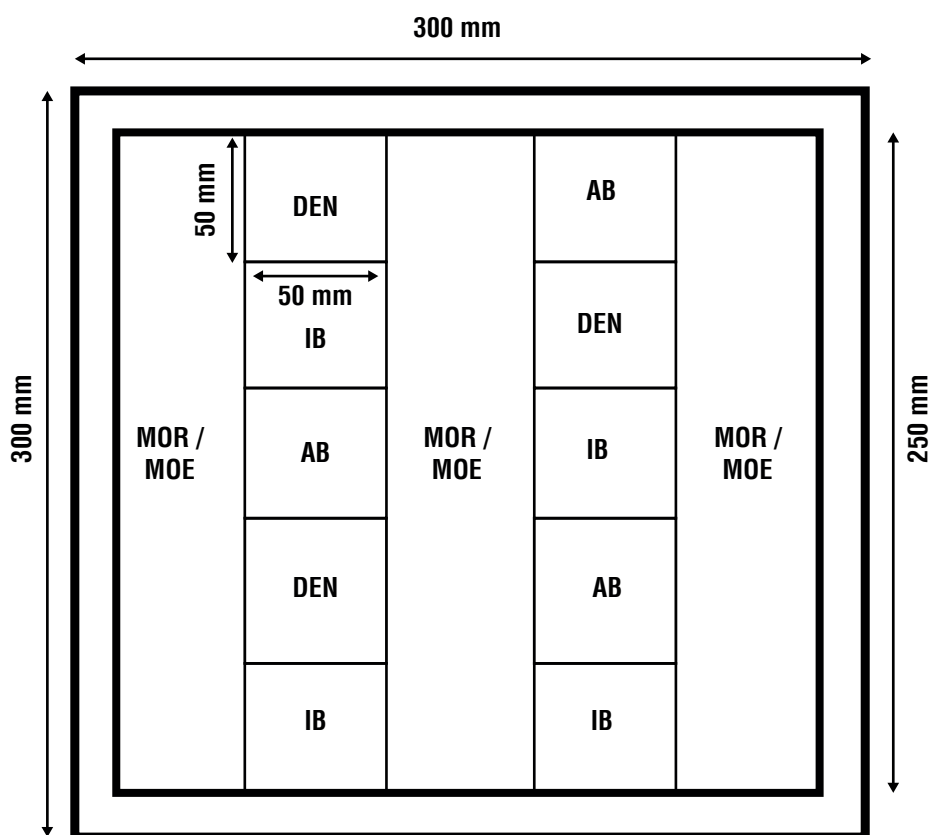


Figure 1. Sampling plan per board: two samples for modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR), four samples for perpendicular tension (IB), three samples for absorption (AB) and swelling and three samples for density (DEN) and moisture.

Figura 1. Plan de muestreo por tablero: dos muestras para módulos de elasticidad (MOE) y de ruptura (MOR), cuatro muestras para tracción perpendicular (IB), tres muestras para absorción (AB) e hinchamiento y tres muestras para densidad (DEN) y humedad.

juvenile wood and between 448.4 and 476.8 kg·m<sup>-3</sup> for mature wood (Barrios, Trincado, & Watt, 2017). Table 1 shows the particle size distribution of fine and thick particles of maize residues and *P. radiata*; both showed a distribution similar to that used in the board industry.

### Physical properties of boards

The results of the physical properties, industrial requirements and tolerances accepted for the boards produced with different replacement levels are detailed in Table 2, while the variation of performance compared to the replacement level can be seen in Figure 2.

### Board thickness

Board thickness (10.11 mm to 10.42 mm) showed no significant differences ( $P > 0.05$ ) between the proportions of maize residues evaluated, with a difference of less than 0.3 mm between each replacement level (Table 2; Figure 2a).

una baja dispersión de la densidad. Estos resultados se asemejan al reportado por Tumuluru (2014), quien registró una densidad de 111 kg·m<sup>-3</sup>. Asimismo, se corroboró la menor densidad del rastrojo de maíz en comparación con la madera de *P. radiata*, cuyo valor fluctúa entre 367.8 y 385.9 kg·m<sup>-3</sup> para madera juvenil y entre 448.4 y 476.8 kg·m<sup>-3</sup> para madera adulta (Barrios, Trincado, & Watt, 2017). El Cuadro 1 muestra la distribución de la granulometría de las partículas finas y gruesas del rastrojo de maíz y de pino radiata; ambas presentaron una distribución similar a la empleada en la industria de tableros.

### Propiedades físicas de los tableros

Los resultados de las propiedades físicas, los requerimientos industriales y tolerancias admitidas para los tableros elaborados con diferentes niveles de reemplazo se detallan en el Cuadro 2, mientras que la variación del comportamiento con respecto al nivel de reemplazo se puede ver en la Figura 2.

**Table 1. Particle size of maize residues and *Pinus radiata* wood for board production.****Cuadro 1. Granulometría en partículas de rastrojo de maíz y madera de *Pinus radiata* para la elaboración de tableros.**

Sieve number / Número de criba (Mesh)	Sieve size / Tamaño de criba (mm)	Maize residues (%) / Rastrojo de maíz (%)		Wood particle (%) / Partícula de madera (%)	
		Thick / Gruesa	Fine / Fina	Thick / Gruesa	Fine / Fina
-	0	0.0	3.8	2.3	2.8
60	0.250	0.4	7.3	2.4	6.9
40	0.425	7.0	50.5	13.8	39.1
16	1.190	38.4	37.1	43.0	45.3
8	2.360	42.2	1.1	29.8	4.9
4	4.750	5.6	0.2	5.1	1.0
¼ in	6.300	6.4	0.0	3.6	0.0

**Table 2. Physical properties of *Pinus radiata* boards made with different proportions of maize residues.****Cuadro 2. Propiedades físicas de tableros de *Pinus radiata* elaborados con diferentes proporciones de rastrojo de maíz.**

Physical properties / Propiedades físicas	Maize residue proportions (%) / Proporción rastrojo maíz (%)					IR / RI	Tolerance / Tolerancia
	0	5	10	20	30		
Board thickness (mm) / Espesor tablero (mm)	10.42 a	10.22 a	10.11 a	10.15 a	10.40 a	n. s.	-
Density (kg·m <sup>-3</sup> ) / Densidad (kg·m <sup>-3</sup> )	752 a	766 a	780 a	779 a	798 a	720	± 20
Moisture (%) / Humedad (%)	6.3 a	6.2 a	6.2 a	6.3 a	6.3 a	8	± 3
Swelling 2 h (%) / Hinchamiento 2 h (%)	5.4 a	4.8 a	5.7 a	6.6 b	8.2 c	<8 %	-
Absorption 2 h (%) / Absorción 2 h (%)	12.4 a	12.4 a	13.1 a	15.6 b	17.6 c	<40 %	-
Swelling 24 h (%) / Hinchamiento 24 h (%)	20.1 a	20.1 a	19.3 a	21.2 a	26.3 b	<50 %	-
Absorption 24 h (%) / Absorción 24 h (%)	44.6 a	45.3 a	41.2 a	45.9 a	58.8 b	n. s.	-

Note: Mean values (n = 4) with equal letters indicate that the physical properties are not significantly different between maize residue proportions evaluated, according to the HSD Tukey test (P-value < 0.05). IR: industrial requirement of the MASISA plant, n. s.: not specified.

Nota: Valores medios (n = 4) con letras iguales indican que las propiedades físicas no difieren significativamente entre las proporciones rastrojo maíz evaluadas, de acuerdo con la prueba HSD Tukey (Valor-P < 0.05). RI: requerimiento industrial de la planta MASISA, n. e.: no especificado.

### Moisture content

The moisture content of the boards (6.2 % to 6.3 %) showed no significant differences ( $P > 0.05$ ) between the proportions evaluated (Table 2; Figure 2B), fulfilling the industrial requirement for conventional particleboard. Garay et al. (2009) mention that the boards should have between 5 % and 7 % moisture content, which indicates that linear expansion and stability are within acceptable limits. Furthermore, the A208.1 (American National Standard Institute [ANSI], 1999) establishes that the moisture content should not exceed 10 %, so this requirement is also met.

### Espesor del tablero

El espesor del tablero (10.11 mm a 10.42 mm) no presentó diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre las proporciones de rastrojo de maíz evaluadas, evidenciando una diferencia menor de 0.3 mm entre cada nivel de reemplazo (Cuadro 2; Figura 2a).

### Contenido de humedad

El contenido de humedad de los tableros (6.2 % y 6.3 %) no mostró diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre las proporciones evaluadas (Cuadro 2; Figura 2B),

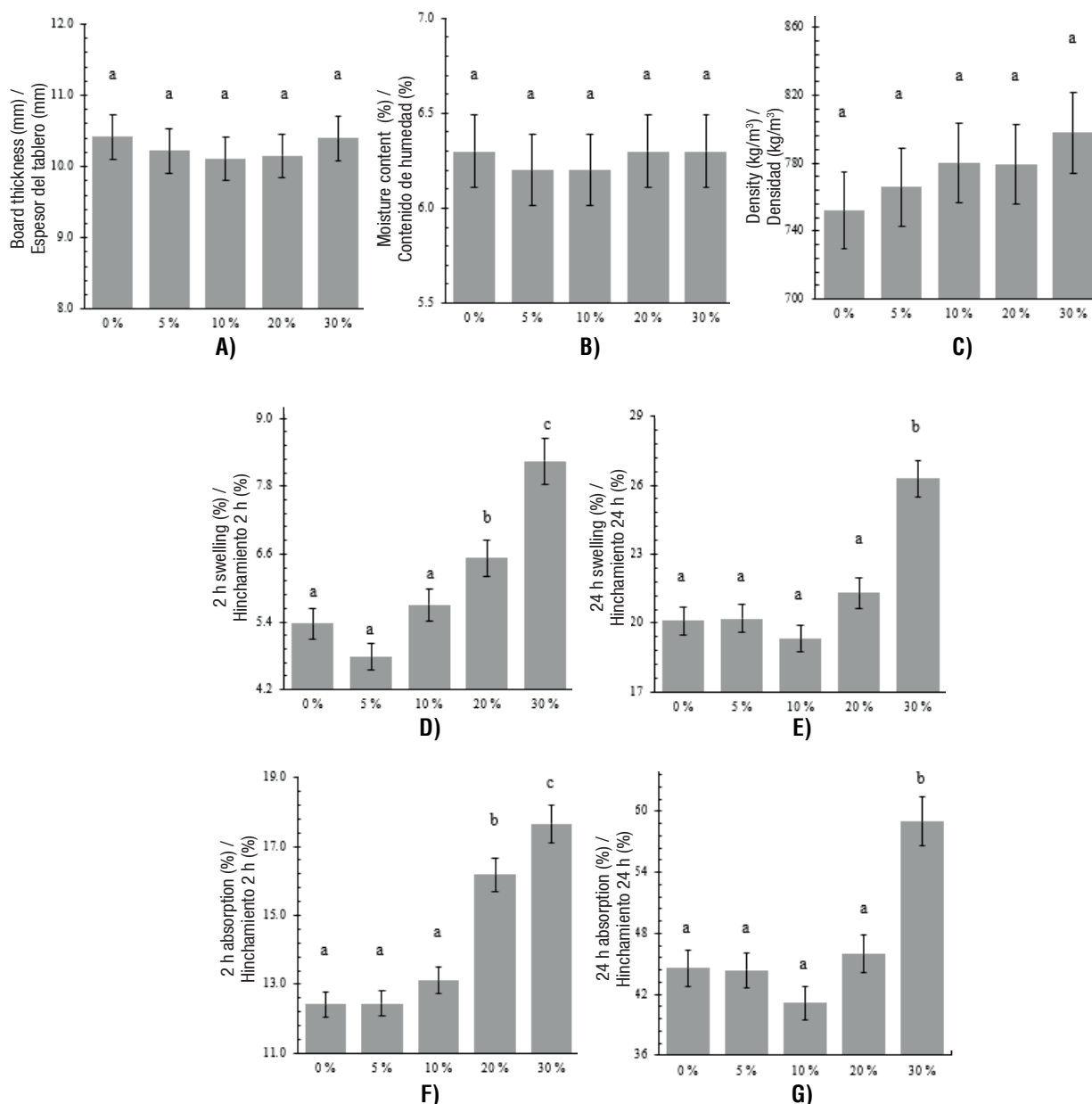


Figure 2. Physical properties of *Pinus radiata* boards made with different proportions of maize residues.

Figura 2. Propiedades físicas de los tableros de *Pinus radiata* elaborados con diferentes proporciones de rastrojo de maíz.

### Density

Density ranged from 752 and 798 kg·m<sup>-3</sup>, increasing non-significantly with the proportion of maize residues (Figure 2C). This increase may be caused because maize residues would decrease the springback phenomenon, which consists of the release of internal stresses after pressing (Mohebbi, Gorbani-Kokandhe, & Soltani, 2009). For Nemli and Demirel (2007), a high release of internal stresses can cause the adhesive to detach from the particles, resulting in weak spots, which would affect the other properties of the board.

Therefore, it was found that the lower density of maize residues would provide greater capacity for irreversible

cumpliendo el requerimiento industrial para tableros de partículas convencionales. En este sentido, Garay et al. (2009) mencionan que los tableros deben tener entre 5 % y 7 % de humedad, lo cual asegura que la expansión y estabilidad lineal estén dentro de los límites aceptables. De igual modo, la norma A208.1 (American National Standard Institute [ANSI], 1999) exige no superar 10 % de contenido de humedad, por lo que también se cumple con este requerimiento.

### Densidad

La densidad varió entre 752 y 798 kg·m<sup>-3</sup>, aumentando de forma no significativa con la proporción de rastrojo de maíz (Figura 2C). Este incremento puede deberse a

compaction. It should be noted that all the proportions exceeded the density required by industrial standards for the production of PB, so that any of them complies with the requirement. This is relevant, considering that there is a high correlation between density and mechanical properties in particleboard (Arabi, Faezipour, & Gholizadeh, 2011; Guler & Büyüksarı, 2011; Mendes et al., 2008). Regarding the restrictions of forest-based raw material, the results confirm that it is possible to achieve densities similar to those of conventional particleboard, using up to 30 % of the weight of maize residue particles.

### Swelling at 2 h and 24 h

Table 2 shows that swelling at 2 h was between 4.8 % and 8.2 % with no significant differences between 0 and 10 % of maize residues, followed by the proportions of 20 % and being higher for 30 %. The latter showed significant differences among themselves and with the rest of the proportions; however, the 30 % proportion failed to meet the industrial requirement (<8 %). Swelling at 24 h was between 19.3 % and 26.3 % with no significant differences between the proportions from 0 to 20 %, while the 30 % proportion was statistically higher; all proportions met the industrial requirement.

Figure 2D and Figure 2E show that, as the proportion of maize residues increases, the swelling at 2 h and 24 h also increases. This behavior was also observed by Garay et al. (2009), who attributed it to a higher hygroscopicity of maize residues, and by Arabi et al. (2011), who attributed it to the increase in the amount of lignocellulosic material needed to increase density. Despite this, the swelling percentages were satisfactory except for the fact that, at 2 h, the 30 % proportion exceeded the industrial requirement.

### Absorption at 2h and 24 h

Absorption at 2 h was similar (12.4 % to 13.1 %) with proportions from 0 to 10 %. The proportions of 20 % (15.6 %) and 30 % (17.6 %) were significantly higher (Table 2). At 24 h, absorption showed no significant difference between the boards with proportions from 0 to 20 %, while the 30 % proportion was significantly higher (58.8 %).

In general, this behavior was also reported by Iswanto, Octaviani, Tarigan, and Nuryawan (2021) for boards with similar proportions of maize residues. Garay et al. (2009) reported that the increase in swelling and absorption may be due to the higher percentage of holocellulose and soluble components in maize residues, which would increase the hygroscopicity of the board, causing a greater dimensional change. In spite of the above, the boards with different

que el rastrojo de maíz disminuiría el fenómeno del *springback*, el cual consiste en la liberación de tensiones internas después del prensado (Mohebbi, Gorbani-Kokandhe, & Soltani, 2009). Para Nemli y Demirel (2007), una liberación elevada de las tensiones internas puede ocasionar que el adhesivo se desprenda de las partículas, dando como resultado puntos débiles, que afectarían al resto de propiedades del tablero.

Por lo anterior, se constata que una menor densidad del rastrojo otorgaría mayor capacidad de compactación irreversible. Cabe señalar que todas las proporciones superaron la densidad requerida por los estándares industriales para la elaboración de PB, por lo que cualquiera de estas cumple con el requerimiento. Lo anterior es relevante, dado que existe una correlación alta entre la densidad y las propiedades mecánicas en tableros de partículas (Arabi, Faezipour, & Gholizadeh, 2011; Guler & Büyüksarı, 2011; Mendes et al., 2008). Si consideramos las restricciones de materia prima de origen forestal, los resultados confirman que es posible alcanzar densidades similares a los tableros de partículas convencionales, empleando hasta 30 % del peso de partículas de rastrojo de maíz.

### Hinchamiento a 2 h y 24 h

El Cuadro 2 indica que el hinchamiento a las 2 h estuvo entre 4.8 % y 8.2 % sin mostrar diferencias significativas entre 0 y 10 % de rastrojo de maíz, seguida de las proporciones de 20 % y siendo mayor para 30 %. Estas últimas presentaron diferencias significativas entre sí y con el resto de las proporciones; sin embargo, la proporción de 30 % no cumplió con el requerimiento industrial (<8 %). El hinchamiento a las 24 h resultó entre 19.3 % y 26.3 % sin mostrar diferencias significativas entre las proporciones de 0 a 20 %, mientras que la proporción del 30 % fue estadísticamente mayor; todas las proporciones cumplieron con el requerimiento industrial.

La Figura 2D y la Figura 2E constatan que, al incrementar la proporción de rastrojo de maíz, el hinchamiento a las 2 h y 24 h también lo hace. Este comportamiento también fue observado por Garay et al. (2009), quienes lo atribuyeron a una mayor higroscopicidad del rastrojo de maíz y por Arabi et al. (2011), quienes lo adjudican al incremento en la cantidad de material lignocelulósico necesario para elevar la densidad. A pesar de esto, los porcentajes de hinchamiento fueron satisfactorios con la salvedad de que, a las 2 h, la proporción del 30 % superó el requerimiento industrial.

### Absorción a 2h y 24 h

La absorción a las 2 h fue similar (12.4 % a 13.1 %) con las proporciones de 0 a 10 %. Las proporciones del 20 % (15.6 %) y 30 % (17.6 %) fueron significativamente



proportions of maize residues were found to be within the requirements of industry standards.

In general, absorption and swelling values were satisfactory and are valid when considering adding solid paraffin in the manufacture of the boards. This is supported by Guler and Büyüksarı (2011), who recommend the addition of solid paraffin or other hydrophobic substance for particleboard made from agricultural residues.

### Mechanical properties of the boards

Figure 3A shows that internal bond (IB) decreased as the level of replacement of maize residues increased, this reduction was not significant in the proportions corresponding to 0 to 10 %. Table 3 reveals that, starting at 20 %, the IB was significantly lower than the previous proportions. This property had values between 0.68 and 1.03 N·mm<sup>-2</sup>, meeting the commercial standard CS-236-66 (US Department of Commerce [DOC], 1966), ANSI 208.1 (ANSI, 1999) and by the MASISA company standard, who require at least 0.42, 0.40 and 0.50 N·mm<sup>-2</sup>, respectively. Therefore, this requirement could be expected to be met even for proportions above

mayores (Cuadro 2). A las 24 h, la absorción no presentó diferencias significativas entre los tableros con proporciones de 0 al 20 %, mientras que la proporción del 30 % fue significativamente mayor (58.8 %).

En general, este comportamiento también fue reportado por Iswanto, Octaviani, Tarigan, y Nuryawan (2021) para tableros con proporciones similares de rastrojo de maíz. En este sentido, Garay et al. (2009) indican que el incremento del hinchamiento y absorción puede deberse al mayor porcentaje de holocelulosa y componentes solubles presentes en el rastrojo de maíz, lo cual aumentaría la higroscopicidad del tablero ocasionando un mayor cambio dimensional. A pesar de lo anterior, los tableros con diferentes proporciones de rastrojo de maíz se encontraron dentro de lo exigido por los estándares industriales.

En general, los valores de absorción e hinchamiento fueron satisfactorios y son válidos cuando se considera añadir parafina en la fabricación de los tableros. Esto se respalda en lo reportado por Guler y Büyüksarı (2011), quienes recomiendan la adición de parafina u otra sustancia hidrofóbica para tableros de partículas elaborados con residuos agrícolas.

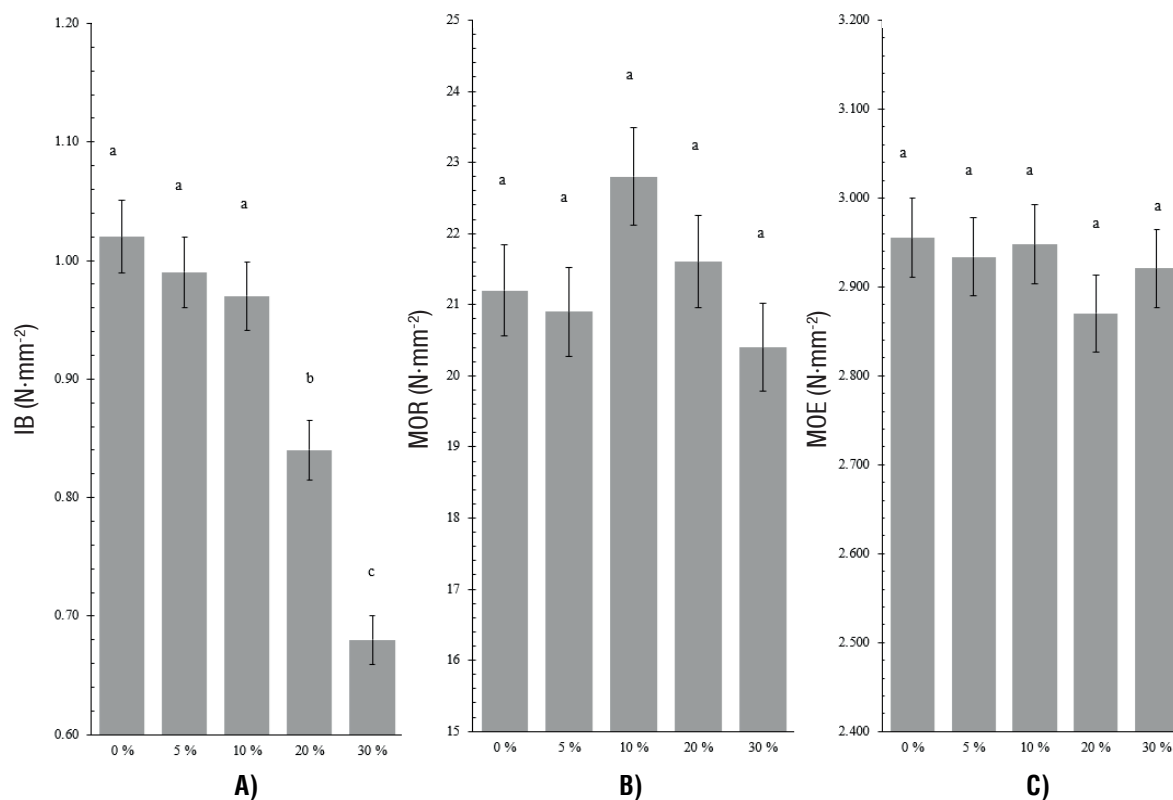


Figure 3. Internal bond (IB), modulus of rupture (MOR) and elasticity (MOE) in *Pinus radiata* boards made with five proportions maize residues.

Figura 3. Comportamiento de la tracción perpendicular (IB), módulo de ruptura (MOR) y elasticidad (MOE) en tableros de *Pinus radiata* elaborados con cinco proporciones de rastrojo de maíz.

**Table 3. Mechanical properties of *Pinus radiata* boards made with different proportions of maize residues.****Cuadro 3. Propiedades mecánicas en tableros de *Pinus radiata* elaborados con diferentes proporciones del rastrojo de maíz.**

Mechanical properties / Ensayos	Maize residues (%) / Rastrojo de maíz (%)					IR / RI	Tolerance / Tolerancia
	0	5	10	20	30		
Internal bond (N·mm <sup>-2</sup> ) / Tracción perpendicular (N·mm <sup>-2</sup> )	1.03 a	0.99 a	0.97 a	0.84 b	0.68 c	0.50	±0.12
Modulus of rupture (N·mm <sup>-2</sup> ) / Módulo de ruptura (N·mm <sup>-2</sup> )	21.20 a	20.90 a	22.80 a	21.6 a	20.50 a	16.0	±1.5
Modulus of elasticity (N·mm <sup>-2</sup> ) / Módulo de elasticidad (N·mm <sup>-2</sup> )	2.956 a	2.93 a	2.94 a	2.87 a	2.92 a	ns	ns

Mean values (n = 4) with equal letters indicate that the mechanical properties show no significant differences between maize residue proportions according to the HSD Tukey test ( $P < 0.05$ ). IR: MASISA plant industrial requirement. ns: not specified.

Valores medios (n = 4) con letras iguales indican que las propiedades mecánicas no muestran diferencias significativas entre proporciones de rastrojo de acuerdo con la prueba HSD Tukey ( $P < 0.05$ ). RI: requisito industrial de la planta MASISA. ne: no especificado.

30 %. The results were higher than those of Garay et al. (2009), who evaluated maize residues/radiata pine ratios of 30/70 and 10/90, resulting in an IB of 0.29 and 0.15 N·mm<sup>-2</sup>, respectively. A significant reduction was observed in the 20 % and 30 % proportions, although both met the industrial requirement. Mendes et al. (2010) reported a decrease in IB when lignocellulosic material of agricultural origin was added. Scatolino et al. (2013) and Güler, Sahin, and Yeniay (2016) reported the same trend in PB with wood particles and maize residues at proportions 0, 25 %, 50 %, 75 % and 100 %. A possible explanation for the reduction of this property with increasing replacement level is related to the lower density of maize residues, which causes lower availability of adhesive per particle. This can reduce mechanical properties and bonding efficiency during board consolidation (Scatolino et al., 2013).

The modulus of rupture ranged from 20.5 N·mm<sup>-2</sup>, corresponding to the 30 % proportion, to 22.8 N·mm<sup>-2</sup> for the 10 % proportion, detecting no significant differences between the proportions (Figure 3B). For the modulus of elasticity, the minimum was 2.872 N·mm<sup>-2</sup> for boards with 20 % proportion and the maximum was 2.956 N·mm<sup>-2</sup> for boards with no maize residues, detecting no significant differences between the proportions evaluated (Figure 3C).

In general, the proportions between 0 and 30 % showed modulus of elasticity and modulus of rupture above the industrial requirement, meeting the stipulations of ANSI 208.1 (ANSI, 1999). This could be due to the dependence of these properties on the particle geometry, so it can be suggested that both raw materials had similar particle size for both faces and the center of the board. In this regard, there was no statistical evidence that the rupture and elasticity modulus were different between the proportions of maize residues.

### Propiedades mecánicas de los tableros

La Figura 3A muestra que la tracción perpendicular (IB) disminuyó al aumentar el nivel de reemplazo de rastrojo de maíz, no siendo significativa esta reducción en las proporciones de 0 a 10 %. El Cuadro 3 indica que, a partir del 20 %, el IB fue significativamente menor que las proporciones anteriores. Esta propiedad tuvo valores entre 0.68 y 1.03 N·mm<sup>-2</sup>, cumpliendo con el estándar comercial CS-236-66 (US Department of Commerce [DOC], 1966), la norma ANSI 208.1 (ANSI, 1999) y por el estándar de la empresa MASISA, quienes requieren al menos 0.42, 0.40 y 0.50 N·mm<sup>-2</sup>, respectivamente. En vista de lo anterior podría esperarse cumplir con este requerimiento incluso para proporciones sobre el 30 %. Los resultados fueron mayores que los de Garay et al. (2009), quienes evaluaron proporciones de rastrojo de maíz/pino radiata de 30/70 y 10/90, obteniendo un IB de 0.29 y 0.15 N·mm<sup>-2</sup>, respectivamente. Se observó una reducción significativa en las proporciones de 20 % y 30 %, aunque ambas cumplieron con el requerimiento industrial. Al respecto, Mendes et al. (2010) reportaron disminución del IB cuando se adiciona material lignocelulósico de origen agrícola. Scatolino et al. (2013) y Güler, Sahin, y Yeniay (2016) reportaron la misma tendencia en PB con partículas de madera y maíz en proporciones 0, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %. Una posible explicación de la reducción de esta propiedad al aumentar el nivel de reemplazo se relaciona con la menor densidad del rastrojo de maíz, lo cual ocasiona menor disponibilidad de adhesivo por cada partícula. Lo anterior puede reducir las propiedades mecánicas y la eficacia del encolado durante el consolidado del tablero (Scatolino et al., 2013).

El módulo de ruptura varió de 20.5 N·mm<sup>-2</sup>, correspondiente a la proporción del 30 %, a 22.8 N·mm<sup>-2</sup> para la proporción del 10 %, no detectando diferencias significativas entre las proporciones (Figura 3B). Para el módulo de elasticidad, el mínimo fue de 2.872 N·mm<sup>-2</sup>

The results, although promising, need to go through further validation and testing, adjust process variables similar to industrial operating conditions, and explore aspects such as the particle geometry of the raw material. It is also important to consider the seasonality and homogeneity of maize residue density. Also, adequate transportation, collection, storage and handling inside the plant should be considered. This could require modifications in some stages of the production process, mainly a parallel management of both raw materials, which, if properly controlled, could constitute a competitive advantage for the particleboard industry.

## Conclusions

Thickness, density and moisture were similar proportions from 0 to 30 % maize residues. Swelling at 2 and 24 h met the regulatory and industrial requirements, except for the 30 % proportion. Absorption at 2 and 24 h increased significantly from 20 % maize residues; all proportions met the regulatory requirement. IB decreased significantly from 20 % and the modulus of elasticity and modulus of rupture showed no significant differences between the proportions. Therefore, proportions up to 20 % provide regulatory and industrial compliance. The results suggest that it is viable to use maize residues in particleboard, which, in turn, allows the use of the agricultural by-product and compensates for the potential shortage of raw material for the particleboard industry.

## Acknowledgements

The research team would like to thank the company MASISA Mapal plant for providing its facilities, and the Adhesives and Composite Materials Laboratory of the Bío-Bío University for the support of its technical and professional personnel.

*End of English version*

## References / Referencias

- Akgül, M., Güler, C., & Çöpür, Y. (2010). Certain physical and mechanical properties of medium density fiberboards manufactured from blends of corn (*Zea mays indurata* Sturt.) stalks and pine (*Pinus nigra*) wood. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 34(3), 197–206. doi: 10.3906/tar-0902-26
- Amenaghawon, N. A., Osayuki-Aguebor, W., & Okieimen, C. O. (2016). Production of particle boards from corn cobs and cassava stalks: optimization of mechanical properties using response surface methodology. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(4), 1236–1244. Retrieved

en tableros con proporción del 20 % y el máximo fue de 2.956 N·mm<sup>-2</sup> para tableros sin rastrojo, sin detectar diferencias significativas entre las proporciones evaluadas (Figura 3C).

En general, las proporciones entre 0 y 30 % presentaron módulos de elasticidad y ruptura por arriba del requerimiento industrial, cumpliendo con lo estipulado por la norma ANSI 208.1 (ANSI, 1999). Esto podría deberse a la dependencia de estas propiedades con la geometría de la partícula, por lo que puede sugerirse que ambas materias primas presentaron un tamaño de partícula similar tanto para caras como para el centro del tablero. En este sentido, no hubo evidencia estadística de que los módulos fueron diferentes entre las proporciones de rastrojo de maíz.

Los resultados, aunque alentadores, deben superar etapas siguientes de validación y nuevos ensayos, hacer ajustes a las variables de proceso similares a las condiciones operacionales industriales, y explorar aspectos como la geometría de las partículas de la materia prima. Es importante también considerar la estacionalidad y la homogeneidad de la densidad del rastrojo de maíz. Asimismo, se debe contar con un transporte adecuado, recolección, almacenamiento y manipulación al interior de la planta. Esto podría exigir modificaciones en algunas etapas del proceso de producción, principalmente una gestión paralela de ambas materias primas, lo que al ser debidamente controlado podría constituir una ventaja competitiva para el sector.

## Conclusiones

El espesor, densidad y humedad fueron similares en las proporciones de 0 a 30 % de rastrojo de maíz. El hinchamiento a 2 y 24 h cumplió con el requerimiento normativo e industrial, exceptuando la proporción del 30 %. La absorción a 2 y 24 h incrementó significativamente a partir del 20 % de rastrojo; todas las proporciones cumplieron con la normativa. El IB se redujo significativamente desde el 20 % y los módulos de elasticidad y ruptura no mostraron diferencias significativas entre las proporciones. Por tanto, las proporciones de hasta 20 % aseguran cumplimiento normativo e industrial. Los resultados sugieren que es factible utilizar rastrojo de maíz en tableros de partículas, lo cual, a su vez, permite la valorización del subproducto agrícola y compensa la escasez potencial de materia para la industria de tableros.

## Agradecimientos

El equipo de investigadores agradece a la empresa MASISA planta Mapal por facilitar sus instalaciones, y al Laboratorio Adhesivos y Materiales Compuestos –

- from [https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol7/vol7\\_N4/138-JMES-1811-2015-Amenaghawon.pdf](https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol7/vol7_N4/138-JMES-1811-2015-Amenaghawon.pdf)
- American National Standards Institute (ANSI). (1999). Particleboard. (ANSI A208.1). Retrieved from <https://www.compositepanel.org/resources/standards/>
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2001a). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates* (ASTM C136–1). Retrieved from <https://www.astm.org/c0136-01.html>
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2001b). Standard specification for wire cloth and sieves for testing purposes (ASTM E-11-01). Retrieved from <https://www.astm.org/e0011-01.html>
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2017). Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based-materials ASTM D2395). Retrieved from <https://www.astm.org/d2395-17.html>
- Arabi, M., Faezipour, M., & Gholizadeh, H. (2011). Reducing resin content and board density without adversely affecting the mechanical properties of particleboard through controlling particle size. *Journal of Forestry Research*, 22(4), 659–664. doi: 10.1007/s11676-011-0207-3
- Balboa, C. H., & Somonte, M. D. (2014). Economía circular como marco para el ecodiseño: el modelo ECO-3. *Informador Técnico*, 78(1), 82–90. doi: 10.23850/22565035.71
- Barrios, A., Trincado, G., & Watt, M. (2017). Wood properties of juvenile and mature wood of *Pinus radiata* D. Don trees growing on contrasting sites in Chile. *Forest Science*, 63(2), 184–191. doi: 10.5849/forsci.2016-060
- Chávez, Á., & Rodríguez, A. (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. *Revista Academia y Virtualidad*, 9(2), 91–107. doi: 10.18359/ravi.2004.
- Dirección Meteorológica de Chile (DMC). (2001). *Climatología regional*. Santiago, Chile: Author.
- European Committee for Standardization (EN). (1993a). Particleboards and fiberboards - Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. (EN 319). Retrieved from <https://www.en-standard.eu/bs-en-319-1993-particleboards-and-fibreboards-determination-of-tensile-strength-perpendicular-to-the-plane-of-the-board/>
- European Committee for Standardization (EN). (1993b). Wood-based panels - Determination of density. (EN 323). Retrieved from <https://www.en-standard.eu/bs-en-323-1993-wood-based-panels-determination-of-density/>
- European Committee for Standardization (EN). (1993c). Wood-based panels - Determination of elasticity in bending and of bending strength. (EN 310). Retrieved from <https://www.en-standard.eu/une-en-310-1994-wood-based-panels-determination-of-modulus-of-elasticity-in-bending-and-of-bending-strength/>
- European Committee for Standardization (EN). (1993d). Wood-based panels - Determination of moisture content. (EN 322). Retrieved from <https://www.en-standard.eu/une-en-322-1994-wood-based-panels-determination-of-moisture-content/>
- Universidad del Bío-Bío, por el apoyo del personal técnico y profesional.
- Fin de la versión en español**
- European Committee for Standardization (EN). (1994). Particleboards and fiberboards - Determination of swelling in thickness after immersion in water. (EN 317). Retrieved from <https://www.en-standard.eu/bs-en-317-1993-particleboards-and-fibreboards-determination-of-swelling-in-thickness-after-immersion-in-water/>
- Garay, R. M., MacDonald, F., Acevedo, M. L., Calderón, B., & Araya, J. E. (2009). Particleboard made with crop residues mixed with wood from *Pinus radiata*. *BioResources*, 4(4), 1396–1408. doi: 10.15376/biores.4.4.1396-1408
- Gysling, J., & Soto, D. (2018). *Industria forestal primaria en Chile. Período 2006-2015*. Santiago, Chile: INFOR. doi: 10.52904/20.500.12220/21347
- Güler, C., Sahin, H. I., & Yeniay, S. (2016). The potential for using corn stalks as a raw material for production particleboard with industrial wood chips. *Wood Research*, 61(2), 299–306. Retrieved from <http://www.centrumdp.sk/wr/201602/13.pdf>
- Guler, C., & Büyüksarı, Ü. (2011). Effect of production parameters on the physical and mechanical properties of particleboards made from peanut (*Arachis hypogaea* L.) hull. *BioResources*, 6(4), 5027–5036. doi: 10.15376/biores.6.4.5027-5036
- Instituto Forestal (INFOR). (2014). *Importaciones forestales 2013*. Santiago, Chile: INFOR. Retrieved from <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/20941>
- Instituto Forestal (INFOR). (2019a). *Anuario Forestal 2019*. Santiago, Chile: INFOR. Retrieved from <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/29165>
- Instituto Forestal (INFOR). (2019b). *La industria de tableros y chapas 2019*. Santiago, Chile: INFOR. Retrieved from <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/29170>
- Instituto Nacional de Normalización. (2019). Madera - Parte 1: Determinación del contenido de humedad. (NCh176/1). Retrieved from <https://ecommerce.inn.cl/nch1761201968325>
- Iswanto, A. H., Octaviani, F., Tarigan, W. F., & Nuryawan, A. (2021). Effect of corn stalks and palm fibers ratio on physical, mechanical, and durability properties of particleboard. In *IOP Conference series: Earth and environmental science* (vol. 713, 012047). IOP Publishing Ltd. doi: 10.1088/1755-1315/713/1/012047
- Mendes, L. M., Mendes, S. A., Iwakiri, S., Chaves, M. D., Mori, F. A., & Mendes, R. F. (2008). Effects of board density and layers composition on the physical and mechanical properties of OSB manufactured from clones of *Eucalyptus* spp. *Cerne*, 14(4), 379–385. Retrieved from <https://cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/233/202>
- Mendes, R. F., Mendes, L. M., Abranches, R. A. S., Santos, R. D., & Guimarães Júnior, J. B. (2010). Painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. *Scientia Forestalis*, 38(86), 285–

295. Retrieved from <https://www.ipef.br/PUBLICACOES/SCIENTIA/nr86/cap16.pdf>
- Mohebbi, B., Gorbani-Kokandeh, M., & Soltani, M. (2009). Springback in acetylated wood-based composites. *Construction and Building Materials*, 23(9), 3103–3106. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.007
- Nemli, G., & Demirel, S. (2007). Relationship between the density profile and the technological properties of the particleboard composite. *Journal of Composite Materials*, 41(15), 1793–1802. doi: 10.1177/0021998307069892
- Ruiz, C., Wolff, M., & Claret, M. (2017). *Rastrojos de cultivos anuales y residuos forestales*. Chillán, Chile: INIA Quilamapu. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7857>
- Scatolino, M. V., Silva, D. W., Mendes, R. F., & Mendes, L. M. (2013). Uso do sabugo de milho na produção de painéis aglomerados. *Ciência e Agrotecnologia*, 37(4), 330–337. doi: 10.1590/S1413-70542013000400006
- Statgraphics Centurion. (2013). Statgraphics Centurion XVI software version 16.2. 04. Warrenton, Virginia, USA: StatPoint Technologies Inc. Retrieved from [www.statgraphics.net](http://www.statgraphics.net).
- Tumuluru, J. S. (2014). Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. *Biosystems Engineering*, 119, 44–57. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2013.11.012
- US Department of Commerce (DOC). (1966). Mat-Formed Wood Particleboard. Commercial Standard CS 236-66. Retrieved from [https://global.ihs.com/doc\\_detail.cfm?document\\_name=NBS%20CS%20236&item\\_s\\_key=00081009](https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=NBS%20CS%20236&item_s_key=00081009)

