

ESTRUCTURA FÍSICO-MECÁNICA DE MADERA DENSIFICADA EN PEQUEÑAS DIMENSIONES PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

PHYSICAL-MECHANICAL STRUCTURE OF SMALL-DENSIFIED WOOD FOR ENERGY PRODUCTION

Belisa Benítez Izquierdo^{1*}, Damián Guerra Castellón², Juan Francisco Pastor Bustamante³, Daniel Alberto Alvarez Lazo⁴, Belsy Benítez Izquierdo⁵.

¹Universidad de Pinar del Río. Facultad de Ciencias Forestales y Agropecuarias. Departamento de Ciencias Forestales. CP 20100, <https://orcid.org/0009-0005-2327-4199>

²Universidad de Pinar del Río. Facultad de Ciencias Forestales y Agropecuarias. Departamento de Ciencias Forestales. CP 20100, <https://orcid.org/0000-0002-4536-4938>

³Universidad de Pinar del Río. Facultad de Educación Media. Departamento de Química Servicio. CP 20100, <https://orcid.org/0009-0000-7890-2301>

⁴Universidad de Pinar del Río. Facultad de Ciencias Forestales y Agropecuarias. Centro de Estudios Forestales. CP 20100, <https://orcid.org/0000-0001-7627-0152>

⁵Delegación Territorial del Turismo Pinar del Río. CP 20100, <https://orcid.org/0009-0004-9903-8590>

*Autor para la correspondencia (e-mail): belisa.benitez.izquierdo@gmail.com

Recibido para su publicación: 07/05/2025 - Aceptado para su publicación: 12/08/2025

Resumen

Los altos volúmenes de residuos producto a la transformación primaria y secundaria de la madera se han convertido en un tema de preocupación, pues han pasado a ser un tema de impacto ambiental. La presente investigación se fundamenta en la necesidad de dar una utilidad a las múltiples toneladas de residuos producto del proceso de transformación primaria y secundaria de la industria "Combate de las Tenerías", perteneciente a la Empresa Agroforestal Macurijes. La investigación se lleva a cabo en dos lugares, la toma de aserrín se realizó en la empresa antes mencionada. La mezcla con aserrín de y la preparación de las muestras se realizaron en la universidad de Pinar del Río. Se determinaron propiedades físicas y mecánicas del producto obtenido. Se obtuvieron cuatro densificados, presentando mejor respuesta físico-mecánica el compuesto de aserrín seco de médula, esto debido a la cohesión del aglomerado de aserrín y la estructura química que compone la especie *P. caribaea*.

Palabras claves: Densidad; humedad; Bloque densificado; compresión.

Abstract

The high volumes of waste from primary and secondary wood processing have become a matter of concern, as they have become an issue of environmental impact. This research is based on the need to find a use for the many tons of waste from the primary and secondary processing process of the "Combate de las Tenerías" industry, part of the Macurijes Agroforestry Company. The research is being conducted in two locations. Sawdust was collected at the aforementioned company. The mixture with sawdust and sample preparation were carried out at the University of Pinar del Río. The physical and mechanical properties of the resulting product were determined. Four densified products were obtained, with the dry medulla sawdust composite exhibiting the best physical-mechanical response due to the cohesion of the sawdust agglomerate and the chemical structure of the *P. caribaea* species.

Keywords: Density; humidity; Densified block; compression.

INTRODUCCIÓN

La producción derivada de la madera ha experimentado cambios notables en los últimos años, según los datos presentados por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, por sus siglas en inglés FAO, la producción de los principales productos derivados de la madera aumentó en 2018, entre un 1% (tablas derivadas de la madera) y un 5% (rollos industriales derivados de la madera). Asia-Pacífico, América del Norte y Europa tuvieron aumentos significativos en su producción, lo que podría atribuirse al crecimiento económico positivo en esas regiones. La crisis económica mundial que se produjo entre 2008 y 2009 tuvo un impacto significativo en la industria maderera (Orozco-Ramírez et al., 2022).

La madera siempre ocupó un lugar destacado dentro de los diversos materiales utilizados por el hombre debido a un amplio espectro de importantes características físicas y mecánicas (Varona *et al.*, 2022).

Su tecnología ha ido evolucionando y han surgido nuevos productos que han ampliado su campo de aplicación; por lo que en la actualidad se busca cada vez más conocer y mejorar los diversos procesos que se vinculan con la industrialización de la madera; con la finalidad de mejorar su utilización y aprovechamiento.

La densidad de la madera es uno de sus principales rasgos funcionales (Dlouhá *et al.*, 2018) y se considera un buen predictor del módulo de elasticidad. Igualmente, la densidad es la característica de referencia para pronosticar el módulo dinámico e interviene en la configuración del índice de calidad para sugerir su uso como material de ingeniería (Sotomayor & Adachi, 2025).

La evidencia empírica sugiere que, a mayor densidad de la madera, se incrementa su módulo dinámico. Así, el paradigma contemporáneo en ciencias, tecnología e ingeniería de la madera propone que, si se aumenta de manera artificial su densidad, se obtendrá una ganancia tecnológica al aumentar su resistencia mecánica (Kutnar y Šernek, 2007). Citados por Sotomayor *et al.*, (2021).

El densificado de la madera es el tratamiento por el cual su relación peso/volumen se incrementa al reducir los espacios vacíos en los lúmenes del tejido leñoso. Así, la madera densificada se define como aquella cuya densidad ha sido incrementada de manera artificial (Sandberg y Navi, 2007).

La constante transformación mecánica primaria y secundaria de la madera genera un alto porcentaje de residuos inutilizables que abarcan considerables extensiones de espacios en zonas aledañas a estas industrias incluyendo los asentamientos poblacionales, lo que provoca una fuente de contaminación. Por lo que esta investigación se propone como objetivo: Caracterizar la estructura de la madera densificada de pequeñas dimensiones a partir de sus propiedades físico-mecánicas para la producción de energía.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se fundamentó en la necesidad de dar una utilidad a las múltiples toneladas de residuos producto del proceso de transformación primaria y secundaria de la madera en la Empresa Agroforestal Macurijes.

Ubicación del área de trabajo

La investigación fue realizada en áreas del aserrío Combate de las Tenerías de la Empresa Agroforestal Macurije, perteneciente al municipio Guane, localizada en la región más occidental de la provincia de Pinar del Río, Cuba. Geográficamente (Figura 1), limitando al Norte (N) con el litoral costero, al Nordeste (NE) con el Municipio Minas de Matahambres específicamente con el Consejo Popular Santa Lucía (EFI Minas de Matahambres); al Este (E) con el municipio San Juan e Martínez (EFI Pinar del Río); al Sur (S) con el municipio Sandino (EFI Guanahacabibes) y al Sudeste (SE) con el litoral del Golfo de México. (Reinoso *et al.*, 2022).

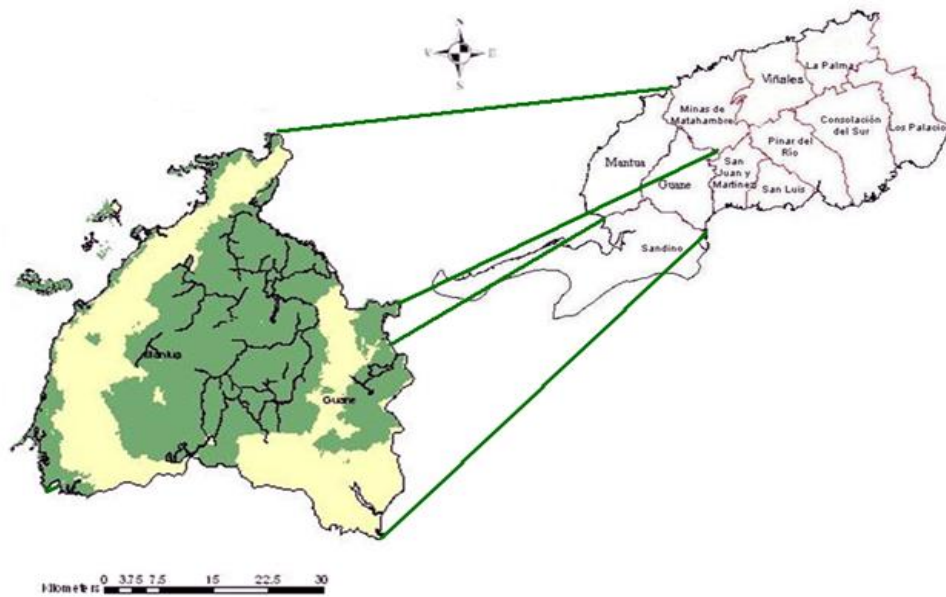


Figura 1. Ubicación de la empresa Agroforestal Macurijes. Fuente: Google maps (2023).

Figure 1. Location of the Agroforestral Macurijes Enterprise. Source: Google maps (2023).

La mezcla con aserrín de madera de diferentes secciones del árbol y la preparación de las muestras se realizaron en la universidad de Pinar del Río. El aserrín base empleado para las mezclas se concibió de la especie *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari.

Estimación de volumen de biomasa generado durante el aserrado de la madera en la EAF Macurije.

Con este fin a partir de un muestreo piloto se seleccionan 106 trozas, siendo significativas para la cuantificación de la materia prima. Los cálculos se realizaron mediante las ecuaciones establecidas por Egas (1998); citado por Peña et al., (2008) para la especie *Pinus caribaea*, en las condiciones de este aserrío.

Para el cálculo de volumen de trozas:

$$V_{CC} = e^{(-8.9070 + 0.8135 \cdot \ln Dr + 0.9343 \cdot \ln Cd)} + \frac{\pi}{4} \cdot (Dr/100)^2 \cdot l \quad (1)$$

$$V_{SC} = e^{(-9.2832 + 1.8816 \cdot \ln Dr + 1.2533 \cdot \ln l)} \quad (2)$$

Para el cálculo del porcentaje de aserrín en la línea de grandes y pequeñas dimensiones, respectivamente:

$$\% \text{ aserrín} = 7.5554 - 0.0020 \cdot Dr^2 \quad (3)$$

$$\% \text{ aserrín} = 11.8000 - 0.0112 \cdot Dr^2 \quad (4)$$

El volumen de aserrín se calculó como sigue:

$$V_{aserrin} = V_{troza} \cdot \frac{\% \text{ aserrín}}{100} \quad (5)$$

Donde. D_r : diámetro en el extremo inferior (cm), l : longitud (m), V_{cc} : volumen de madera con corteza (m^3), V_{sc} : volumen de madera sin corteza (m^3), C_d : conicidad.

Diseño teórico del bloque densificado

Siguiendo la metodología propuesta por Sotomayor et al., (2024) la densificación o moldeo de partículas son preformados mediante la aplicación continua de presión y temperatura, dando como resultado un cubo de 2*2*2 cm.

Para la conformación de los bloques de madera densificada se utilizaron cuatro clasificaciones: ASM- Aserrín seco de médula, AVM- Aserrín verde de médula, ASC- Aserrín seco con costanera, AVC- Aserrín verde con costanera.

De acuerdo con Whittaker y Shield (2017), las temperaturas y presiones típicas presentes en la matriz de peletizado oscilan entre 100-130°C y 115-300 MPa respectivamente. Las etapas típicas en la fabricación de madera densificada a partir de partículas parten de acondicionamiento, peletizado y enfriamiento.

Metodología para determinar las propiedades físico-mecánicas

Contenido de humedad

De los diferentes métodos existentes para la medición del grado de humedad de la madera los más utilizados son el de desecación en estufa, el cual resulta más preciso.

$$h = \frac{Ph - Pa}{Pa} * 100 \quad (6)$$

Donde. h: humedad; Ph: Peso húmedo; Pa: Peso anhidro.

Densidad Verde (DENSv)

$$D_v = \frac{P_v}{V_v} \quad (7)$$

Donde. Dv- Densidad verde, cm³ * g⁻¹; P_v- peso de la madera verde, g; V_v- Volumen de la madera verde, cm³.

Compresión paralela-perpendicular a las fibras (MORC)

La compresión paralela no es más que la resistencia debido a la acción de una fuerza con tendencia a comprimir el prisma de madera, acortándose su longitud y aumentando su sección transversal.

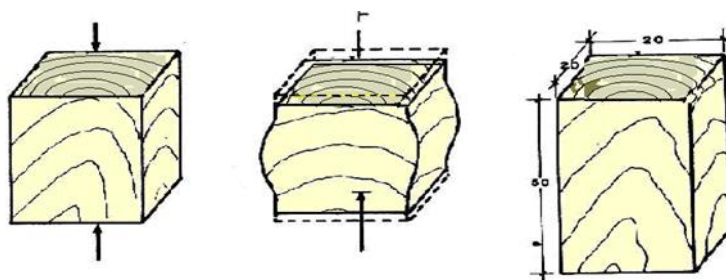


Figura 2. Representación de un cuerpo sometido a la compresión. Álvarez, 2013.

Figure 2. Representation of a body subjected to compression. Source: Álvarez, 2013.

La aplicación de la carga se hace sobre las bases del prisma, es decir, sobre las caras (2*2) de forma continua y a todo lo largo del ensayo.

$$MORC = \frac{F_{max}}{a*b} \quad (8)$$

Donde: F_{max}- Fuerza aplicada a las probetas al límite de proporcionalidad, kgf; a- ancho de las probetas, cm; b- grosor de las probetas, cm.

Análisis estadísticos

Para validar los resultados obtenidos se utilizó el software SPSS IBM ver. 22 para Windows. Se tuvieron en cuenta variables acorde a la investigación como son propiedades físico-mecánicas. Se correlacionaron variables desde el punto de vista físico: densidad, contenido de humedad, presión, temperatura y tamaño de las partículas con las respuestas mecánicas de los bloques. A partir de la regresión se obtienen las variables que influyen en el comportamiento de la resistencia de los bloques y se describen los parámetros óptimos para la producción sostenibles de calidad de los bloques energéticos.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Coincidiendo con Santizábal et al., (2022), la existencia de residuos maderables es una fuente fundamental de materia prima para la conversión en energía limpia, renovable y eficiente; con este propósito se disminuye considerablemente la contaminación, se crean nuevos puestos de trabajo, se le da un valor agregado a la madera obtenida del bosque, pues no solo se utiliza el aserrín o la costanera, sino también follaje, ramas, troncos que se quedan expuestos a merced de la naturaleza en las áreas de talas y de una forma u otra también forman parte de contaminación, en el peor de los casos material combustible con altas propiedades ignífugas lo cual trae consigo altas probabilidades de ocasionar además de propagar fuego, trayendo consigo pérdidas considerables hacia todos los niveles. Aprovechar todo recurso que brinde el bosque sin dejar consecuencias que pongan en peligro el mantenimiento de las plantaciones, es una vía efectiva de generar ganancias, siempre y cuando no se comprometan las futuras generaciones.

Disponibilidad de materia prima

Existe anualmente un éxodo de 9 210 m³ de aserrín, de ello 8 850 m³ son de pino y 360 m³ de eucalipto, sumado a costaneras y leña hay un total de 24 065 m³ de materia prima para biomasa anuales, lo que no todo cumple con los requisitos indispensables para el aprovechamiento. Resultado que coincide con los obtenidos por Velásquez et al., (2022).

El aserrío genera anualmente unos 14 457 m³ de residuos, clasificados en aserrín, costaneras, tacos y virutas, se acumulan en los patios del aserradero, donde posteriormente una parte de este se quema, liberando gran cantidad de CO₂ hacia el ambiente. La acumulación actual de residuos alcanza unos 528 441 m³, una parte importante es arrastrada por todas las áreas aledañas al aserrío provocando su contaminación local y en otros asentamientos, también la acumulación de estos residuos ha inutilizado alrededor de 6.2 ha de tierra. Los residuos más finos permanecen en suspensión cuando el régimen de vientos es de moderado a pronunciado, afectando de esta forma al ecosistema y a unos 991 habitantes que tiene la comunidad de 20 de Mayo. Se ha detectado, a partir del personal médico de la localidad, un incremento de las enfermedades respiratorias e hipoacústicas asociadas a la aspiración de partículas de madera y al elevado nivel de ruido al que se exponen los 120 trabajadores que tiene el aserradero.

A partir del estudio aplicado a los aserríos más importantes de la provincia se obtiene el potencial de materia prima para la producción de bloques energéticos con los residuos que se encuentran en los patios de los aserríos y áreas aledañas, utilizando la densificación de estos residuos. Las maderas que mejores características presentan por su comportamiento físico y mecánico, así como por su abundancia es *Pinus caribaea* y *Eucalyptus sp.*, cuantificándose en cada caso en miles de metros cúbicos (Mm³).

Tabla 1. Disponibilidad de materias primas para la producción de bloques energéticos.

Table 1. Availability of raw materials for the production of energy blocks.

Conceptos	Empresas				TOTAL
	Macurije	Minas	Viñales	Pinar	
Madera en rollo	55,84.1	17,05.2	10,99.8	16,68.2	100,57.3
Mayor de 10 cm	43,85.5	12,63.1	9,34.8	13,73.7	79,57.2
De 5 a 10 cm	11,98.6	4,42.1	1,65.0	2,94.5	21,00.1
Costaneras y varillas	14,85.5	8,00.5		1,72.9	24,58.8
Aserrín	9,21.0	4,41.5		1,22.1	14,84.6
TOTAL	79,90.6	29,47.2	10,99.8	19,63.1	140,00.7

A pesar de que todas las empresas cuentan en su patrimonio con la especie conífera principal en la industria de transformación primaria y secundaria de la madera, es la empresa Macurijes la que presenta la mayor cantidad de metros cúbicos de madera rolliza y residuos generados a partir del proceso de transformación, resultados que se corresponden con los obtenidos por Alvarez et al. (2020), quien plantea que los volúmenes de residuos en el proceso de aserrado muchas veces quedan condicionado a defectos en la madera como la conicidad.

Tabla 2. Disponibilidad de materias primas aportada por la especie *P. caribaea*.

Table 2. Availability of raw materials provided by the species *P. caribaea*.

Conceptos	Empresas				TOTAL
	Macurije	Minas	Viñales	Pinar	
Madera en rollo	27,30.9	17,05.2	10,06.0	10,76.5	65,18.6
Mayor de 10 cm	19,75.5	12,63.1	8,55.1	8,72.8	49,66.5
De 5 a 10 cm	7,55.4	4,42.1	1,50.9	2,03.7	15,52.1
Costaneras y varillas	14,20.2	8,00.5		1,64.4	23,85.0
Aserrín	8,85.0	4,41.5		1,17.4	14,43.9
TOTAL	50,36.1	29,47.2	10,06.0	13,58.3	103,47.6

Propiedades físicas de los bloques energéticos

En el diseño teórico inicial del producto en cuestión de estudio no se tuvo en cuenta la variación del pelletizado, lo que quiere decir que no se habrían tenido en cuenta variables medidas como densidad, humedad u otra que interfiriera en algunos estadísticos descriptivos que evidencian el comportamiento de las variables medidas.

La densidad media alcanzada por las variantes de densificado obtenidas muestra un valor de 0.62 g/cm³, no correspondiéndose con el valor medio para la especie *P. caribaea* aportado por Cruz et al., (2019), el cual plantea que la densidad en estado natural de esta especie ronda los 0.52 g/cm³ aproximadamente. Los valores de temperatura se corresponden al material comprimido a partir de la aplicación de calor en la estufa.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de los parámetros físicos medidos.

Table 3. Descriptive statistics of the measured physical parameters.

Variables	N	Media	Desviación estándar	Varianza
Densidad (g/cm ³)	40	0.62	,12938	,017
Humedad (%)	40	8,40	1,932	3,733
Presión (Mpa)	40	9,73	0.842	0.708866
Temperatura (°C)	40	95,85	25,799	665,567
Tiempo (min)	40	52,60	19,722	388,964
Distancia Recorrida (mm)	40	24,20	3,131	9,805

Dentro de los valores de densidad obtenidos, el densificado compuesto por aserrín seco de médula presenta el mayor valor, con una densidad media de 0.70 g/cm³, el menor valor de densidad lo obtuvo el compuesto a base de aserrín verde de costanera. Esto se debe a que la costanera carece de humedad y su estructura plenamente protectora está compuesta por células muertas, coincidiendo con lo planteado por Sotomayor et al., (2025).

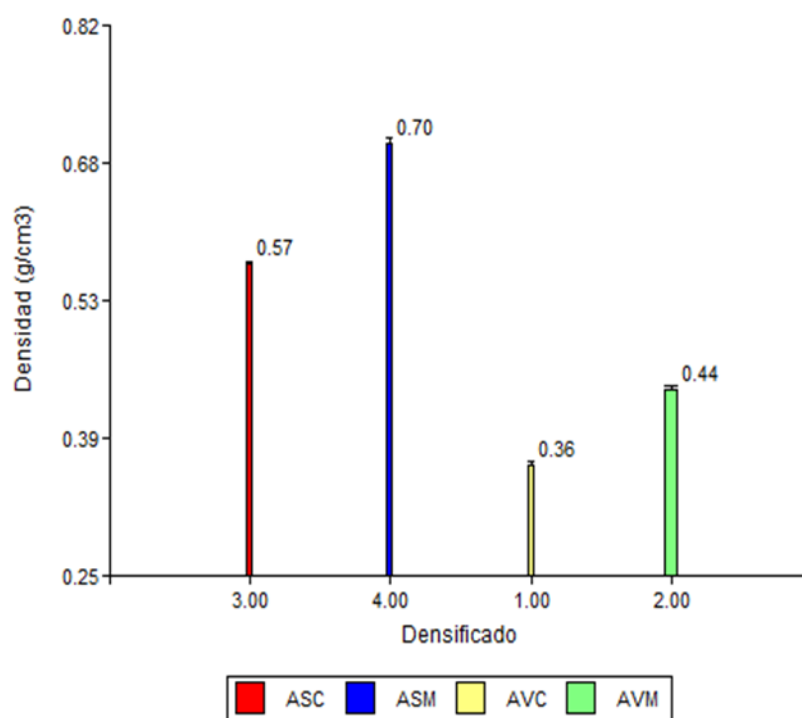


Figura 3. Comportamiento de la densidad en cada uno de los compuestos obtenidos.

Figure 3. Density behavior in each of the compounds obtained.

El agua en la biomasa disminuye el poder calórico de ésta; durante la combustión o quemado tiene un efecto absorbente de calor para realizar el proceso de evaporación, lo que minimiza la capacidad de intercambio calórico. Es por esto que muchas veces antes de utilizar la biomasa es necesario secar este compuesto lignocelulósico hasta un contenido de humedad adecuado, permitiendo la obtención de mayor cantidad de energía con la menor cantidad de calor suministrado para el secado. Entonces se habla de un balance energético que presenta una ecuación de dos partes,

por un lado, la energía que es necesaria para secar la biomasa y por otro la cantidad de energía que suministra la biomasa. El secado de la biomasa es importante en muchos procesos de conformación para un uso final.

El contenido de humedad de las probetas obtenidas sigue un principio diferente al proceso natural de la madera, donde la humedad es la que se representa en mayor cuantía en la médula. Este resultado se debe a que el aserrín se secó antes de comprimirse y luego, bajo el proceso de compresión se volvió a secar, posibilitando la disminución del contenido de humedad hasta su máxima expresión en cámara. En el caso de aserrín verde con costanera guarda mayor humedad porque este se relaciona con la presión que se ejerce sobre el aglomerado. Al presentar bajo contenido de humedad esto posibilita que la absorción de humedad y el fenómeno de deformación de la madera producto a la contracción volumétrica sean menor, lo que posibilita una mayor duración del producto en un lapso de tiempo, disminuyendo todos los procesos que influyan sobre la putrefacción del mismo o las pérdidas de sus características mecánicas iniciales. Por lo que el aserrín seco de la médula presenta el valor ideal para la comercialización del producto.

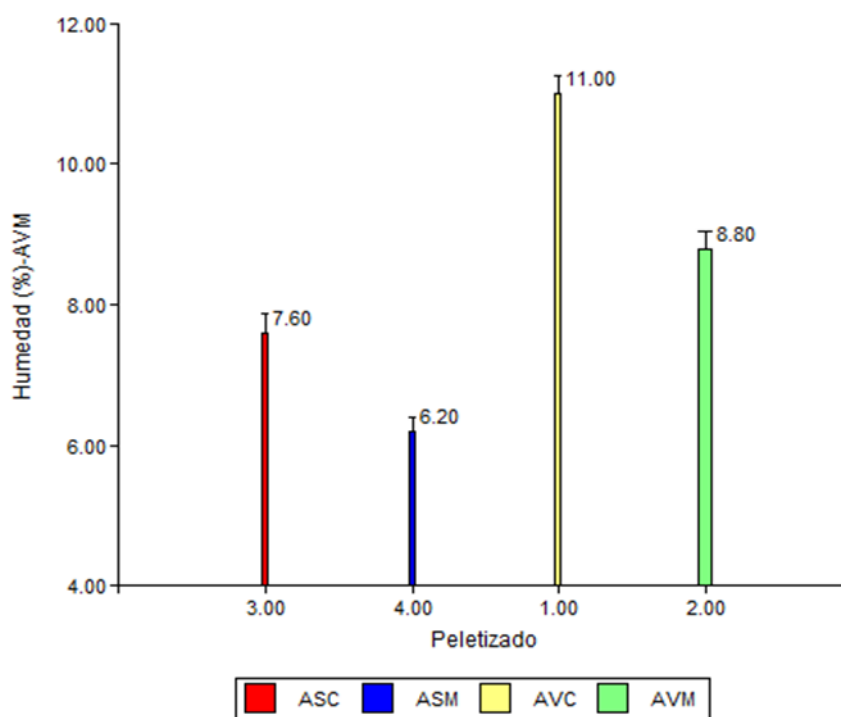


Figura 4. Variación de la humedad en los compuestos obtenidos.

Figure 4. Variation of humidity in the obtained compounds.

La presión aplicada a los aglomerados incide directamente sobre la compactación del aserrín, dándole una mejor respuesta desde el punto de vista mecánico al producto final. Al aserrín seco de las dos secciones estudiadas se le aplicaron valores similares de presión rondando los 9.8 (Mpa), coincidiendo con los valores propuestos por Barrera et al., (2023). Como resultado de la estimación se tiene que las presiones mínimas requeridas para vencer el efecto de fricción y contrapresión al interior del canal es mayor debido a la naturaleza anatómica del *P. caribaea*.

La temperatura en el proceso de secado del material a utilizar jugó un papel fundamental, pues la modificación de esta puede acelerar o desacelerar el proceso de secado de cualquier cuerpo. En el caso de la investigación se emplearon dos rangos de temperatura, uno para el aserrín verde y otro para el aserrín seco. Los valores de temperatura

oscilaron entre los 70 y 123 °C, en el caso del aserrín verde se tuvo mayor temperatura con el fin de llevar el contenido de humedad a la menor expresión posible. En investigaciones realizadas por Sotomayor et al., (2024) coinciden en que la temperatura ideal para acelerar el proceso de secado en cámara oscila entre los 55 y los 120 °C.

La magnitud tiempo hace referencia al tiempo de estancia del aglomerado bajo presión en la estufa, o sea, en el proceso de secado. Para el caso del aserrín verde de las dos posiciones se empleó más tiempo en la estufa buscando disminuir el mayor contenido de humedad posible para que al aplicar presión queden menos espacios con aire o llenados de humedad producto a la presión que se le aplica al mismo. En el caso del aserrín que se declara como seco, ya se le había realizado un previo secado antes de aplicar presión e introducir en el proceso de extrusión, coincidiendo con la metodología planteada por Sotomayor & Ávila (2021) para la confección de piezas de madera plástica.

Debido a la presión que se ejerció sobre el aserrín seco, al ser mayor, esto trajo consigo que la compactación del mismo fuese mayor, por lo que el recorrido del extrusor es mayor. El aserrín en estado seco de las dos posiciones que se trabajaron logró comprimir hasta 27 mm como media del comportamiento de la presión que se ejerció al material, no siendo así para el aserrín verde, siendo el de costanera el que menor recorrido hizo, esto se debe a la calidad del aserrín y las impurezas en el tamizado, lo que provoca una mayor contrapresión del producto final, coincidiendo con los valores obtenidos por Vincés y Poggi (2014).

Las variables físicas antes mencionadas dentro de los valores de densidad obtenidos, el peletizado compuesto por aserrín seco de médula presenta el mayor valor, con una densidad media de 0.70 g/cm³, el menor valor de densidad lo obtuvo el compuesto a base de aserrín verde de costanera. Esto se debe a que la costanera carece de humedad y su estructura plenamente protectora está compuesta por células muertas, coincidiendo con lo planteado por Sotomayor et al., (2024). En tal sentido se cumple el supuesto de densificado, al aumentar la densidad de la madera ya sea sobre la base de la presión de partículas u otro método empleado, coincidiendo con lo planteado por Luan *et al.*, (2021).

Tabla 4. Parámetros físicos medidas a los bloques densificados.

Table 4. Physical parameters measured in the densified blocks.

Mezcla/Propiedades	Densidad (g/cm ³)	Humedad (%)	Presión (Mpa)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Distancia recorrida (mm)
AVC	0.36	11	7.28	120.7	70.8	19.9
AVM	0.44	8.8	9.35	121.9	70.9	23.5
ASC	0.57	7.6	11.09	70.9	43.9	26.7
ASM	0.70	6.2	10.6	69.9	24.8	26.7

Resistencia mecánica de los compuestos preparados

En cuanto al módulo de rotura por compresión paralela la resistencia se manifiesta como valor medio en 25.37 kg/cm², y en compresión perpendicular 16.58 kg/cm², estos valores difieren con los obtenidos por Sotomayor et al., (2025), la cual obtiene valores superiores para la resistencia en tableros de madera densificada.

Tabla 5. Valores medios de la resistencia mecánica de los bloques densificados.

Table 5. Average values of the mechanical strength of the densified blocks.

Módulo de rotura	N	Media	Desviación estándar	Varianza
Compresión paralela (Kg/cm2)	40	25,37	6,868	47,163
Compresión perpendicular (Kg/cm2)	40	16,58	6,547	42,866

En cuanto al módulo de rotura por compresión paralela el densificado de menor respuesta es el compuesto por aserrín verde de costanera, el cual muestra una resistencia de 17.8 kg/cm², clasificándose como muy poco resistente, en tal caso el que mejor módulo de rotura presenta es el aserrín seco de médula, esto se debe a que se le aplicó mayor presión, lo que trajo consigo mayor densidad en el producto, presentando menor coeficiente de rozamiento entre partículas y menor contrapresión.

El análisis de compresión perpendicular se cumple el principio dictado por Guerra *et al.*, (2025), quien plantea que la respuesta a la compresión perpendicular a la fibra puede ser hasta un 50% menor que el módulo de rotura a la compresión paralela. Al igual que en el análisis anterior, el aserrín verde de costanera es el que menor respuesta presenta, aunque en esta propiedad no difiere en cuanto al agrupamiento con el aserrín verde de la médula. El mejor comportamiento al módulo de rotura lo presenta el aserrín seco de médula, lo cual está relacionado al bajo contenido de humedad de su estructura, la presión ejercida sobre sus componentes y la densidad del producto, los cuales ejercen una distribución de carga más cohesionada, posibilitando una mejor respuesta ante el módulo de rotura.

Tabla 6. Resumen del comportamiento de las propiedades mecánicas por tipo de bloque.

Table 6. Summary of the behavior of mechanical properties by block type.

Mezcla/Propiedades	Compresión paralela	Compresión perpendicular
AVC	17.8	9.9
AVM	21.2	11.9
ASC	27	18.7
ASM	35.5	25.8

El compuesto de aserrín seco con madera adulta y médula es el que mejor resistencia opone a la fuerza, teniendo en cuenta que las partículas se encuentran más cohesionadas producto a la presión y la temperatura que se ejercen sobre ellas, posibilitando que la resistencia del producto obtenido cuente con las características precisas para ser transportado sin sufrir deformaciones.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron cuatro densificados, presentando mejor respuesta físico-mecánica el compuesto de aserrín seco de médula, esto debido a la cohesión del aglomerado de aserrín y la estructura química que compone la especie *P. caribaea*.

ÉTICA Y CONFLICTO DE INTERESES

Las personas autores del manuscrito en cuestión, declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras que se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

- Alvarez Lazo, D., Sebastiao, J. D. D., Buanga Lelo, F. N. N., Silva Fuentes, S., & Esteves Valdes, I. (2020). Análisis de la calidad del aserrado de maderas tropicales en Cabinda, Angola. *Revista Cubana De Ciencias Forestales*, 8(1), 34–53. Recuperado a partir de <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/452>
- González Cruz, I., Álvarez Lazo, D., & Velázquez Abad, L. (2019). Influencia de algunos parámetros en el alabeo de la madera aserrada de *Pinus caribaea* Morelet, var. *Caribaea*. *Revista Cubana De Ciencias Forestales*, 7(1), 17–27. Recuperado a partir de <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/401>
- Orozco-Ramírez, Quetzalcóatl, Cohen-Salgado, Daniel, Arias-Chalico, Teresita, García, Carlos A., Martínez-Bravo, René, & Masera, Omar. (2022). Barreras para la producción y el mercado de biocombustibles sólidos forestales en México desde la perspectiva de las empresas. *Madera y bosques*, 28(1), e2812404. Epub 24 de octubre de 2022. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812404>
- Varona López, D., Alvarez Lazo D. A., García Contino, N. S., & Buanga Lelo, F. N. (2022). Preferencias de maderas asociadas al bienestar social para la elaboración de artículos en Cabinda, Angola. *Avances*, 24(3), 298-312. <http://avances.pinar.cu/index.php/publicaciones/article/view/705/2008>
- Sotomayor-Castellanos, J. R., & Adachi, K. (2025). Comportamiento dinámico en vibraciones transversales de madera densificada, laminada y reforzada con fibra de carbono. *Investigación Y Ciencia De La Universidad Autónoma De Aguascalientes*, (96), e8288. <https://doi.org/10.33064/iycaua2025968288>
- Dlouhá, J., Alméras, T., Beauchêne, J., Clair, B., & Fournier, M. (2018). Biophysical dependences among functional wood traits. *Functional Ecology*, 32(12), 2652-2665. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13209>
- Sotomayor-Castellanos, Javier Ramón, Adachi, Koji, Iida, Ryuichi, & Hayashi, Tomoyuki. (2021). Verificación con ultrasonido del tratamiento de densificado en ocho maderas mexicanas. *Ingeniería Mecánica*, 24(1), 55-62. Epub 07 de junio de 2021. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442021000100055&lng=es&tlng=pt
- Sandberg, D., & Navi, P. (2007). *Introduction to thermo-hydro-mechanical (THM) wood processing*. Växjö Universitet Skog & Trä. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:997954/FULLTEXT01.pdf>
- Valdes Reinoso, Reinaldo Hanoi, Álvarez Lazo, Daniel Alberto, Fernández Concepción, Raúl Ricardo, Díaz Acosta, Arnaldo, & García Contino, Norelys Sandra. (2022). Análisis de las preferencias de madera para la producción de muebles en Pinar del Río y Artemisa, Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 10(2), 244-261. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-34692022000200244&lng=es&tlng=pt

- Relava Delgado, Iván, Vignote Peña, S., León Sánchez, M. A., & Cándano Acosta, F. (2008). ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE SERRÍN DE *Pinus caribaea* Moralet EN EL OCCIDENTE DE CUBA. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 33(103), 129–147. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/744>
- Whittaker, C., Yates, N.E., Powers, S.J. et al. Testing the Use of Static Chamber Boxes to Monitor Greenhouse Gas Emissions from Wood Chip Storage Heaps. *Bioenerg. Res.* 10, 353–362 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9800-9>
- Satizábal Marín, D. A., Altamar Consuegra, A. del S., Camargo Vargas, G. de J., & Agudelo Valencia, R. N. . (2022). Aprovechamiento energético de residuos de madera mediante el proceso de pirólisis en CO₂. *Encuentro Internacional De Educación En Ingeniería*. <https://doi.org/10.26507/paper.2640>
- Velásquez Viera, D., Vidal Corona, A. M., & Rodríguez Rodríguez, J. (2022). Aprovechamiento de la biomasa. Aptitud de residuos maderables de copa para formar aglomerados con cemento. *Revista Forestal Baracoa*, 41, <https://www.forestbaracoa.edicionescervantes.com/index.php/fb/article/view/769>
- Sotomayor Castellanos, J. R., Adachi, K., & Kudo, K. (2024). Indicadores de flexibilidad de madera laminada, densificada y reforzada con fibra de carbono. *Ciencia Nicolaita*, (90). <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.782>
- Barrera Cruz, Omar Isaí, Rodríguez Anda, Raúl, Silva Guzmán, José Antonio, & Fuentes Talavera, Francisco Javier. (2023). Elaboración y caracterización de pisos de ingeniería elaborados con maderas de diferentes densidades. *Madera y bosques*, 29(2), <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2922439>
- Sotomayor Castellanos, J. R., & Ávila Calderón, L. E. A. (2021). Reacción al Fuego de Tres Maderas Angiospermas Impregnadas con Sales de Boro. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 33(1), 14. <https://doi.org/10.37815/rte.v33n1.818>
- Luan, Y., Fang, C. H., Ma, Y. F., & Fei, B. H. (2021). Wood mechanical densification: a review on processing. *Materials and Manufacturing Processes*, 37(4), 359–371. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.2016816>
- Guerra Castellón, D., Peñalver Romeo, A., Alvarez Lazo, D., Estévez Valdés, I., & Gorospe Zetina, H. (2025). Análisis de propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Quercus sagraeana* Nutt. procedentes de Viñales: Analysis of physical and mechanical properties of Cuban *Quercus sagraeana* wood nutt from Viñales. *Revista Cubana De Ciencias Forestales*, 13(2), <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/835>