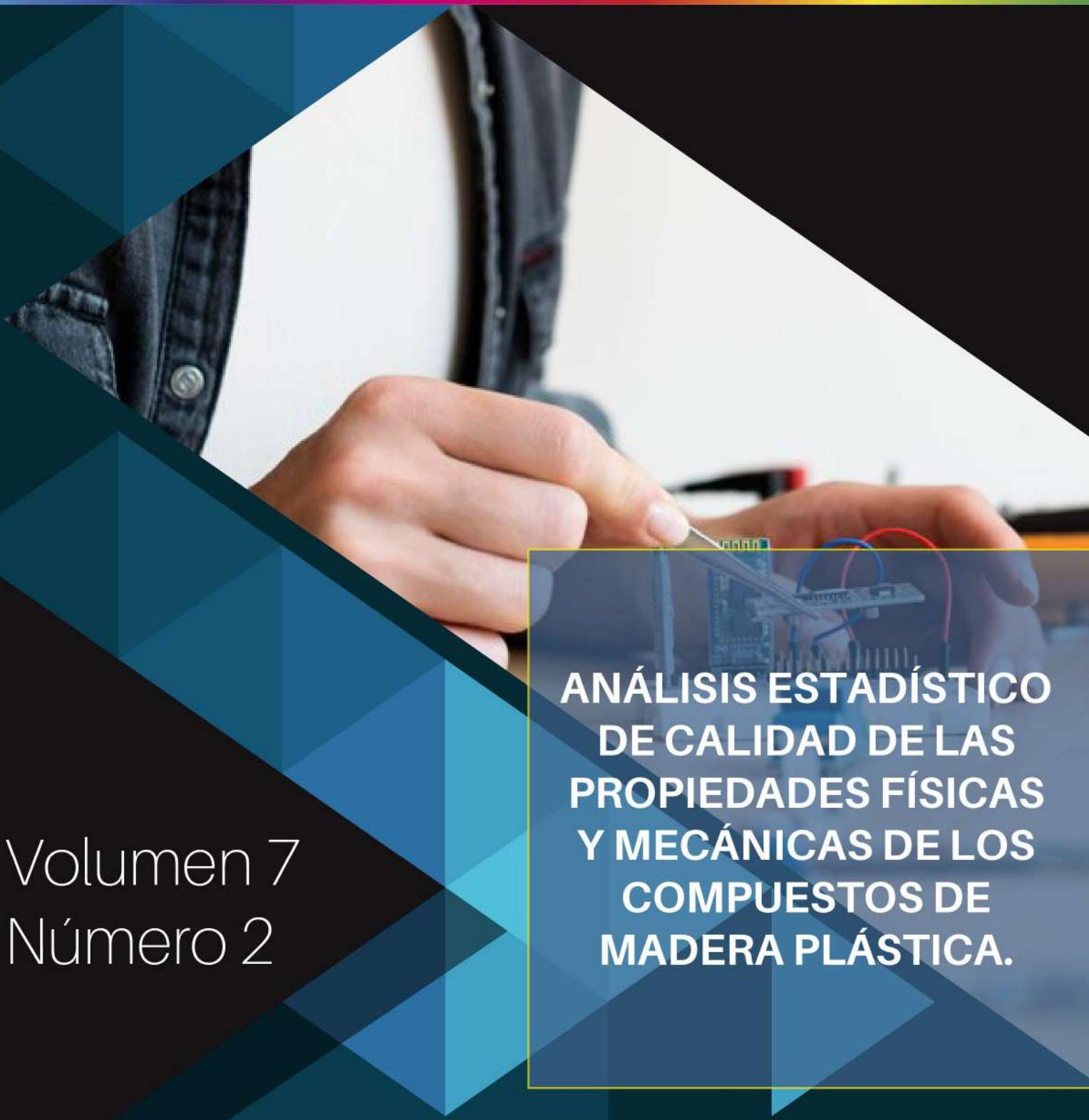


# INVESTIGACIÓN

## TECNOLÓGICA IST CENTRAL TÉCNICO

Volumen 7 · Número 2 · Diciembre 2025 · Publicación semestral



**ANÁLISIS ESTADÍSTICO  
DE CALIDAD DE LAS  
PROPIEDADES FÍSICAS  
Y MECÁNICAS DE LOS  
COMPUESTOS DE  
MADERA PLÁSTICA.**

Volumen 7  
Número 2

## Statistical Analysis of the Quality of the Physical and Mechanical Properties of Wood Plastic Composites.

### Análisis Estadístico de Calidad de las Propiedades Físicas y Mecánicas de los Compuestos de Madera Plástica.

Daniel Casaliglia Gordón<sup>1[0000-0002-6964-3384]</sup>, Jarvis Montúfar Molina<sup>2[0009-0005-5056-0836]</sup>, José Ávila Brito<sup>3</sup>, Leonardo Beltrán Venegas<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [cdcasaliglia@istct.edu.ec](mailto:cdcasaliglia@istct.edu.ec)

<sup>2</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [irmontufarmolina@istct.edu.ec](mailto:irmontufarmolina@istct.edu.ec)

<sup>3</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [javila@istct.edu.ec](mailto:javila@istct.edu.ec)

<sup>4</sup> Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito, Ecuador  
E-mail: [lbeltran@istct.edu.ec](mailto:lbeltran@istct.edu.ec)

Recibido: 25/10/2025

Aceptado: 10/12/2025

Publicado: 30/12/2025

#### RESUMEN

Este artículo compara la calidad de dos maderas plásticas comerciales en Quito: madera plástica de origen virgen (WPC) y reciclada (WPCR). Se fabricaron probetas según ISO 2818 y se realizaron ensayos de compresión (ASTM D6108), humedad (BS EN 322) y absorción (ASTM D570). Para humedad y absorción se usaron  $n = 3$  por material; compresión con  $n = 1$ . WPC mostró mayor resistencia a compresión (38.342 MPa) y módulo de elasticidad (1,280.900 MPa) frente a WPCR (22.024 MPa; 742.910 MPa), mientras que WPCR presentó fallas más dúctiles, menor variabilidad en absorción (CV 4.29% vs 39.17%) y humedad (CV 17.18% vs 21.21%). Debido al bajo tamaño muestral en compresión, las conclusiones mecánicas son preliminares. Se recomienda aumentar réplicas y priorizar la consistencia (CV) en control de calidad.

**Palabras clave:** WPC; WPCR; ASTM D6108; Calidad; Materiales compuestos; Coeficiente de variación.

#### ABSTRACT

This study evaluates the quality of two commercial plastic woods in Quito: virgin plastic wood (WPC) and recycled plastic wood (WPCR). Test specimens were prepared in accordance with ISO

2818, and compression (ASTM D6108), moisture (BS EN 322), and water absorption (ASTM D570) tests were performed. For moisture and absorption,  $n = 3$  specimens per material were tested, while for compression only  $n = 1$  was used. Results indicate that WPC exhibited higher compressive strength (38.342 MPa) and modulus of elasticity (1,280.900 MPa) compared to WPCR (22.024 MPa; 742.910 MPa). In contrast, WPCR displayed more ductile failure behavior and lower variability in absorption (CV 4.29% vs. 39.17%) and moisture (CV 17.18% vs. 21.21%). Given the limited sample size in the compression tests, the mechanical findings should be regarded as preliminary. It is therefore recommended to increase the number of replicates and to emphasize consistency (CV) as a key parameter in quality control.

**Index terms:** WPC; WPCR; ASTM D6108; Quality; Composite materials; Coefficient of variation.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los materiales compuestos de madera plástica (WPC, por sus siglas en inglés Wood-Plastic-Composite) han experimentado un crecimiento significativo como alternativa sostenible en la industria de la construcción, combinando fibras lignocelulósicas con matrices termoplásticas para crear productos con propiedades mecánicas competitivas y menor impacto ambiental (Mital'ová et al., 2024). Esta tecnología representa una solución innovadora al problema de la gestión de residuos plásticos y la reducción de la explotación sobre los recursos forestales naturales, aspectos cada vez más críticos en el contexto urbano actual.

El Distrito Metropolitano de Quito, como una de las principales ciudades del Ecuador, genera volúmenes considerables de residuos plásticos que requieren alternativas de aprovechamiento más allá de la disposición tradicional en vertederos (Jijón, 2023). La transformación de estos desechos en insumos útiles de construcción, como la madera plástica, ha demostrado ser una estrategia de economía circular con potencial técnico y comercial en diversas aplicaciones (Burgstaller et al., 2023). Sin embargo, para lograr una ejecución efectiva de estos materiales en proyectos constructivos, se requiere el establecimiento de sistemas de control de calidad que garanticen la consistencia y confiabilidad de sus propiedades.

Estudios recientes indican resultados sorprendentes en el comportamiento de materiales WPC de origen reciclado comparados con fabricados a partir de materias primas vírgenes. Oliveros et al. (2024) concluyen que un buen proceso de reciclaje mejora la calidad de la matriz polimérica, por otra parte, Jian et al. (2022) destacan la importancia de la consistencia de las propiedades físicas y mecánicas por medio de indicadores de calidad, estableciendo así una mayor importancia sobre los valores absolutos de resistencia mecánica. Estos hallazgos ponen en duda las percepciones tradicionales sobre la calidad de materiales reciclados y sugieren la necesidad de desarrollar metodologías de evaluación más completas.

El problema central radica en la falta de sistemas estandarizados de control de calidad para materiales WPC disponibles comercialmente en el mercado ecuatoriano. Khoaele et al. (2023) señalan que las propiedades de los materiales compuestos varían de tal manera que representan

un obstáculo para su uso general en aplicaciones estructurales. Esta situación empeora por la falta de bases de evaluación que tomen en cuenta la consistencia estadística de las propiedades de los materiales alternativos.

El control de calidad en materiales compuestos va más allá de la simple verificación de valores mínimos de resistencia, requiriendo un enfoque integral que evalúe la homogeneidad y predictibilidad del comportamiento del material (Ramesh et al., 2022). Los coeficientes de variación se han convertido en herramientas estadísticas fundamentales para cuantificar la consistencia, permitiendo establecer criterios objetivos de aceptación y rechazo de lotes de producción. La implementación de este método estadístico en el contexto de ensayos para materiales compuestos reciclados representa una contribución significativa al desarrollo de la industria ecuatoriana de construcción.

La relevancia de esta investigación se fundamenta en la necesidad urgente de establecer marcos técnicos de referencia que permitan incorporar de manera segura y confiable la madera plástica a proyectos de construcción locales. Sommerhuber et al. (2020) demostraron que los materiales compuestos producidos a partir de materiales reciclados pueden ofrecer ventajas ambientales y técnicas superiores, pero su adopción requiere sistemas de control de calidad que garanticen su desempeño a largo plazo. Esta investigación contribuye al llenar esta brecha de conocimiento mediante la evaluación rigurosa de materiales disponibles comercialmente y la propuesta de metodologías de control adaptadas al contexto local.

El objetivo principal de este estudio consiste en desarrollar un sistema de evaluación de calidad para materiales de madera plástica mediante análisis de consistencia basado en coeficientes de variación, utilizando ensayos físicos y mecánicos normalizados aplicados a materiales comerciales disponibles en el Distrito Metropolitano de Quito. Esta investigación se propone establecer parámetros cuantitativos de control que permitan distinguir entre materiales de calidad aceptable y aquellos que requieren ajustes en sus procesos de fabricación o composición.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Metodología

La presente investigación se desarrolló mediante un método experimental con enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo) de tipo correlacional, aplicando un diseño experimental que permite el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de la madera plástica bajo condiciones controladas de laboratorio de temperatura  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  y humedad  $50 \pm 5\%$ . Se empleó un muestreo no aleatorio intencional, seleccionando deliberadamente especímenes de dos tipos de materiales compuestos: madera plástica (WPC) y madera plástica de origen reciclado (WPCR). La metodología contempla la preparación de probetas según ISO 2818:2018, seguida de la ejecución de ensayos mecánicos de compresión bajo la norma ASTM D6108-24 y ensayos físicos de humedad y absorción según BS EN 322-94 y ASTM D570-22 respectivamente. Los datos obtenidos fueron procesados mediante análisis estadístico, permitiendo la determinación de parámetros

críticos como la resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, contenido de humedad y capacidad de absorción, con el objetivo de establecer un sistema de control de calidad que garantice estándares técnicos apropiados para la aplicación de estos materiales en la industria de la construcción.

## **2.2. Materiales**

Se trabajó con madera plástica fabricada a partir de materias primas vírgenes (WPC) y fabricada a partir de material reciclado (WPCR), esta última está compuesta por un 70% de plásticos polímeros como polietileno (PE), polipropileno (PP) y PVC. El porcentaje restante contempla fibras vegetales o lignocelulósicas como harina de madera, aserrín y cascara de arroz. Se desconoce la composición exacta del material WPC, pero en base a diversas investigaciones se estima un 30% de matriz polimérica con polietileno de alta y baja densidad (PEAD, PEBD), PP y tereftalato de polietileno (PET), un 50% de aserrín como fibra de refuerzo y un 20% de materiales aglutinante o aditivos (López et al., 2014).

**Figura 1.**

*Materiales compuestos empleados: WPC (izquierda) y WPCR (derecha).*



## **2.3. Preparación de las probetas**

El dimensionamiento y tolerancia de cada probeta dependerá del ensayo a realizar, el método de preparación viene regido por la norma ISO 2818:2018 “Plásticos – Preparación de especímenes de prueba por maquinado”. El material utilizado fue adquirido directamente del fabricante y se cortó en secciones para fabricar las probetas de los distintos ensayos, para el ensayo de compresión se utilizó el punto 6.5 de la norma “acabado de extremos”, establece el uso de máquinas como fresadoras, tornos y cepilladoras de preferencia con cuchillas o fresas de un solo filo de corte de acero rápido (HSS), acero templado o diamante. Para los ensayos físicos no se requiere probetas con medidas específicas según sus normas respectivas, por ello se utilizó el punto 6.2 de la norma para preparación de especímenes rectangulares por aserrado. Parámetros y condiciones de mecanizado se especifican en la Tabla 1.

**Tabla 1.***Parámetros de mecanizado según ISO 2818:2018*

Material	Método de maquinado	Geometría	Número de dientes	Parámetros de corte				
				Diámetro (mm)	(z)	Velocidad de corte (m/min)	Velocidad de avance (m/min)	Refrigerante
Termoplásticos	Aserrado		-	-		3 a 15	Mediano	Ninguno
Termoestables	Fresado		60 a 80	1		50 a 250	0.07 a 2	Aire o agua

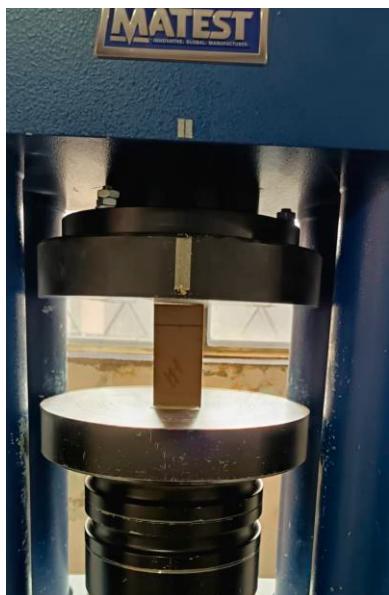
#### 2.4. Ensayo de compresión

La evaluación de la madera plástica para usos estructurales se realizó mediante el ensayo de compresión tomando en cuenta la norma ASTM D6108-24 como guía de procedimientos para determinar la resistencia y el comportamiento elástico-plástico del material. Se trabajó con probetas en su estado original de manufactura siendo perfiles de sección circular o cuadrada, únicamente se mecanizarán los extremos para cumplir con una tolerancia de 1/300 veces la longitud total de la probeta. Esta longitud viene determinada por el área transversal del material manufacturado, estableciendo una relación del doble de su ancho o diámetro tal como se menciona en el apartado 6.2 de la norma. Ambos materiales presentaron geometría prismática tal como se evidencia en la Figura 1, con un espesor mínimo medio de 52.50 mm para la madera plástica elaborada con materias vírgenes (WPC) y de 67.95 mm para la madera plástica de origen reciclado (WPCR).

Se trabajó con una máquina universal de compresión (MATEST C170PN214) calibrada a una velocidad de 0.03 mm/min durante un periodo estimado de 5 minutos tal como lo indica el apartado 9.2 de la norma, la máquina cuenta con compresómetro y un sistema de recolección de datos. La norma establece dos métodos para realizar el ensayo, el primer método para determinar la fuerza de compresión o esfuerzo en un punto de deformación dada y el segundo método para determinar la gráfica esfuerzo-deformación, para nuestro estudio se procederá con el segundo método. El procedimiento empezó midiendo el ancho, espesor o diámetro con una precisión del 1 % en varios puntos para calcular el valor del área de sección transversal, de igual manera medir la longitud inicial en varios puntos. Luego se colocará la probeta en la línea de centro de los platos de compresión asegurándose de estar ambos en paralelo, de igual manera se colocó el compresómetro para empezar a aplicar carga con la velocidad mencionada anteriormente hasta que la probeta falle o se alcance el porcentaje de deformación del 3 %.

**Figura 2.**

Máquina de ensayo universal de compresión Matest



Se registraron datos como carga máxima, resistencia máxima, umbral de deformación, gradiente y área. El primer valor a determinar será la resistencia a la compresión, siendo el punto de mayor esfuerzo y punto de fractura en la probeta. El esfuerzo se calculó de la siguiente manera.

$$\sigma = \frac{\text{Carga (N)}}{\text{Área (mm}^2\text{)}} \quad (1)$$

Para estimar la rigidez del material en un rango específico de carga, se calcula el módulo secante, definido como la pendiente de la recta entre el 0 % y el 1 % de deformación en la gráfica esfuerzo-deformación. El módulo secante es un parámetro especialmente útil para materiales con zonas elásticas no lineales, como lo es la madera plástica, este parámetro permite cuantificar la rigidez promedio del material en un rango inicial de carga.

$$\text{Módulo secante} = \frac{\sigma_{1\%} - \sigma_{0\%}}{\varepsilon_{1\%}} \quad (2)$$

A diferencia del módulo secante, el módulo de elasticidad toma la región inicial de deformación para determinar la rigidez en la zona elástica. Debido a inconformidades al momento de realizar el ensayo como alineamiento de platos o holguras en las probetas, la recopilación de datos empieza con una carga elevada en una deformación del 0 %. Esto representa un problema analítico para determinar el módulo de elasticidad y es por ello que la norma ASTM D6108-24 establece un concepto de *TOE compensation*, graficando una recta tangente al segmento constante de la curva entre las deformaciones del 0 % y 1 %, se toma la relación entre el esfuerzo y la deformación como módulo de elasticidad.

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{\sigma_{n\%}}{\varepsilon_{n\%}} \quad (3)$$

## 2.5. Ensayos de humedad y absorción

La humedad presente y la capacidad de absorción del material compuesto fueron determinados por las normas BS EN 322-94 “Determinación de contenido de humedad para compuestos derivados de madera” y la norma ASTM D570-22 “Método de prueba estándar para la absorción de agua de plásticos”. Para ambos ensayos se utilizó un horno industrial capaz de ser controlado a  $103 \pm 2$  °C y  $50 \pm 3$  °C, para el enfriamiento se utilizó un desecador con gel de sílice capaz de absorber la humedad presente en el ambiente. Se pesó antes y después de cada fase con una balanza analítica de precisión 0.01 gr.

**Figura 3.**

*Horno industrial de laboratorio con termostato*



Como establece el punto 5.2 de la BS EN 322-94 no se requiere probetas con dimensiones específicas, únicamente deben cumplir con un peso mínimo de 20 gr y estar libre de rebabas o polvos. El procedimiento empezó con un pesaje de las probetas antes del secado en horno, una vez dentro se calentaron hasta llegar a la temperatura designada, posteriormente se enfriaron en un desecador hasta llegar a temperatura ambiente para ser pesadas nuevamente, todo este proceso se repitió hasta alcanzar un punto de masa constante donde su peso no difirió más del 0.1 % en intervalos de 6 horas.

Durante el ensayo de humedad se registraron los pesos de las probetas en las diferentes fases, obteniendo un peso inicial antes del secado y un peso final después del enfriado calculando así el porcentaje de humedad presente.

$$H = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{final}} \times 100 \quad (4)$$

El ensayo de absorción de agua se realizó de acuerdo a la norma ASTM D570-22. Las probetas fueron sumergidas completamente en agua destilada durante un periodo de 24 horas  $\pm$  30 minutos, transcurrido dicho periodo se eliminó el exceso de agua superficial con un paño y se efectuó el primer pesaje. El acondicionamiento posterior a la inmersión se realizó de acuerdo al punto 6.1.2 de la norma, para muestras cuyos valores de absorción no se ven afectados por temperaturas de 110 °C se secarán en un horno a dicha temperatura durante 1 hora. Acabado el acondicionamiento se enfriaron en un desecador hasta llegar a la temperatura ambiental y se realizó el segundo pesaje. Se determinó el incremento de peso de la siguiente manera.

$$\text{Incremento (\%)} = \frac{m_{\text{húmeda}} - m_{\text{acondicionado}}}{m_{\text{acondicionado}}} \times 100 \quad (5)$$

Durante la inmersión de las probetas en agua, parte de la materia puede disolverse o desprenderse, lo que genera variaciones en la masa y puede afectar la precisión de los resultados. Esta fracción del material que se disuelve se conoce como materia soluble, y su determinación permite evaluar la estabilidad de la probeta frente a la acción del agua. Según la norma ASTM D570, el reacondicionamiento consiste en someter las probetas al mismo tiempo y temperatura del secado original, enfriarlas en un desecador y volver a pesarlas, de modo que la diferencia nos permita cuantificar la materia soluble y ajustar el cálculo de absorción de agua.

$$\text{Materia soluble (\%)} = \frac{m_{\text{acondicionado}} - m_{\text{reacondicionado}}}{m_{\text{acondicionado}}} \times 100 \quad (6)$$

## **2.6. Análisis de la calidad**

La evaluación de la calidad de ambos materiales compuestos se realizó mediante un análisis de consistencia basado en herramientas estadísticas de control de calidad, aplicando el coeficiente de variación (CV) como indicador principal de la homogeneidad y reproducibilidad de las propiedades físicas y mecánicas obtenidas. Para los ensayos de compresión, debido al tamaño limitado de la muestra ( $n=1$ ), se implementó un análisis comparativo directo entre WPC y WPCR, evaluando las diferencias porcentuales en resistencia, módulo de elasticidad y módulo secante, complementando con el análisis cuantitativo de las curvas esfuerzo-deformación para determinar el comportamiento mecánico de cada material. Se entiende el coeficiente de variación como la proporción entre la desviación estándar sobre la media.

$$CV (\%) = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (7)$$

En los ensayos de humedad y absorción, con un tamaño de muestra  $n=3$  por material, se aplicó un análisis de consistencia utilizando criterios de clasificación basados en el coeficiente de variación como se observa en la Tabla 2, permitiendo evaluar la variabilidad interna de cada material y establecer parámetros de control de calidad. Estos umbrales se adoptaron siguiendo investigaciones en compuestos poliméricos, que consideran  $CV < 10\%$  como alta reproducibilidad,  $10 - 25\%$  como buena/aceptable y valores  $> 25\%$  como indicativos de variabilidad relevante (Azizan et al., 2021; Brito et al., 2019; Taheri et al., 2025).

**Tabla 2.***Índices CV*

<b>CV</b>	<b>Descripción</b>
< 10 %	Excelente
10 – 15 %	Muy consistente
15 – 25 %	Consistente
> 25 %	Poco consistente

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Caracterización física de los materiales

Los materiales compuestos presentaron diferencias notables en sus características físicas y dimensionales. El material WPC mostró una coloración uniforme con acabado homogéneo, mientras que el material WPCR mostró características típicas de materiales reciclados. Ambos materiales mantuvieron geometría prismática rectangular según se observa en la Figura 1.

Las dimensiones de las probetas utilizadas para el ensayo de compresión se presentan en la Tabla 3. El material WPC presentó dimensiones de 53.00 x 32.70 x 105.00 mm, mientras que el WPCR mostró dimensiones de 68.00 x 67.20 x 135.90 mm. La diferencia en el área transversal fue significativa, siendo de 1733.10 mm para WPC y 4569.60 mm para WPCR, representando un incremento del 163.60 % en el área de sección transversal del material reciclado.

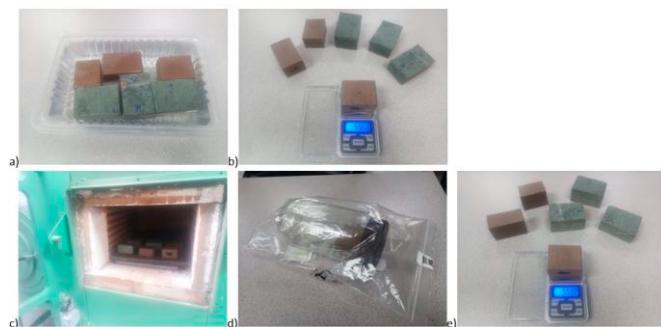
**Tabla 3.***Dimensiones generales probetas ensayo de compresión*

<b>Material</b>	<b>Largo</b> <b>(mm)</b>	<b>Ancho</b> <b>(mm)</b>	<b>Altura</b> <b>(mm)</b>	<b>Área transversal</b> <b>(mm)</b>	<b>Masa</b> <b>(kg)</b>	<b>Densidad</b> <b>(kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>WPC</b>	105.00	53.00	32.70	1733.10	0.148	813.30
<b>WPCR</b>	135.90	68.00	67.20	4569.60	0.528	850.23

Las probetas para el ensayo de humedad y absorción fueron preparadas como especímenes rectangulares con peso mínimo de 20 gramos según las especificaciones normativas, manteniendo superficies libres de rebabas y contaminantes que pudiera afectar los resultados experimentales.

**Figura 4.**

*Proceso del ensayo de humedad a (inmersión), b (pesaje inicial), c (secado), d (deseccando) y e (pesaje final).*



### **3.2. Ensayo de compresión**

Los ensayos de compresión se realizaron bajo la norma ASTM D6108-24, obteniendo curvas de esfuerzo deformación completas para ambos materiales durante 5 minutos. Se generaron dos representaciones gráficas: la Figura 3 enfocada en determinar el módulo secante y el módulo de elasticidad entre el 0 % y el 3 % de deformación, y la Figura 4 representa el comportamiento completo del material hasta la finalización del ensayo. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

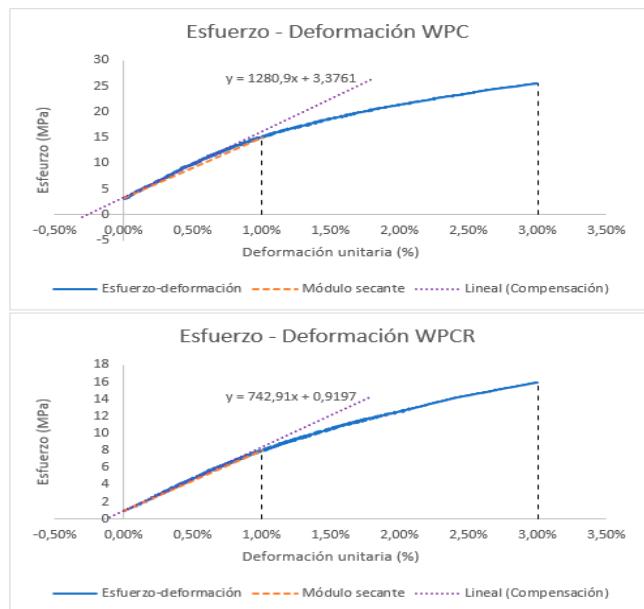
**Tabla 4.**

*Propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de compresión*

Material	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Módulo secante (MPa)
<b>WPC</b>	38.342	1280.900	1187.641
<b>WPCR</b>	22.024	742.910	704.569

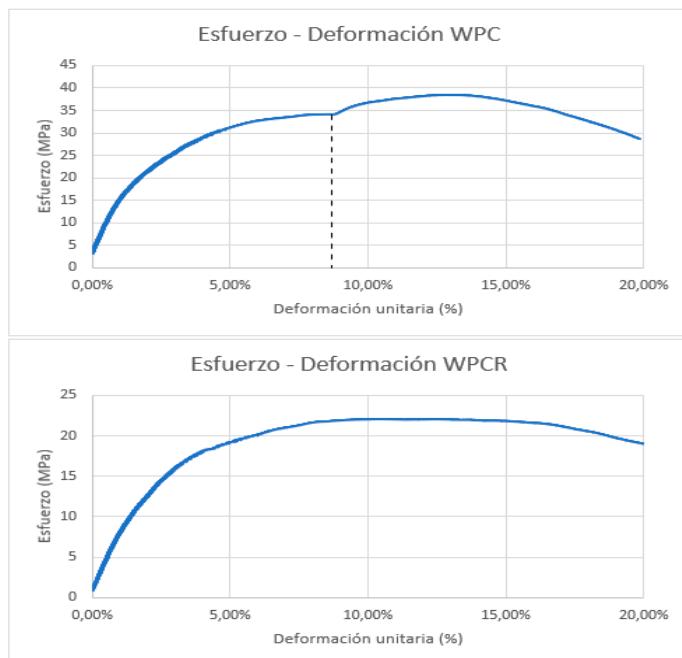
**Figura 3.**

*Curvas esfuerzo-deformación hasta el 3 % de deformación para el cálculo de módulos elástico y secante*



**Figura 4.**

Curvas esfuerzo-deformación completas durante 5 minutos de ensayo



La resistencia máxima de compresión registrada fue 38.342 MPa para el material WPC y

22.024 MPa para el WPCR, representando una diferencia del 42.56 % entre ambos materiales. En las curvas esfuerzo deformación completas mostraron que el WPC alcanzó su resistencia máxima y posteriormente experimentó falla súbita, mientras que el WPCR mantuvo capacidad de carga residual después del punto de resistencia máxima. El cálculo de módulos de elasticidad y secante se realizaron aplicando los conceptos de TOE compensation de la norma ASTM D6108-24 para compensar holguras iniciales en el montaje de la probeta al inicio del ensayo.

### **3.3. Ensayo de humedad**

En la Tabla 5 se muestran los valores de masa inicial y masa final registrados en el ensayo de contenido de humedad por cada muestra WPC y WPCR, así mismo el porcentaje de humedad presente (H). Todas las muestras presentaron valores bajos de humedad entre el 0.05 % y el 0.08 %, con una media de 0.07 % para el material WPC y un 0.06 % para el WPCR.

**Tabla 5.**

*Datos obtenidos del ensayo de contenido de humedad*

Valor	WPC			WPCR		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
<b>M inicial</b>	59.79	52.47	55.36	91.75	80.18	85.46
<b>M final</b>	59.76	52.43	55.32	91.69	80.14	85.40
<b>H (%)</b>	0.05%	0.08%	0.07%	0.07%	0.05%	0.07%

### **3.4. Ensayo de absorción de agua**

Los resultados de absorción de agua por inmersión de 24 horas, acondicionamiento y reacondicionamiento de materia soluble se muestran en la Tabla 6. Para el material WPC, el porcentaje total de absorción varía entre 0.34 % y 0.77 % por muestra, con un aumento promedio inferior a 0.55 %. En el material WPCR, los incrementos por inmersión se dieron entre el 0.63 % y el 0.69 % con un promedio de 0.66 %, nótese que no se registró materia soluble perdida en dicho material.

**Tabla 6.**

*Datos obtenidos del ensayo de absorción de agua*

Valor	WPC			WPCR		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
<b>M húmeda</b>	60.24	52.61	55.60	92.36	80.73	85.96
<b>M acondicionada</b>	59.82	52.44	55.32	91.73	80.19	85.42
<b>M reacondicionada</b>	59.78	52.43	55.31	91.73	80.19	85.42

<b>Incremento (%)</b>	0.70%	0.32%	0.51%	0.69%	0.67%	0.63%
<b>Materia soluble (%)</b>	0.07%	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%
<b>Total (%)</b>	0.77%	0.34%	0.52%	0.69%	0.67%	0.63%

### 3.5. Evaluación de calidad

La evaluación de la calidad para los ensayos de humedad y absorción se realizó mediante el análisis de consistencia utilizando los coeficientes de variación (CV) como indicador de homogeneidad, aplicando los criterios de clasificación establecidos en la Tabla 2. Los resultados estadísticos se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.**

*Factores de confiabilidad para ensayos físicos*

VALOR	HUMEDAD		ABSORCIÓN	
	WPC	WPCR	WPC	WPCR
s	0.00014055	0.00010632	0.00213657	0.00028471
$\bar{x}$	0.00066267	0.00061869	0.00545482	0.00664123
CV (%)	21.21 %	17.18 %	39.17 %	4.29 %

En el ensayo de humedad, ambos materiales se clasificaron como “Consistente” según los criterios establecidos, con coeficientes de variación de 21.21 % para WPC y 17.18 % para WPCR. El material WPCR mostró menor variabilidad interna en este parámetro.

Para el ensayo de absorción, se observaron comportamientos contrastantes; el material WPC presentó un CV de 39.17 %, clasificándose como “Poco consistente”, mientras que el WPCR registró un CV de 4.29 %, alcanzando la clasificación “Excelente” en términos de homogeneidad.

Los resultados indican que el material WPCR presenta mayor consistencia en ambas propiedades físicas evaluadas, especialmente en la capacidad de absorción, donde demostró comportamiento homogéneo entre las probetas ensayadas. El material WPC mostró mayor variabilidad, particularmente en la absorción de agua, lo que podría indicar heterogeneidad en su composición o proceso de fabricación.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. Evaluación de propiedades mecánicas de compresión como indicadores de calidad

Los resultados obtenidos revelan diferencias significativas entre ambos materiales, con implicaciones directas en la evaluación de calidad. El material WPC registró una resistencia a la

compresión de 38.342 MPa, superior en un 42.56 % al material WPCR que alcanzó 22.024 MPa. Esta diferencia, aunque notable en términos absolutos, debe analizarse desde la perspectiva de control de calidad considerando que la consistencia y predictibilidad de las propiedades son tan importantes como los valores máximos alcanzados. Los módulos de elasticidad obtenidos (WPC 1280.900 MPa y WPCR 742.910 MPa) y los módulos secantes (WPC 1187.641 MPa y WPCR 704.569 MPa) muestran una tendencia similar a la resistencia, con el material virgen presentando mayor rendimiento.

El análisis de los modos de falla observados en la Figura 5 proporciona información valiosa sobre la calidad y el comportamiento estructural de ambos materiales. El material WPC presentó falla por lateral buckling, caracterizada por pandeo lateral sin deformación significativa del área transversal, lo que indica un comportamiento frágil con falla súbita una vez alcanzada la carga crítica. Este tipo de falla, aunque alcanza valores de resistencia superiores, representa menor predictibilidad desde la perspectiva de control de calidad.

**Figura 5.**

*Tipo de falla después del ensayo de compresión: WPC (izquierda) y WPCR (derecha).*



Por el contrario, el material WPCR experimentó falla por barreling, evidenciada por el ensanchamiento lateral y posterior agrietamiento central de la probeta. Este modo de falla indica un comportamiento más dúctil que permite deformaciones progresivas antes del colapso total, manteniendo capacidad de carga residual como se observó en las curvas esfuerzo deformación. Desde la perspectiva de control de calidad, el barreling representa un comportamiento más predecible y seguro para aplicaciones estructurales, ya que proporciona indicios visuales de falla inminente antes del colapso súbito.

#### **4.2. Análisis de consistencia en las propiedades físicas**

Los ensayos de humedad y absorción de agua proporcionan los indicadores más confiables de control de calidad debido al tamaño de muestra utilizado ( $n=3$ ), permitiendo un análisis estadístico completo mediante coeficientes de variación.

En el ensayo de contenido de humedad, ambos materiales demostraron comportamiento “Consistente” según los criterios de clasificación establecidos, con coeficientes de variación de 21.21 % para WPC y 17.18 % para WPCR. Los valores absolutos de humedad fueron significativamente bajos entre 0.06 % y 0.07 %, indicando estabilidad dimensional adecuada para ambos materiales. El material WPCR mostró ligeramente menor variabilidad, sugiriendo un mejor control de los procesos de fabricación.

El ensayo de absorción de agua demostró la diferencia más significativa en términos de control de calidad. El material WPCR alcanzó la clasificación “Excelente” con un coeficiente de variación de apenas 4.29 %, demostrando homogeneidad excepcional entre las probetas ensayadas. En contraste, el material WPC presentó un comportamiento “Poco consistente” con CV de 39.17 %, indicando alta variabilidad que compromete la predictibilidad del material en aplicaciones donde la absorción de agua es crítica.

La ausencia total de materia soluble en las probetas de WPCR (0.00 %) frente a las pequeñas pero variables pérdidas en WPC (0.02 – 0.07 %) constituye un indicador adicional de calidad superior del material reciclado. Esta característica sugiere mayor estabilidad química y cohesión interna de la matriz polimérica en el material WPCR, lo que se traduce en mayor durabilidad y resistencia a la degradación por exposición al agua.

Los resultados contradicen la percepción de que los materiales vírgenes presentan mayor homogeneidad que los reciclados, evidenciando que el material WPCR ofrece mayor consistencia en propiedades físicas críticas para el control de calidad.

#### **4.3. Sistema de evaluación de calidad basado en coeficientes de variación**

La implementación de coeficientes de variación como herramienta de control de calidad ha demostrado ser efectiva para evaluar la homogeneidad de los materiales compuestos estudiados. Los criterios de clasificación establecidos en la Tabla 2 proporcionan una base cuantitativa para la toma de decisiones en control de la calidad industrial, permitiendo categorizar objetivamente el desempeño de cada material.

Los resultados obtenidos indican un contraste significativo en cuanto a la calidad de los materiales de origen plástico, el material de origen reciclado (WPCR) supera considerablemente al material virgen (WPC) en términos de homogeneidad y confiabilidad. Esta superioridad se evidencia en el ensayo de absorción, donde WPCR alcanza clasificación de “Excelente” mientras que el material WPC se clasifica como “Poco consistente”. Este hallazgo desafía las percepciones tradicionales sobre la calidad de materiales reciclados y sugiere que los procesos de reciclado pueden contribuir inesperadamente a una mayor homogenización del producto final.

Este análisis crítico puede atribuirse a varios factores propios de los procesos de fabricación. En los materiales reciclados, el procesamiento térmico múltiple y la mezcla intensiva durante el reciclado pueden resultar en una distribución más uniforme de los componentes polímeros y las

fibras de refuerzo. Adicionalmente, la estandarización de la composición en procesos de reciclado industrial, donde se conoce exactamente el contenido de polímeros (70 %) y fibras vegetales (30 %), puede contribuir a un mejor control de las propiedades finales comparado con materiales vírgenes cuya composición puede presentar mayor variabilidad en el suministro de materias primas.

La aplicación del sistema de calidad basado en coeficientes de variación (CV) presenta ventajas considerables para establecer límites de aceptación cuantitativos, facilitando la comparación objetiva entre diferentes lotes de producción. Crea una base de retroalimentación para determinar la efectividad y competencia de los procesos de fabricación.

#### **4.4. Implicaciones para el control de calidad industrial**

Los resultados obtenidos en esta investigación proponen marcos sólidos para determinar un sistema de control de la calidad específico para materiales compuestos derivados de la madera. En base a los resultados obtenidos, se propone una metodología que priorice la consistencia de las propiedades sobre los valores absolutos, priorizando así la predictibilidad del comportamiento del material a largo plazo.

El ensayo de absorción de agua se establece como el parámetro crítico de control de calidad más efectivo, presentando la mejor capacidad de detectar variaciones en la homogeneidad del material. Basado en los criterios utilizados se recomienda establecer un límite máximo de variabilidad del 15 % para esta propiedad, los materiales que superen estos valores como se observó con el WPC (39.17 %), deberán ser rechazados o pasar por un reproceso de producción antes de su aceptación final.

Para un control rutinario de producción, se implementará un sistema de muestreo aleatorio con un número mínimo de 3 especímenes por lote, esto permitirá el cálculo preciso de los coeficientes de variación en los diferentes ensayos. Tomando en cuenta que el ensayo de contenido de humedad también se debe tomar como parámetro adicional con un límite del 25 % para asegurar la capacidad de resistencia a condiciones ambientales.

### **5. CONCLUSIONES**

Se establece un sistema de control de calidad basado en coeficientes de variación que priorice la consistencia sobre valores absolutos, implementando muestreo mínimo de  $n=3$  probetas por lote y utilizando absorción de agua como parámetro crítico de evaluación. Este enfoque contribuirá a la producción de materiales compuestos más confiables y seguros para aplicaciones en la industria de la construcción.

El material de origen reciclado (WPCR) demostró superioridad en términos de variabilidad, alcanzando clasificación “Excelente” en absorción de agua (CV 4.29 %) comparado con la clasificación “Poco consistente” del material virgen WPC (CV 39.17 %). Esta consistencia superior

del material reciclado se atribuye a los procesos de homogenización inherentes al reciclado industrial y al mejor control de composición durante su fabricación.

Los modos de falla observados proporcionaron información valiosa sobre comportamiento estructural: el material WPC presentó falla por lateral buckling con comportamiento frágil, mientras que WPCR experimentó falla por barreling con comportamiento dúctil y capacidad de carga residual. A pesar de que WPC alcanzó mayor resistencia a compresión (38.342 MPa vs 22.024 MPa), la superior predictibilidad del comportamiento de WPCR lo posiciona como opción más confiable para control de calidad industrial. Desde la perspectiva de seguridad estructural, el comportamiento dúctil del material reciclado representa ventajas significativas al proporcionar indicios de falla progresiva.

La presente investigación logró cumplir satisfactoriamente el objetivo planteado de garantizar y controlar la calidad de la madera plástica mediante la implementación de un sistema integral de evaluación basado en normativas ASTM D6108-24, BS EN 322-94 y ASTM D570-22. Los ensayos mecánicos de compresión y físicos de humedad y absorción, realizados bajo estrictos protocolos normalizados, permitieron establecer parámetros cuantitativos de calidad.

## 6. REFERENCIAS

- ASTM International. (2022). *Standard test method for water absorption of plastics* (ASTM D570-22). ASTM International.
- ASTM International. (2024). *Standard Test Method for Compressive Properties of Plastic Lumber and Shapes* (ASTM D6108-24). ASTM International.
- Azizan, A., Johar, M., Karam Singh, S., Abdullah, S., Koloor, S., Petrů, M., Wong, K., & Tamin, M. (2021). An Extended Thickness-Dependent Moisture Absorption Model for Unidirectional Carbon/Epoxy Composites. *Polymers*, 13(3), 440. <https://doi.org/10.3390/polym13030440>
- British Standards Institution. (1994). *Wood-based panels. Determination of moisture content* (BS EN 322:1994). BSI.
- Brito, M., Santos, W., Correia, B., Queiroz, R., Tavares, F., Oliveira, G., & Lima, A. (2019). Moisture Absorption in Polymer Composites Reinforced with Vegetable Fiber: A Three-Dimensional Investigation via Langmuir Model. *Polymers*, 11(11), 1847. <https://doi.org/10.3390/polym11111847>
- Burgstaller, C., & Renner, K. (2023). Recycling of Wood–Plastic Composites—A Reprocessing Study. *Macromol*, 3(4), 754-765. <https://doi.org/10.3390/macromol3040043>
- International Organization for Standardization. (2018). *Plastics — Preparation of test specimens by machining* (ISO 2818:2018). ISO.
- Jalilibal, Z., Amiri, A., Castagliola, P., & Chong, M. (2021). Monitoring the Coefficient of Variation: A Literature Review. *Computers & Industrial Engineering*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107600>
- Jian, B., Mohrmann, S., Li, H., Li, Y., Ashraf, M., Zhou, J., & Zheng, X. (2022). A Review on Flexural

- Properties of Wood-Plastic Composites. *Polymers*, 14(19), 3942.  
<https://doi.org/10.3390/polym14193942>
- Jijón, P. (2023). Sobre la gestión de residuos sólidos en quito. Una mirada desde y hacia las organizaciones de base. *Revista Cálamo*, 11, 111–113.  
<https://doi.org/10.61243/calamo.11.196>
- Khoaele, K., Gbadayan, O., Chunilall, V., & Sithole, B. (2023). A review on waste wood reinforced polymer composites and their processing for construction materials. *International Journal of Sustainable Engineering*, 16(1), 104–116.  
<https://doi.org/10.1080/19397038.2023.2214162>
- López, Y., Concepción, R., González, M., Martínez, E., & Álvarez, D. (2014). Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los tableros de madera plástica producidos en cuba respecto a los tableros convencionales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 20(3), 227–236.  
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.02.003>
- Mitařová, Z., Mitař, D., & Berladir, K. (2024). A Concise Review of the Components and Properties of Wood-Plastic Composites. *Polymers*, 16(11), 1556.  
<https://doi.org/10.3390/polym16111556>
- Oliveros, C., Cumbalaza, E., Mina, J., Valencia, M., Suarez, J., & Martinez, N. (2024). Wood Plastic Composite Based on Recycled High-Density Polyethylene and Wood Waste (Sawdust). *Polymers*, 16(22), 3136.  
<https://doi.org/10.3390/polym16223136>
- Ramesh, M., Rajeshkumar, L., Sasikala, G., Balaji, D., Saravanakumar, A., Bhuvaneswari, V., & Bhoopathi, R. (2022). A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects. *Polymers*, 14(3), 589.  
<https://doi.org/10.3390/polym14030589>
- Taheri, F., Chowdhury, S., & Ghiaskar, A. (2025). Comparison of the Performance of Basalt Fiber-Reinforced Composites Incorporating a Recyclable and a Conventional Epoxy Resin. *Polymers*, 17(10), 1348.  
<https://doi.org/10.3390/polym17101348>
- Sommerhuber, P., Wenker, J., Rüter, S., & Krause, A. (2020). Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying environmental impact drivers. *Journal of Cleaner Production*, 144, 348-357.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.012>