

**PROPUESTA PARA LA VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS POLIMÉRICOS
GENERADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE
BOGOTÁ – PLMB CON ENFOQUE A LA ECONOMÍA CIRCULAR CASO: MADERA
PLÁSTICA**

**LILIANA ISABEL MOLINA GONZÁLEZ
LUDWIN ALBERTO RUÍZ PINEDA**

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD**

**DIRECTOR:
OSCAR CHAMARRAVI GUERRA
INGENIERO METALÚRGICO
MAGÍSTER EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD
BOGOTÁ D.C.**

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre

Firma del director

Nombre

Firma del Presidente Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá D.C., marzo de 2024.

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica

Dra. Maria Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director de Programa

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

A mi hija, quien es el motor de mi vida, a mi esposa que desde la tierra y ahora desde el cielo me impulsó en este proceso a mis padres y hermanos por su apoyo. Este trabajo es el resultado de muchos sacrificios y horas de esfuerzo. Con él, quiero honrar su presencia en mi vida y agradecerles por hacer posible esta meta tan importante para mí.

Ludwin Alberto Ruiz Pineda

A mis padres quienes partieron a la vida eterna, dejando atrás un legado de compromiso y fraternidad que siempre será recordado. Me siento agradecida por haber tenido la fortuna de tenerlos, y de haber aprendido tanto. Su ejemplo de dedicación y amor a los demás ha dejado una huella imborrable en mi corazón y en aquellos que los conocieron. Hernando Molina Murcia y Lucrecia González Pachón, gracias por haber sido los mejores padres.

Siempre estarán en mi corazón.

Liliana Isabel Molina González

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la posibilidad de enfrentar este reto, a mi esposa (QEPD) e hija por su amor y comprensión en los momentos en que estuve inmerso en este proyecto, a mis padres por siempre creer en mí, a Liliana Molina compañera y maestra por ser guía y apoyo y al Ingeniero Oscar Chamarravi por aportar todos sus conocimientos y experiencia en la construcción de este trabajo.

Ludwin Alberto Ruiz Pineda

A Dios y a la Santísima Virgen por su presencia en mi vida, siendo guía, sabiduría bendición, amor y protección para alcanzar mis metas y enfrentar los desafíos que se presentan en mi camino. A mi familia por su comprensión, apoyo, su amor y aliento me sostienen y me dan la fuerza para continuar. A Ludwin Ruiz por su apoyo incondicional en todo momento, su presencia y ayuda han sido fundamentales; al Ing. Oscar Chamarravi por su disposición, aporte y cooperación con su experiencia y conocimiento y finalmente a los docentes de la Universidad América, por su empeño y constancia para la obtención de resultados.

Liliana Isabel Molina González

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1. Antecedentes	12
<i>1.1.1. Estado del arte</i>	12
1.2. Justificación	18
1.3. Objetivos	20
<i>1.3.1. Objetivo General</i>	20
<i>1.3.2. Objetivos Específicos</i>	21
2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	22
2.1. Lugar y Descripción del Proyecto	22
2.2. Métodos de Análisis Documental o Experimental	23
<i>2.2.1 Inventario y matriz de propiedades mecánicas y físicas de los residuos poliméricos del proyecto PLMB</i>	23
<i>2.2.2 Comparar los parámetros fisicoquímicos y mecánicos de la madera natural y plástica con base a la información obtenida en la revisión bibliográfica.</i>	25
<i>2.2.3 Matriz de caracterización de los procesos y selección del método para la elaboración de la madera plástica obtenida con Polímeros y reforzados con fibra natural.</i>	25
<i>2.2.4 Determinación de costos de la madera natural y de la madera plástica</i>	26
3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS	27
3.1. Matriz de caracterización y selección de los residuos poliméricos del proyecto de construcción Propiedades físico-mecánicas.	27
<i>3.1.1. Inventario de Residuos Poliméricos</i>	27
<i>3.1.2. Matriz de propiedades físico-mecánicas de residuos poliméricos del proyecto PLMB</i>	29
3.2. Comparar los parámetros fisicoquímicos y mecánicos de la madera natural y plástica con base a la información obtenida en la revisión bibliográfica	33
3.3. Matriz de caracterización de los procesos y selección del método para la elaboración de la madera plástica obtenida con Polímeros y reforzados con fibra naturales	37

3.3.1 <i>Proceso de Extrusión</i>	44
3.3.1. <i>Proceso de Extrusión</i>	45
3.4. Costos de la Madera Natural y de la Madera Plástica	46
3.4.1. <i>Costos asociados a la producción de madera plástica en el Proyecto PLMB</i>	48
4. CONCLUSIONES	57
5. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	58
REFERENCIAS	60
GLOSARIO	67
ANEXOS	70

LISTAS DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Inventario de residuos poliméricos.	27
Tabla 2 Matriz de propiedades físicas y mecánicas de residuos poliméricos.	30
Tabla 3 Matriz de parámetros fisicoquímicos y mecánicos de la madera natural y plástica.	34
Tabla 4 Caracterización de Procesos.	39
Tabla 5 Cotizaciones de madera natural	46
Tabla 6 Cotizaciones de madera plástica	47
Tabla 7 Comparación de ofertas de máquinas extrusoras	48
Tabla 8 Costos maquinaria y equipo	50
Tabla 9 Inversión Inicial	53
Tabla 10 Descripción de costos de operación	54

RESUMEN

Este proyecto tiene como finalidad desarrollar una propuesta para la valorización de los residuos poliméricos que surgen durante la construcción de la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB), presentando una alternativa sostenible para la gestión de estos desechos. La propuesta se centra en la producción de compuestos de madera y plástico, conocidos en inglés como Wood Plastic Composites (WPC), utilizando específicamente los residuos de polímeros generados en las actividades de construcción de la PLMB.

Para lo cual se realizó una revisión integral del estado del arte a través de diferentes fuentes bibliográficas correspondientes a los compuestos de madera plástica (WPC), se elaboró una matriz de caracterización y selección de los residuos poliméricos del proyecto de construcción, comparación de los parámetros fisicoquímicos y mecánicos de la madera natural y plástica, analizando los procesos y métodos para la elaboración de madera plástica obtenida con polímeros y reforzada con fibras naturales y por último determinar los costos asociados a la producción de madera plástica.

Se concluye que el HDPE, PEBD, PET y el PP son las opciones más apropiadas para integrar en la producción de madera plástica, dado su ajuste a las características y propiedades de los materiales investigados. Además, se determina la extrusión como el método más eficiente para la elaboración de madera plástica, siendo la tecnología más utilizada y generando mejores características mecánicas y físicas en los compuestos resultantes.

Además de identificar los beneficios económicos derivados de la producción interna de madera plástica, los resultados de esta investigación aportarán beneficios significativos tanto al proyecto en cuestión como a la industria de la construcción en general. La propuesta no solo proporciona una solución práctica y respetuosa con el medio ambiente, sino que también contribuye a la creación de un producto funcional, sostenible y con una demanda en constante aumento.

Palabras Clave: polímeros, infraestructura vial, extrusión, post consumo, gestión de residuos

INTRODUCCIÓN

La creación y desarrollo de proyectos de infraestructura de gran envergadura, como la Primera Línea de Metro de Bogotá (PLMB), plantean grandes desafíos en términos de selección de materiales y sostenibilidad ambiental. Este estudio se centra en valorar significativamente los residuos poliméricos en la construcción, con un enfoque particular en la madera plástica como una solución innovadora y prometedora en reemplazo de la madera natural.

El proyecto sobre la PLMB se destaca, como un hito en la infraestructura colombiana, marcando más de siete décadas de planificación y desarrollo (Roa, 2016). Este trabajo de grado se enmarca en la búsqueda de una solución que responda a los estándares de calidad exigidos en la construcción de una obra de tal magnitud, sino que también aborda las crecientes preocupaciones sobre la sostenibilidad ambiental.

La investigación se apoya en una extensa revisión bibliográfica y análisis de datos, incluyendo investigaciones previas sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los diversos polímeros generados comparados con las características de maderas naturales usadas en la construcción. Además, se consideran las preferencias de uso de actores claves en el proyecto PLMB, como contratistas y subcontratistas, quienes desempeñan un papel vital en la selección de materiales de construcción. Así mismo, esta indagación explorará las propiedades de los materiales, los procesos de producción y los aspectos económicos para la producción de madera plástica en el contexto del proyecto PLMB, con el objeto de proporcionar una base sólida para la toma de decisiones.

La propuesta se fundamenta en la combinación de estudios científicos y datos técnicos, y aspira a contribuir no solo al éxito del proyecto PLMB sino también a la creciente conciencia y aplicación de prácticas de construcción sostenibles en proyectos similares a nivel nacional e internacional. En un mundo dónde la preservación de los recursos naturales y la reducción de la huella ambiental son imperativos, buscar soluciones innovadoras.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

1.1.1. Estado del arte

La evolución del plástico comenzó utilizando biopolímeros o materiales procedentes de la naturaleza con características elásticas, como lana, almidón o caucho, para posteriormente descubrir los plásticos sintéticos como elementos de fabricación barata y funcional que se han convertido con el paso del tiempo en materias primas icónicas para la economía moderna por su notable gama propiedades y numerosas ventajas, siendo productos básicos en nuestro estilo de vida actual (Bottet, 2019).

Con una producción mundial de plásticos que puede duplicarse los próximos 20 años es de esperarse que la sociedad y la industria aumenten progresivamente su nivel de consumo y con ello la generación de residuos, contaminando el entorno a una que la naturaleza no es capaz de asumir, esto sumado a la inadecuada disposición final y el desconocimiento de los métodos de reciclaje representa una desmesurada acumulación de residuos plásticos sin tratamiento (Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company, 2016).

Colombia no es ajena al aumento en la fabricación y consumo de resinas plásticas. La capacidad instalada en el país para la producción pasó en toneladas, de 1.360 mil en 2018 a 1.365 mil en 2020, lo anterior sin que sectores económicos públicos o privados lideren una agenda de sostenibilidad con acciones que agilicen la transición hacia la economía circular minimizando el impacto en la naturaleza (Acoplásticos, 2017).

La principal problemática ambiental generada por estos residuos son sus largos periodos de degradación, aunque este tiempo depende del tipo de plástico y las condiciones ambientales a las que se expone su descomposición puede tardar hasta 600 años (Greenpeace, 2013). Sin embargo, debido a estos atributos de durabilidad combinados con la facilidad de procesamiento y costos se considera el plástico relevante en la promoción de la sostenibilidad como parte de una economía circular.

Por otra parte, el sector de la construcción genera una gran huella ecológica debido al excesivo uso de recursos naturales no renovables, el inadecuado manejo de los residuos y a la utilización de productos no degradables. Estos últimos podrían ser reemplazados por elementos de plásticos reciclados sin comprometer la calidad y los estándares de seguridad; esta práctica se evidencia a nivel internacional, dónde los proyectos de construcción están promoviendo el uso de materiales e insumos de residuos plásticos (Calderón & Sotelo, 2021).

Directamente en esta industria existen diversas aplicaciones para estos materiales dónde se reincorporan a los procesos productivos de diferentes maneras, como la Casa de Plástico de Lionel Schein obra considerada por diversos autores como la primera casa diseñada y construida en 1955 enteramente con plásticos o la casa del futuro Monsanto diseñada por los arquitectos de Marvin Goody y Richard Hamilton en 1957, cuyo exterior de la vivienda fue desarrollado completamente en plástico sobre una estructura metálica interna (Bottet, 2019).

En Colombia, Fernando Llanos Gónima en 2010 por ejemplo, registró la patente de fabricación del Brickarp, un bloque arquitectónico de plástico reciclado con el cual es posible construir viviendas, utilizando como materia fuente el plástico reciclado, que después de un proceso de transformación permite obtener ladrillos de madera plástica. Por esta iniciativa en 2012, recibió el Premio Internacional de Dubái a las buenas prácticas. Para una vivienda de 45m² solo se necesita 6500 kg de plástico reciclado y un tiempo de construcción de 10 días (Garzón et al., 2016).

Otra alternativa para dar valor a los residuos poliméricos es la llamada madera plástica que según la American Society for Testing and Materials (ASTM) el término aplica a los productos con características similares a las de la madera fabricados principalmente con plástico (con o sin aditivos). La mayoría de los productos de madera plástica del mercado se fabrican a partir de polietileno, en particular polietileno de alta densidad (HDPE), pero pueden obtenerse utilizando polímeros como el polipropileno (PP), el poliestireno (PS) y el policloruro de vinilo (PVC), o bien mezclas de diferentes residuos plásticos con otros compuestos orgánicos (Santos et al., 2018).

Para diferenciar la madera plástica que contiene residuos orgánicos de la que está formada por otros constituyentes se ha usado el idioma inglés:

- **Plastic lumber:** Está constituida exclusivamente por material plástico, ya sea reciclado o nuevo, puede consistir en un solo tipo de polímero o en la combinación de varios. Generalmente, se opta por el uso de materiales termoplásticos y se incorporan aditivos como estabilizantes UV, lubricantes y agentes espumantes. Estos aditivos desempeñan roles clave al facilitar la homogeneización de la mezcla, mejorar las propiedades del material, proteger al polímero de factores externos y facilitar el proceso de moldeo. El resultado de este proceso son piezas que logran simular la apariencia de la madera natural (Dias & Alvarez, 2016).
- **“Wood plastic composite” (WPC):** El término "composite" se utiliza específicamente para describir materiales compuestos que tienen una matriz polimérica, diferenciándolos de aquellos que emplean otros tipos de matrices. En el contexto de los "Wood Plastic Composites" (WPC), generalmente, se trata de la combinación de plástico reciclado con residuos de madera, dosificada de manera que se logre mejorar las propiedades mecánicas del nuevo material resultante. En este proceso, se suelen agregar diversos aditivos como agentes de acoplamiento, retardantes de llama, fungicidas, espumantes, antioxidantes, estabilizantes UV, lubricantes, entre otros (Santos et al., 2018).

En Colombia y América Latina la producción de madera plástica es menor en comparación con países de Europa, Asia o Norteamérica; En 2019, el tamaño del mercado mundial de WPC se calculó en 5,3 billones de dólares, y se proyecta que aumentará en un 11,4% para 2027 (Chowdhury et al., 2022). En general en todo el mundo se han empezado a conocer las bondades y beneficios del material, por lo cual va ganando terreno y compite con el precio de la madera natural, presentando ventajas en cuanto a resistencia a los agentes degradativos, facilidad de moldeo y producción.

En México estudiantes del Instituto Tecnológico de Mexicali desarrollaron una investigación con un compuesto entre polietileno tereftalato (PET) de post consumo y paja de trigo para la elaboración de madera plástica, el material obtenido de estos dos desechos no presenta poros, se puede: taladrar, lijar, pulir, cortar con sierra manual o eléctrica, por lo que, puede utilizarse para la elaboración de mesas, sillas, bibliotecas, escritorios, entre otras aplicaciones (García et al., 2013).

Un estudio similar a los anteriores fue realizado por Facultad de Ingeniería de la Universidad de Bío-Bío, Concepción, Chile dónde evaluaron las propiedades mecánicas de materiales compuestos de madera (*pino radiata*) y plásticos reciclados (polietileno de alta densidad). El polímero se espumó con un agente químico ACA (azodicarbonamida). Se concluyó que al aumentar la concentración de fibra aumentaron las propiedades físico-mecánicas del compuesto a excepción de la tenacidad que al incorporar el agente espumante disminuyó ligeramente (Moreno et al., 2013).

En el año 2014 un grupo de Investigadores del Departamento de Ciencias Forestales, Facultad Agroforestal de Montaña, Universidad de Guantánamo, Cuba, realizaron una evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los tableros de madera plástica producidos respecto a los tableros convencionales (tablero de partículas de bagazo de caña, tablero contrachapado y tablero de fibras de bagazo de caña), concluyendo que dadas sus propiedades, se considera que los tableros de madera plástica (WPC) son capaces de sustituir a los convencionales en condiciones de intemperie proporcionando mejores propiedades físico-mecánicas, en características como humedad, absorción de agua, carga a la flexión, tracción y compresión. Dichas propiedades sugieren la utilidad del tablero de madera plástica como material para la construcción (Martínez et al., 2014). En China realizaron una comparación de cuatro tipos de fibras lignocelulósicas (FL), a saber, las procedentes del abeto chino (*Cunninghamia lanceo lata*), pino rojo de Taiwán (*Pinus taiwanensis*), trema de la India (*Trema orientalis*) y bambú makino (*Phyllostachys makinoi*) y el bambú makino (*Phyllostachys makinoi*), se seleccionaron como refuerzos y se incorporaron a polietileno de alta densidad (HDPE) para fabricar compuestos de madera y plástico (WPC) mediante un proceso de prensado plano. El resultado obtenido fue que el rendimiento y las propiedades de la WPC se ven afectadas por las especies lignocelulósicas (Hung et al., 2017).

Igualmente, estudios de la Universidad Federal de Espírito Santo en Brasil evaluaron las propiedades ignífugas de tableros de madera plástica elaborados a partir de residuos madereros y termoplásticos reciclados (polietileno de baja y alta densidad, tereftalato de polietileno y polipropileno) los ensayos fueron realizados bajo la norma UNE-EN 13823 (Reacción al fuego de productos de construcción) concluyendo que los tableros de WPC tienen buenas propiedades

físico-mecánicas e ignífugas, los parámetros de reacción al fuego permiten clasificarlo como B-S1, d0 (Martínez et al., 2018).

Investigadores con el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia realizaron un estudio experimental mediante ensayos de simulación sobre el comportamiento sísmico de los muros de madera plástica reciclada (RLP), las principales conclusiones del trabajo determinaron la capacidad de las paredes para disipar energía cuando están sujetas a ciertas cargas y sismos fuertes y destructivos, además indicaron que parámetros estructurales de los muros de (RLP) como rigidez elástica amortiguamiento, coeficiente de disipación y resistencia máxima, son necesarios para diseñar viviendas de acuerdo al código de diseño sísmico (Herrera et al., 2018).

La facultad de Ingeniería y arquitectura de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca presentó un proyecto de investigación para fabricar uniones estructurales en Madera Plástica basados en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Concluyeron que estos elementos son capaces de reemplazar el acero en estructuras de la construcción, utilizando polietileno de alta densidad reciclado (Josaga et al., 2020).

El Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid realizó una comparación del análisis de ciclo de vida y valoración económica para 200 estibas construidas con madera natural (*Gmelina arborea Roxb*) y madera plástica (100% PET) destacando de esta investigación los resultados del análisis de costos indicando que es mucho más económico producir una estiba de madera plástica que de madera natural (Vanegas et al., 2021).

Respecto a las propiedades de mecanizado de este tipo de productos fue presentado en la Universidad Forestal de Nanjing (China) un trabajo sobre cómo mejorar la maquinabilidad de la madera plástica en particular, los efectos del fresado con cortadores de carburo, investigando las fuerzas de corte, la temperatura de corte, la calidad de la superficie, la formación de virutas y el desgaste de la herramienta el estudio indicó que comprender los efectos que tienen los procesos de mecanizado en los productos WPC es fundamental, no solo para crear productos de mejor calidad, sino también para mejorar la vida útil de la herramienta,

la investigación describe parámetros óptimos de corte, taladrado, cepillado, torneado y fresado (Zhu et al., 2022).

Nyika & Dinka (2022), destaca que la incorporación de plásticos reciclados en la construcción representa una alternativa viable para sustituir los materiales convencionales. Dichos plásticos reciclados pueden transformarse en diversos productos, entre ellos la madera plástica (WPC). Esta aplicación no solo tiene el potencial de reducir el consumo de recursos naturales, sino también de minimizar la generación de residuos (Nyika & Dinka, 2022). Este enfoque de economía circular desempeña un papel fundamental en el desarrollo de proyectos destinados a transformar plásticos en el sector de la construcción en Colombia (Calderón & Sotelo, 2021).

Durante el año 2021, en la operación del Metro de Medellín, se gestionaron un total de 14,5 toneladas de residuos plásticos, los cuales fueron enviados para su transformación en briquetas. Estos elementos, debido a sus propiedades energéticas, pueden ser aprovechadas como combustible en hornos cementeros, lo que contribuye a la reducción de emisiones, información reportada en la memoria de sostenibilidad del año 2021 (Metro Medellín, 2021).

Los antecedentes relacionados con la producción y aplicación de madera plástica destacan elementos fundamentales que afectan directamente el éxito y la sostenibilidad del proyecto. Las variables identificadas abarcan desde las especificaciones técnicas de la madera plástica hasta los procesos de producción, pasando por los costos y la comparación con materiales tradicionales que pueden ser sustituidos. Las condiciones del mercado emergen como un factor determinante, influyendo en las estrategias necesarias para posicionar de manera competitiva la madera plástica. Es esencial considerar estas variables al desarrollar estrategias y tomar decisiones informadas para asegurar la viabilidad y el crecimiento sostenible del proyecto.

Los estudios investigativos consultados de manera concluyente evidencian la factibilidad de reintegrar polímeros plásticos reciclados en los procesos de construcción de obras civiles, especialmente a través de alternativas como la obtención de madera plástica. Esta conclusión se respalda al considerar sus propiedades como; Resistencia, durabilidad, maquinabilidad y

economía, en comparación con los materiales tradicionales utilizados en la industria de la construcción.

Además, se destaca el potencial significativo de la madera plástica, proyectando un crecimiento continuo en los próximos años, impulsado por el interés general en contribuir al manejo adecuado de residuos plásticos y la reducción de la deforestación, contribuyendo directamente a la mitigación del impacto ambiental.

1.2. Justificación

Según el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), en el año 2017 se registró una pérdida total de 219,973 hectáreas de bosque natural (IDEAM, 2018). Esto representa un aumento del 23% en la superficie deforestada a nivel nacional en comparación con el año 2016 (IDEAM, 2018).

Según datos recopilados en el informe de monitoreo a la deforestación en Colombia, durante el año 2017, las principales causas de la deforestación a nivel nacional incluyeron la praderización, la ganadería extensiva, los cultivos de uso ilícito, el desarrollo de infraestructura vial, la extracción ilícita de minerales y la extracción de madera (IDEAM, 2017)

Por otra parte, de acuerdo con el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) “la producción de artículos de plástico en Colombia aumenta anualmente entre 5 y 6 % de los cuales solo el 7% se recicla, el 93% restante termina acumulado en los rellenos sanitarios o se arroja a las montañas, los valles, y los ríos.

Según el informe de sistema de indicadores ambientales, de sostenibilidad y economía circular del DANE, en la sección de presión en los ecosistemas por la disposición de residuos, se reportaron 9,008 toneladas de residuos plásticos dispuestos por la industria en el año 2018 (Valencia & del DANE de Colombia, 2021)

El continuo crecimiento del consumo de polímeros lleva a la generación de residuos y sus efectos ambientales, incluye la saturación de sitios de disposición final, según el Departamento Nacional de Planeación (DNP) diariamente a los rellenos sanitarios en Bogotá llegan aproximadamente 6.300 toneladas de residuos de los cuales muchos son aprovechables (Departamento Nacional Planeación, 2022). Lo anterior indica que la mayoría de los residuos poliméricos generados en la construcción de obras civiles tiene la capacidad de ser reutilizados a través de diferentes técnicas de reincorporación o transformación, pero en su gran mayoría no se aprovechan de manera efectiva.

Por lo anterior es importante plantear un proyecto que contribuya a la disminución del impacto ambiental ocasionado por las problemáticas mencionadas. El propósito a través de esta investigación es presentar una alternativa para valorizar los materiales poliméricos plásticos generados en una obra de la magnitud de la Primera Línea del Metro de Bogotá, que, según datos del Concesionario, en los informes de proyección de residuos en las diferentes etapas del proyecto, puede llegar a producir aproximadamente 1200 kilogramos mensuales de Residuos plásticos en la etapa de construcción. Estos materiales son altamente aprovechables con potencial para su transformación en materias primas incorporables a los procesos de la organización, lo que permite crear un modelo de economía circular que disminuya los impactos ambientales por su inadecuada disposición final.

La propuesta busca obtener los siguientes beneficios desde lo ambiental, social y económico:

- La investigación busca una alternativa para disminuir la deforestación de bosques, además los rellenos sanitarios de la ciudad dejarán de recibir una carga importante de residuos plásticos.
- Mostrar a diferentes grupos de interés involucrados en estos proyectos materiales alternativos para la construcción de obras civiles a costos razonables aportando a la conservación de los ecosistemas.

- Generar nuevos puestos de trabajo con capacidades y formación en manejo de residuos, este personal será el encargado de materializar la propuesta.
- La Reducción de costos de producción derivados del desperdicio de recursos; ejemplo, el reciclaje de residuos poliméricos y el control de desechos.
- El Aumento de la reputación e imagen, la empresa y el proyecto busca consolidarse ante la comunidad, clientes y entidades gubernamentales como una compañía con alto sentido de responsabilidad Ambiental, esta iniciativa puede mostrar los esfuerzos que está haciendo el Concesionario Metro Línea 1 en ese sentido.
- Estimular la innovación en empresas del sector, se busca que empresas de la industria de la construcción puedan tomar como ejemplo esta iniciativa hacia la creación de nuevos procesos y productos ambientalmente amigables.

Por lo anterior, con la investigación se pretende ayudar a la sociedad con una visión innovadora como alternativa de valorización de residuos plásticos, igualmente aportar en la disminución del impacto ambiental producido por estos materiales generados en las obras de infraestructura, ofreciendo una reutilización que permita aprovechar al máximo las propiedades y beneficios de estos polímeros.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Estructurar una propuesta para la valorización de los residuos poliméricos generados en la Construcción de la PLMB, con enfoque en la economía circular, para la obtención de madera plástica.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar por medio de una matriz los residuos poliméricos generados en la construcción de la PLMB.
- Definir condiciones técnicas para la propuesta de valorización de residuos poliméricos generados en la Primera Línea del Metro de Bogotá.
- Seleccionar la alternativa apropiada para la transformación de los residuos poliméricos en madera plástica.
- Determinar los costos asociados de la propuesta para la valorización de residuos poliméricos generados en los procesos constructivos de la PLMB, para la producción de madera plástica bajo el enfoque de economía circular.

2.2.Métodos de Análisis Documental o Experimental

La investigación se desarrollará en 4 etapas con el fin de cumplir con los objetivos propuestos:

- Inventario y matriz de propiedades mecánicas y físicas de los residuos poliméricos del proyecto PLMB.
- Comparar los parámetros fisicoquímicos y mecánicos de la madera natural y plástica. con base a la información obtenida en la revisión bibliográfica.
- Matriz de caracterización de los procesos y selección del método para la elaboración de la madera plástica obtenida con Polímeros y reforzados con fibra naturales.
- Determinación de costos de la madera natural y de la madera plástica.

2.2.1 Inventario y matriz de propiedades mecánicas y físicas de los residuos poliméricos del proyecto PLMB

En esta etapa de la metodología investigativa, se llevó a cabo en dos fases:

La primera mediante un inventario integral de los residuos poliméricos generados en el proyecto se desarrolló mediante visitas de campo y recopilación de información documental proporcionada por el Concesionario. Esta iniciativa se posiciona como una herramienta estratégica que no solo permite conocer la cantidad actual y proyectada de estos materiales, sino también su tipología y origen.

El inventario, se centra en los principales tipos de residuos poliméricos presentes en el proyecto PLMB, así como en las cantidades actuales y proyectadas de cada material. Este análisis abarca el periodo comprendido entre abril de 2022 y abril de 2023, proporcionando una visión específica de la generación de residuos durante la etapa de construcción, con proyecciones para los próximos 5 años, La clasificación de los residuos poliméricos se presenta de manera clara, indicando los usos predominantes o los productos de los cuales provienen. Asimismo, se detallan las cantidades

generadas actualmente y las proyectadas para cada tipo de material, con una proyección promedio mensual específica para la etapa de construcción.

La segunda fase involucró la creación de una matriz de caracterización y selección de los residuos poliméricos en el proyecto PLMB, específicamente centrándonos en sus propiedades físicas y mecánicas con información recopilada en antecedentes bibliográficos.

En primer lugar, se consideraron las propiedades mecánicas de los residuos, tales como resistencia a la tensión, resistencia al impacto, resistencia a la tracción, resistencia a la compresión y módulo de elasticidad. Estos parámetros proporcionan una comprensión clara de la capacidad estructural y las características físicas de cada tipo de polímero en estudio para su uso en obras de infraestructura.

Simultáneamente, se examinaron las propiedades físicas, abordando aspectos como densidad, absorción de agua, punto de fusión y conductividad térmica. Estos datos son fundamentales para comprender la versatilidad y aplicabilidad de cada polímero en diferentes contextos, así como su comportamiento ante condiciones específicas.

Es importante destacar que la información presentada en la tabla se basa en valores referenciales de las propiedades físico-mecánicas, obtenidos de fuentes especializadas como CAMPUS®, un sistema de información sobre materiales para la industria del plástico.

Este enfoque sistemático en la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los residuos poliméricos no solo proporciona un panorama detallado de la diversidad de materiales presentes en el proyecto PLMB, sino que también establece una base sólida para la toma de decisiones informadas en cuanto a su gestión y aprovechamiento sostenible.

2.2.2 Comparar los parámetros fisicoquímicos y mecánicos de la madera natural y plástica con base a la información obtenida en la revisión bibliográfica.

Esta etapa se ejecutó mediante la comparación de parámetros fisicoquímicos y mecánicos de tres especies de madera natural utilizadas en el sector de la construcción en Colombia, eucalipto, pino caribe y acacia, estos datos han sido evaluados por Céspedes & Gaitán (2020), los valores se han contrastado con los resultados de cuatro proyectos de investigación sobre las propiedades de la madera plástica, referenciados como (Jiang et al., 2020), (López et al., 2014), (Moreno et al., 2013), (Isaza et al., 2022), y (Redhwi et al., 2023) que mediante un análisis comparativo, se pudieron obtener perspectivas valiosas sobre las propiedades y el rendimiento de estas dos categorías de materiales en contextos de construcción y otras aplicaciones.

Los datos se han dispuesto de manera organizada en una matriz que clasifica las propiedades en categorías esenciales para evaluar la idoneidad de un material destinado a las condiciones de una obra de construcción. Estas categorías incluyen propiedades mecánicas como resistencia al impacto, flexión, compresión paralela, tracción y tensión; propiedades físicas como contenido de humedad y densidad; y propiedades químicas como resistencia a ácidos, álcalis y sales. Cada dato específico se respalda con referencias científicas precisas, lo cual garantiza la validez y confiabilidad integral de la información presentada.

2.2.3 Matriz de caracterización de los procesos y selección del método para la elaboración de la madera plástica obtenida con Polímeros y reforzados con fibra natural.

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica, explorando el estado actual de los procesos relacionados con la fabricación de madera plástica. Esta revisión se detalló utilizando una matriz de caracterización que identificó y analizó los procesos más relevantes. Estos hallazgos fueron fundamentales para establecer la secuencia óptima de los procesos involucrados en la producción de madera plástica

Vinculando las tecnologías de producción y las variables como temperatura, presión y resistencia, permitiendo obtener información más detallada y específica sobre la producción de madera plástica reciclada, facilitando así la comprensión y optimización de la línea de producción. Igualmente se relacionaron los procesos involucrados en la elaboración de madera plástica con residuos poliméricos y fibras naturales.

2.2.4 Determinación de costos de la madera natural y de la madera plástica

La determinación de costos se llevó a cabo mediante la identificación de las especificaciones técnicas de la madera natural más utilizada en el proyecto de construcción de la PLMB actualmente. Se solicitaron cotizaciones a tres proveedores diferentes de este producto, y dichas cotizaciones se consolidaron en una tabla. Asimismo, sobre especificaciones similares, se solicitaron tres cotizaciones a proveedores de madera plástica, las cuales también se tabularon. Esta información proporciona datos del precio en el mercado por kilogramo de cada material. Adicionalmente, se identificó la inversión inicial requerida para la producción de madera plástica en el proyecto y se determinó el costo de producción por kilogramo de WPC producida en el proyecto. Este valor se compara y analiza con los datos del precio en el mercado por kilogramo de madera plástica y madera natural.

Además, se lleva a cabo una evaluación financiera incluyendo indicadores como Tiempo de Recuperación de la Inversión (TRI), Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Aunque estos indicadores son positivos, se realizan recomendaciones y proponen estrategias como la optimización de costos, la reducción de la inversión inicial, el aumento de ingresos y la mejora de la eficiencia operativa para fortalecer la viabilidad del proyecto a largo plazo.

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos de los análisis realizados mediante la información realizada a través de las matrices de caracterización y análisis costos y demás información para la elaboración de madera plástica.

3.1. Matriz de caracterización y selección de los residuos poliméricos del proyecto de construcción Propiedades físico-mecánicas.

3.1.1. Inventario de Residuos Poliméricos

Por medio de visitas de campo e información suministrada por el Concesionario se desarrolló un inventario de los residuos poliméricos generados en la PLMB, como una herramienta que permite conocer la cantidad actual y proyectada, el tipo y el origen de estos materiales.

El inventario facilitó la toma de decisiones para el aprovechamiento sostenible de estos materiales, la prevención de la contaminación y la promoción de la economía circular.

Tabla 1

Inventario de residuos poliméricos.

Inventario residuos poliméricos del proyecto PLMB				
Residuos Poliméricos en el Proyecto PLMB		Cantidades Actuales / Cantidades Proyectadas de Material		
Tipo	Principales usos y/o Residuos generados en el Proyecto	Cantidades generadas actuales en kg. (abril 2022 a abril 2023)	Cantidades de generación proyectadas en kg. (5 años etapa de construcción)	Proyección promedio mensual en kg. (Etapa de Construcción)
PET o PETE (Tereftalato de Polietileno)	Envases de botellas de Bebidas, envases de Productos químicos, otros embalajes.	498,9	15604,5	260
HDPE o PEAD (Polietileno de Alta Densidad)	Envases de químicos, residuos de señalización, residuos de elementos de protección personal.	766	23959	399,3
	Residuos extraídos en procesos conducción de redes húmedas y secas, residuos de elementos de	179	5599	93,3

Inventario residuos poliméricos del proyecto PLMB

Residuos Poliméricos en el Proyecto PLMB		Cantidades Actuales / Cantidades Proyectadas de Material		
Tipo	Principales usos y/o Residuos generados en el Proyecto	Cantidades generadas actuales en kg. (abril 2022 a abril 2023)	Cantidades de generación proyectadas en kg. (5 años etapa de construcción)	Proyección promedio mensual en kg. (Etapa de Construcción)
PVC o V (Cloruro de polivinilo)	protección personal y Señalización.			
LDPE o PEBD (Polietileno de Baja Densidad)	Envolturas de materiales, equipos, alimentos, elementos desechables, cinta de señalización y plástico Negro.	853,7	26702	445
PP (Polipropileno)	Residuos de señalización Tubos, mallas, Envases de bebidas y productos químicos.	217,8	6812	113,5
PS (Poliestireno)	Residuos de aislante térmico en tuberías, espumas de protección, Residuos de menaje para transporte de alimentos.	545	17046	284,2
Total		3,060	95,522	1,595

Nota: La tabla anterior presenta una visión detallada de los tipos de residuos poliméricos y las cantidades generadas en el proyecto PLMB. Estos datos se han extraído de la información proporcionada por el Concesionario a cargo del proyecto. En el Anexo 1 se adjunta una declaración de residuos que respalda el acceso a estos datos. Tomado de: Metro Línea 1. (2023).

Las cifras proyectadas han sido derivadas mediante el uso de una macro en Excel, tomando en consideración diversos parámetros. La obtención de estas proyecciones se basa en los siguientes factores:

- **Tasa de Generación Inicial:** Se fundamenta en datos extraídos de informes mensuales ambientales comprendidos entre abril de 2022 y abril de 2023.
- **Tasa de Crecimiento de Trabajadores:** Representa el porcentaje estimado por la empresa para el incremento del número de trabajadores durante los primeros tres años de la etapa de construcción, alineado con los cronogramas del proyecto.

- **Tasa de Crecimiento de Frentes:** Indica el crecimiento porcentual de las actividades constructivas en cada frente de trabajo durante los primeros tres años de operación.
- **Tasa de Decrecimiento de Trabajadores:** Refleja el porcentaje mediante el cual la empresa reduce sus actividades constructivas y disminuye el número de trabajadores en los últimos dos años de la etapa de construcción.







El Anexo 2 acompaña este documento, presentando tabla de formulación utilizado para la obtención de los datos proyectados a los 5 años de la etapa de construcción. Este cuadro proporciona una transparencia adicional sobre la metodología empleada en la generación de las cifras proyectadas.

3.1.2. Matriz de propiedades físico-mecánicas de residuos poliméricos del proyecto PLMB

La tabla 2, identifica las propiedades físico-mecánicas específicas de los residuos generados en el proyecto de construcción PLMB. Esta herramienta facilitó la evaluación de las características clave de estos residuos, permitiendo su selección en función de su idoneidad para aplicaciones específicas, como la producción de madera plástica lo que puede ayudar a optimizar la calidad del producto final y a maximizar la eficiencia en la valorización de estos residuos.

Tabla 2

Matriz de propiedades físicas y mecánicas de residuos poliméricos.

Matriz de propiedades mecánicas y físicas de los residuos poliméricos del proyecto PLMB									
Tipo de Residuos Poliméricos	Propiedades Mecánicas				Propiedades Físicas				
	Resistencia a la tensión (Mpa)	Resistencia al impacto Kj/m ²	Resistencia a la tracción Mpa	Resistencia a la compresión (Mpa)	Módulo de elasticidad (Módulo de Young) (Mpa)	Densidad (g/cm ³)	Absorción de agua (%)	Punto de fusión (°C)	Conductividad térmica W/(m*K)
Tereftalato de Polietileno  PET	59 – 72	3,6	50 – 80	76 - 128	2800-3100	1,34 -1,39	0,16	244 – 254	0,24
Polietileno de Alta Densidad  PEAD	20 – 40	20	2.2 – 3	18.6 – 24,8	1070-1090	0,95 – 0,96	0,01 – 0,05	130 – 137	0,46 – 0,50
Cloruro de polivinilo  PVC	20-60	30 -100	45 – 75	50 - 95	1500-3500	1,15 – 1,35	0,1 – 0,4	80 – 85	0,14 – 0,19
Polietileno de Baja Densidad  PEBD	20-40	180	13 – 26	10.8 -17	172 – 283	0,91 – 0,94	0,015	98 – 115	0,32 – 0,34
Polipropileno  PP	30-45	30 -150	27 – 41	25 - 55	896 -1550	0,89 – 0,91	0,03	150 – 175	0,11 – 0,16
Poliestireno  PS	30-70	1,5 a 10	30 – 70	30 - 50	1500-3000	1,04	0,2 – 0,4	70 a 115	0,03 – 0,04

Nota: Esta tabla presenta los valores de referencia de las propiedades físico-mecánicas de los polímeros con identificación de reciclaje del 1 al 6. Tomado de: CAMPUS®: un sistema de información sobre materiales para la industria del plástico, [En Línea], (Rocha Álvarez et al., 2020) Disponible: <https://www.campusplastics.com/campus/scatterplot;> <https://www.reciclamapres.com/post/como-identificar-el-pl%C3%A1stico>

La matriz de propiedades mecánicas y físicas presenta una valiosa información sobre estas características de los polímeros utilizados en la etapa de construcción de la PLMB, estos como materiales de desecho pueden ser potenciales materias primas para obtención de nuevos productos. A continuación, se analiza la información en cuanto a cómo estas propiedades podrían influir en su aplicación en una obra de construcción, soportada por estudios como Awoyera & Adesina (2020) y Rocha *et al* (2020).

- **Tereftalato de Polietileno:** El tereftalato de polietileno (PET) destaca por su alta resistencia a la tensión y al impacto, lo que lo hace adecuado para elementos estructurales que requieren soportar cargas considerables y potenciales impactos. Su alta densidad y módulo de elasticidad también lo convierten en un candidato para aplicaciones de mayor exigencia estructural. Sin embargo, su absorción de agua relativamente baja sugiere que podría ser más resistente a la humedad y la degradación en comparación con otros polímeros (Awoyera & Adesina, 2020).
- **Polietileno de Alta Densidad:** El polietileno de alta densidad (HDPE) exhibe una buena resistencia al impacto y baja absorción de agua. Estas características podrían ser beneficiosas en aplicaciones donde se requiere una resistencia duradera y una menor susceptibilidad a la humedad, como en tuberías, revestimientos de agua y elementos de construcción expuestos a condiciones ambientales variables (Awoyera & Adesina, 2020).
- **Cloruro de Polivinilo (PVC):** El PVC presenta una amplia variabilidad de propiedades, lo que lo hace adecuado para diversas aplicaciones en la construcción. Su resistencia a la tensión y al impacto podría ser útil en componentes estructurales y elementos de protección. La baja absorción de agua y su densidad moderada lo hacen apropiado para aplicaciones en ambientes húmedos o corrosivos (Awoyera & Adesina, 2020).
- **Polietileno de Baja Densidad:** El polietileno de baja densidad (LDPE) destaca por su alta resistencia al impacto y absorción de agua mínima. Estas propiedades podrían ser valiosas en áreas donde la durabilidad y la resistencia a la humedad son esenciales, como en revestimientos impermeables y aplicaciones de aislamiento (Awoyera & Adesina, 2020).

- **Polipropileno:** El polipropileno (PP) ofrece una buena combinación de propiedades mecánicas y una baja absorción de agua. Estas características pueden ser útiles en una variedad de aplicaciones, como en elementos estructurales ligeros, cubiertas y componentes resistentes a la intemperie (Awoyera & Adesina, 2020).
- **Poliestireno:** El poliestireno (PS) puede ser adecuado para aplicaciones en la construcción donde la resistencia al impacto no es la principal consideración, como en componentes aislantes y revestimientos. Su bajo peso y conductividad térmica podrían ser beneficiosos en aplicaciones de aislamiento térmico (Awoyera & Adesina, 2020).

Los resultados expuestos en la matriz proporcionan una perspectiva completa de las propiedades inherentes a los polímeros generados, así como de su posible influencia en su aplicación en proyectos de construcción. Tal como se resalta Jawaid *et al* (2023), la adaptabilidad, versatilidad y las propiedades específicas, tanto físicas como mecánicas, de los polímeros les confieren un papel sumamente beneficioso en la formulación de soluciones alternativas con productos como la madera plástica en la construcción (Jawaid et al., 2023).

Rocha *et al* (2020). Destaca que el uso extendido del Cloruro de Polivinilo (PVC) ha generado inquietudes significativas debido a sus posibles impactos negativos en la salud humana y el medio ambiente. Esto radica en los componentes tóxicos asociados con el PVC, como los ftalatos, que han sido vinculados a una serie de problemas de salud, desde trastornos de desarrollo hasta abortos involuntarios. Además, cuando el PVC se somete a altas temperaturas puede liberar cloruro de hidrógeno (HCl) y compuestos orgánicos clorados, aumentando los riesgos para la salud (Rocha et al., 2020).

En cuanto al Poliestireno (PS), puede contaminarse fácilmente con restos de alimentos o residuos, lo que complica su procesamiento o reciclaje, generando impactos ambientales adversos. Este material, se considera peligroso y se ha asociado con problemas negativos para la salud tanto en la producción como en la fase de descomposición (Rocha et al., 2020).

Por lo anterior, se puede establecer que, en concordancia con las características y propiedades de los materiales investigados, el HDPE, PEBD, PET y el PP se perfilan como las alternativas más adecuadas para incorporar en la fabricación de madera plástica, en conformidad con los criterios esenciales para su aplicación en proyectos de infraestructura. Además, esta elección toma en consideración las posibles cantidades de generación de residuos, así como el cumplimiento de requisitos tanto de propiedades físico-mecánicas como de reciclabilidad.

La viabilidad de emplear estos polímeros en el ámbito de la construcción ha sido respaldada por Rocha *et al* (2020); Los análisis realizados en este estudio han evidenciado que dichos materiales exhiben una notable resistencia mecánica ante ensayos de compresión y flexión, consolidando así su potencial aplicabilidad en el sector de la construcción (Rocha et al., 2020).

3.2. Comparar los parámetros fisicoquímicos y mecánicos de la madera natural y plástica con base a la información obtenida en la revisión bibliográfica

La madera natural y la madera plástica son dos materiales que se utilizan para distintas aplicaciones en la construcción, el diseño y la industria. La madera natural es un material orgánico, heterogéneo, higroscópico, anisótropo y poroso, que se obtiene de los árboles y que presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas que varían según la especie, el clima y la dirección de la fibra. La madera plástica es un material sintético, homogéneo, hidrófobo, isotrópico y compacto, que se obtiene de la mezcla de polímeros y fibras naturales o sintéticas, y que presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas que dependen de la composición, el proceso y el tratamiento del material. La comparación de parámetros fisicoquímicos y mecánicos de la madera natural y plástica permite evaluar las ventajas y desventajas de cada material, así como su potencial de uso en obras civiles (Céspedes & Gaitán, 2020).

Este estudio realiza una comparación específica entre estos dos materiales teniendo en cuenta, las cantidades que madera natural que consumen las obras de construcción y el impacto ambiental que esto genera, destacando que la madera plástica puede sustituir otros materiales utilizados en obras civiles como plástico, virgen, aluminio, aglomerados de madera, entre otros

Tabla 3

Matriz de parámetros fisicoquímicos y mecánicos de la madera natural y plástica.

Comparación de parámetros Fisicoquímicos y Mecánicos de la Madera Natural con Madera Plástica (WPC)								
Propiedades	Especie de Madera Natural			Estudios de Propiedades Madera Plástica WPC				
	Eucalipto	Pino caribe	Acacia	PEAD, PEBD, PP, PET (Reciclados) Aserrín <i>Pinus caribaea</i>	PEAD (Reciclado) Fibra de madera de <i>Pinus radiata</i>	PP (Reciclado) Bagazo de Maíz Sorgo y Caña	PVC PP (Reciclado) Paja de Sorgo	
Mecánicas	Resistencia al Impacto (J/cm ²)	De 8 a 12	De 8,6 a 18,1	De 10 a 12	-	19,33	-	4,9
	Flexión (Mpa)	70,07	42,29	59,29	17,53	-	38	71,2
	Compresión (Mpa)	12,5	15,64	9,41	138	-	-	-
	Tracción (Mpa)	80	50	85	28	380	-	42,9
	Tensión (Mpa)	13,1	10,1	12,2	-	-	25	-
Físicas	Contenido de humedad (%)	15	14	19	4,13	-	-	-
	Densidad (g/cm ³)	0,97	0,45	0,72	1,050	0,998	-	-
Químicas	Resistencia ácidos Resistencia Alcalis Sales	La madera exhibe resistencia moderada a los ácidos y buena resistencia a los álcalis	Es menos resistente a los ácidos en comparación con otras maderas duras	La madera muestra buena resistencia al ácido sulfúrico y al ácido clorhídrico diluido, la resistencia al ácido nítrico es moderada.	-	-	-	Buena resistencia al uso en el Mar pruebas con exposición a (Solución de agua desionizada con NaCl, Salinidad del 3.5%) y lluvia ácida (PH 2.5 % + H2SO4 y HNO3)

Nota: Esta tabla presenta la comparación de parámetros fisicoquímicos y mecánicos de la madera natural con madera plástica; tomada de:(Jiang et al., 2020) ;(López et al., 2014) ;(Moreno et al., 2013); (Isaza et al., 2022); (Zárate & Gutiérrez, 2012); (Céspedes & Gaitán, 2020) ;(Redhwi et al., 2023).

A continuación, se detallan y analizan los resultados encontrados en la matriz de parámetros fisicoquímicos y mecánicos de la madera natural y la madera plástica.

- **Propiedades Físicas:**

- **Densidad o Peso Específico:** En términos generales, la densidad de la madera natural, cuando está seca al horno, tiende a ser inferior a la de las maderas plásticas. Un ejemplo ilustrativo es la densidad del pino caribe, que alcanza los 0.45 g/cm^3 , en contraste con la densidad de la madera plástica, la cual se sitúa en promedio en 1.0 g/cm^3 .
- **Contenido de humedad:** La madera plástica WPC tiene un contenido de humedad más bajo en comparación con las maderas naturales aun cuando están secas al horno. Por ejemplo, mientras que la madera de acacia alcanza 19%, la madera plástica WPC tiene un contenido de humedad de 4.13%.

- **Propiedades Químicas:**

El estudio de investigación analizado concluyó que la madera plástica compuesta (WPC) exhibe una resistencia notable, especialmente en entornos marítimos, como se evidenció en pruebas de exposición a soluciones de agua desionizada con NaCl y salinidad del 3.5%, así como a la lluvia ácida con un pH de 2.5% (Jiang et al., 2020).

La resistencia a los ácidos de la madera natural varía según la especie; sin embargo, en general, exhiben un buen comportamiento frente a ácidos, álcalis y sales. Esto implica que pueden soportar la exposición a sustancias químicas sin degradarse significativamente (Céspedes & Gaitán, 2020).

- **Propiedades Mecánicas:**

- **Resistencia al Impacto:** La madera plástica (WPC) presenta una resistencia al impacto mayor en un estudio, con un valor de $19.33 \text{ (J/cm}^2\text{)}$, mientras que otro arroja resultados relativamente más bajos comparado con las tres especies de madera natural, alcanzando los $4.9 \text{ (J/cm}^2\text{)}$. Se

puede concluir que esta propiedad varía según la composición de la WPC, en general, la madera natural muestra mejores resultados en esta característica.

- **Flexión:** En esta propiedad, los resultados sugieren que ambos materiales logran valores similares. Por ejemplo, el eucalipto alcanza 70.7 MPa como referencia, mientras que la madera plástica exhibe su mejor resultado con 71.2 MPa.
- **Compresión Paralela:** Los datos indican que, en términos de compresión paralela, la madera plástica WPC alcanza los 138 MPa, superando significativamente la compresión más alta registrada en la madera natural, que corresponde al eucalipto con 12.5 MPa según los estudios presentados en la tabla. En esta propiedad, la WPC destaca notablemente en rendimiento.
- **Tracción:** La madera plástica WPC tiene una alta resistencia a la tracción, llegando a 380 Mpa, en comparación con los valores más altos de las maderas naturales por ejemplo 85 Mpa de la acacia.
- **Tensión:** La madera plástica WPC demuestra, asimismo, una elevada resistencia a la tensión, alcanzando los 25 MPa. En contraste, el mejor resultado observado en las maderas naturales, representado por el eucalipto, presenta una resistencia a la tensión de 13.1 MPa.

Los valores de propiedades en la tabla para maderas naturales pueden variar por factores como tipo, calidad y condiciones de prueba. Dichos valores son promedios y no indican uniformidad en propiedades mecánicas entre piezas de la misma especie (Céspedes & Gaitán, 2020).

La madera natural, debido a su anisotropía, es propensa a deformaciones, alabeo y grietas ocasionadas por cambios en la humedad y susceptible a la degradación por intemperie y factores biológicos, limitándose en aplicaciones exteriores. (Hung et al., 2017) No obstante, combinar fibras de madera con polímeros termoplásticos en la creación de compuestos de madera y plástico (WPC) puede reducir estos problemas. Agregar fibras lignocelulósicas a los polímeros no solo mejora propiedades mecánicas como flexión y tracción en comparación con plásticos puros, sino

también aporta beneficios como baja agresividad en equipos, menor densidad, costos reducidos y menos necesidad de mantenimiento (Santos et al., 2018).

A partir del análisis de información reportada por las investigaciones anteriormente descritas, es conveniente la formulación de madera plástica integrada una matriz polimérica compuesta por HDPE, PEBD, PET y PP. Esta formulación encuentra respaldo en la investigación realizada por Martínez *et al* (2014), la cual evidenció la obtención de un material apropiado al combinar residuos de estos cuatro polímeros (Martínez et al., 2014).

Para determinar las fibras naturales, se revisó el estudio de Martínez *et al* (2018), quien optó por aserrín de pino y eucalipto. La elección de estas fibras se justifica al estar alineadas con el uso de estos tipos de madera en el proyecto PLMB (Martínez et al., 2018),

En cuanto a la formulación y uso de agente acoplante, Moreno *et al* (2013) respalda el uso de Anhídrido Maléico (AM), y como espumante, un agente químico conocido como ACA (azodicarbonamida). Según la investigación, una matriz polimérica que representa el 69.98%, las fibras orgánicas el 25%, y los aditivos el 5.02% (Moreno et al., 2013).

Acorde a lo anterior y teniendo en cuenta el inventario de residuos poliméricos presentado en la tabla 1, se optó la siguiente formulación:

- **Matriz polimérica (69.98%)** = PET (15%), HDPE (22,87%), LDPE (25,56%), PP (6.55%).
- **Fibras orgánicas (25%)** = Aserrín de Pino (12,5%), aserrín de eucalipto (12.5%).
- **Aditivos químicos (5.02%)** = Anhídrido Maléico (5%), azodicarbonamida (0.2%).

3.3. Matriz de caracterización de los procesos y selección del método para la elaboración de la madera plástica obtenida con Polímeros y reforzados con fibra naturales

Para identificar los procesos y métodos utilizados en la elaboración de madera plástica, se llevó a cabo una revisión integral del estado actual de esta tecnología. Se utilizó una matriz de

caracterización que recopiló información bibliográfica de artículos científicos e investigaciones realizadas en varios países, incluyendo China, Brasil, Cuba y Colombia. La Tabla 4 muestra la matriz de caracterización de procesos y métodos utilizados en la elaboración de madera plástica.

Tabla 4*Caracterización de Procesos.*

Revisión Bibliográfica		Tecnologías			Materiales y variables			Métodos y procesos			Observación
#	Tema	Mecánica	Térmica	Química	Polímeros	Materia Vegetal	Variables	Extrusión	Termocompresión	Inyección	
1	Acoplamiento de fibras de polímero y madera reciclada (Rocha & Rosa, 2019)	1	1	0	LDPE 80%	Aserrín al 20%	T=180° P=7ton T=5min		1		
2	Resistencia de los compuestos de madera plástica (Vedrtnam et al., 2019)	1	1	0	PP	Polvo de madera al 10, 15 y 20%	T=(200°C y 240°C)			1	Se comparan 3 polvos de madera diferentes
3	Procesamiento y propiedades de la madera plástica. (Santos et al., 2018)	1	1	0	HDPE	Polvo de madera		1			
4	Propiedades ignífugas de tableros de madera plástica (Martínez López et al., 2017)	1	1	0	LDPE, PET, PP, HDPE	Pinus Eucalyptus	No se evidencian datos de procesamiento	1			Los porcentajes del refuerzo son del 50%, el 40% y el 10%
5	Tableros de madera plástica (Y. I. Martínez-López et al., 2017)	1	1	0	PET, LDPE, PP	Aserrín de Pinus caribaea	Temperatura > 105 °C	1			
6	Caracterización de compuestos de madera plástica reciclada. (Turku et al., 2017)	1	1		PP, PE, HDPE	madera con tamaños < a 400 um	T=(160°C-220°C)	1		1	Polvo de madera 10-20-30 %
7	Preparación y caracterización de madera plástica. (Koay et al., 2018)	1	1		Poliestireno expandido	Cáscara de Durian al 15, 30,45 y 60 %, acetona	T=190°C P=100 kPa		1		

Revisión Bibliográfica		Tecnologías			Materiales y variables			Métodos y procesos			Observación
#	Tema	Mecánica	Térmica	Química	Polímeros	Materia Vegetal	Variables	Extrusión	Termocompresión	Inyección	
8	Rentabilidad de los productos de madera plástica. (Keskisaari & Kärki, 2018)	0	0	0	HDPE, PP	Plátano, cascarilla de arroz	Diferentes condiciones de procesamiento	1	1	1	
9	Madera plástica a partir de polímeros post consumo. (Jácome A, 2019)	1	1	0	HDPE al 80%	maíz, cáscara caña de azúcar y cabuya.	HDPE al 80%		1		
10	Propiedades físico-mecánicas de la madera plástica. (Lemus, 2022)	1	1	0	PP, LDPE, HDPE, PET entre el 50% y el 70%	Aserrín al 20%	T=(140°C-270°C)		1		
11	Propiedades térmicas de la madera plástica. (Guo et al., 2019)	1	1	0	HDPE reciclado al 50% y 70%	Fibra de madera, polvo de lijado de piso, cascarilla de arroz	T 140°C a 170°C en el tornillo de la extrusora	1			La madera se secó en un horno a 105° durante 12 horas.
12	Compuesto de madera plástica obtenido mediante extrusión. (Correa G, 2019)	1	1	0	PP	30% de biomasa	T° 178°C-182°C, V=120, máximo 190°C	1		1	
13	Propiedades de tracción de la fibra de madera. (Benmbarek et al., 2013a)	1	1	1	HDPE	10% y 30% Pinus pinaster implementan MAPE al 3%	índice de flujo de fusión de 18 g/10 min (190°C, 2,16 kg).	1			
14	Contrachapado de madera plástica. (Kajaks et al., 2018)	1	1	0	HDPE al 30%, 40%, 50%	Abedul al 70%, 60%, 50%	(MFI = 4 g/10 min, T= 190°C, P = 2,16 kg)	1			
15	Propiedades mecánicas de los compuestos de madera y plástico. (Effah et al., 2018)	1	1	0	PP, HDPE, PET	Aserrín, cáñamo, MAPE, Almidón	No se evidencian datos de procesamiento	1			

Revisión Bibliográfica		Tecnologías			Materiales y variables			Métodos y procesos			Observación
#	Tema	Mecánica	Térmica	Química	Polímeros	Materia Vegetal Harina de caucho (RWF) al	Variables	Extrusión	Termocompresión	Inyección	
16	Alternativas para compuestos de madera y plástico (Ratanawilai & Taneerat, 2018)	1	1	0	DPE, HDPE, PVS, PP, PS al 60%,50%,40%	40%,50%,60%	No se evidencian datos de procesamiento	1			La WPC del PP y PS son las mejores alternativas para aplicaciones que requieren resistencia a la intemperie natural o con alta carga mecánica (tensiones).
17	Durabilidad de los compuestos de madera y plástico. (Turku et al., 2018)	1	1	1	PP, HDPE, LDPE	Harina de madera de Abeto	T173°C. La presión en la matriz varió entre 22 y 48 Bar y la producción de material fue de 25kg/h	1			
18	Unidades estructurales en madera plástica (Josaga et al., 2020b)	1	0	0	PEAD/PP	Aserrín, Granza		1			El PEAD/PP posconsumo resultaron ser materiales óptimos para su uso en aplicaciones finales
19	Propiedades físico-mecánicas y la inflamabilidad del compuesto de madera y plástico. (Lopez et al., 2022)	1	1	0	PEAD	Dosificaciones de 50-50% Pinus eliottii y polietileno de alta densidad, 100% de polietileno de alta densidad.	No se evidencian datos de procesamiento	1		1	Las pruebas de inflamabilidad revelaron que la acumulación de calor y la degradación térmica provocan la ignición entre 16 y 28 s en los tableros obtenidos
20	Propiedades mecánicas, térmicas y reológicas de los compuestos plásticos de fibras de lúpulo,	1	1	0	HDPE	fibras de lúpulo, cáñamo y pino	(250 g), el polvo de HDPE (240 g) y el polvo de MAPE (10 g), (lote de 500 g) a 0,5 kg/h 160 °C	1			La resistencia a la flexión para los compuestos de fibra de lúpulo, cáñamo y pino y HDPE fue,

Revisión Bibliográfica		Tecnologías			Materiales y variables			Métodos y procesos			Observación
#	Tema	Mecánica	Térmica	Química	Polímeros	Materia Vegetal	Variables	Extrusión	Termocompresión	Inyección	
	cáñamo y madera. (Talcott et al., 2023)										respectivamente, 38.9, 39.8, 44.8 y 27.4 MPa.
21	Propiedades de flexión de los compuestos de madera plástica. (Jian et al., 2022)	1	1	1	HDPE	álamo, pino, paja de trigo y bambú	las propiedades mecánicas del WPC son mejores cuando el tratamiento térmico se realiza a 150 °C durante 30 min.	1			WPC con madera como álamo y abeto chino y matriz plástica como PP, PS y HDPE ofrecen buenas propiedades de flexión
22	Fabricación de compuestos de madera y plástico con residuos municipales. (Basalp et al., 2020)	1	1		PP, PE, PPFGE (PP filled garden fraction high MFI)	Harina de madera de residuos	Harina de madera (20%,30% y 40% en peso),	1		1	El aumento de la temperatura de 185 a 215°C afectó negativamente a los ensayos mecánicos de tracción, impacto y flexión.
23	Propiedades de tracción de fibra de madera y polietileno de alta densidad. (Benmbarek et al., 2013)	1	1	1	HDPE	Fibras de madera de Pinus pinaster	Se calientan en horno a 104°C durante 24 horas	1		1	Las fibras de madera fueron tratadas con una solución de ácido acético puro con una gota de ácido sulfúrico.
24	Compuestos de madera plástica a partir de residuos de biomasa. (Chen et al., 2020)	1	1		HDPE	Bagazo de maíz tropical, bagazo de sorgo dulce y bagazo de caña de azúcar	50% fibra 40% de MA-HDPE, 4% de ácido esteárico y 3% de cera de polietileno. 140-175 °C.	1		1	El WPC se preparó mediante extrusora de doble husillo cortante.
25	Resistencia al fuego de los productos de madera plástica. (Ding et al., 2021)	1	1	1	HDPE	Fibras de madera de álamo	40-50% de HDPE y fibras de madera de álamo 30% y el retardante de llama 20-30%.	1	1		Las fibras de madera y el HDPE se secaron en horno a 103 °C durante 48 horas antes del uso.
26	Comportamiento sísmico de muros de	1	1		HDPE		La densidad para los muros fue de 821	1			Se desarrolló un modelo multilíneal para

Revisión Bibliográfica		Tecnologías			Materiales y variables			Métodos y procesos			Observación
#	Tema	Mecánica	Térmica	Química	Polímeros	Materia Vegetal	Variables	Extrusión	Termocompresión	Inyección	
	madera plástica reciclada. (Herrera et al., 2018b)						kg/m ³ , la resistencia a la compresión fue de 18,06 Mpa y la resistencia de flexión 19,32 Mpa				simular el desarrollo dinámico con el objetivo de evaluar su respuesta ante terremotos.
27	Residuos de construcción y demolición. (Hyvärinen et al., 2019)	1			Polímeros, Agente lubricante, lana mineral, película plástica.	Fibra de madera	Densidad de 0,91 g/cm ³ y un índice de flujo de fusión de 45 g/10 min (230 °C/cm ³), 2,16 kg	1			Se fabrican por extrusión compuestos de madera y plástico que contenían residuos de construcción y demolición
28	Propiedades mecánicas, físicas y térmicas de compuestos maderos plásticos. (López Rodríguez & Rojas González, 2018)	1	1		PEAD	Residuos madereros	(Proporción en peso de fibra del 45% y TP de 710 µm),	1			
29	Propiedades mecánicas de películas lignocelulósicas. (Shu et al., 2018)	1	1	1		Álamo, papel de filtro de desecho con Cloruro de 1-butil-3	Secado a 40°C durante 48 horas y humedad relativa de 50%		1		Se desarrolló una nueva película compuesta lignocelulósica (LCF) bio compuesta.
30	Análisis de la composición y propiedades mecánicas de la madera plástica (Ramírez ,2020)	1				Fibras de Eucalipto y Pino	PEAD (50-50, 60-40 y 50-40-10) madera respectivamente. T 175 y 185°C	1			Mayor sea el porcentaje de polvo de madera en la composición mayor será el módulo de elasticidad

Nota: El (1) en cada columna de la tabla indica la presencia o aplicación de aspectos específicos relacionados con tecnologías, materiales y variables, así como métodos y procesos en el estudio analizado sobre la elaboración de madera plástica.

De acuerdo con el análisis de la información reportada con relación a las tecnologías empleadas, donde un 96% corresponde a tecnología mecánica, un 90% a tecnología térmica y un 20% a tecnología química. Las tecnologías térmicas y mecánicas son las más comúnmente utilizadas en la fabricación de WPC.

Además, en relación con los procesos utilizados, se encontró que el 73% corresponde a la extrusión, el 26% a la termocompresión y el 23% a la inyección. La extrusión se destaca como el método más ampliamente empleado para la fabricación de madera plástica.

Las propiedades físicas muestran estabilidad dimensional, que mejora en los procesos de extrusión que tienen una resistencia del 84% y tienen propiedades de autoextinguibilidad (Martínez López et al., 2017).

La fabricación de placas a través del proceso de extrusión, con el objetivo de analizar sus propiedades físicas y mecánicas (Turku et al., 2018) Los resultados obtenidos se destacan especialmente en términos de resistencia a la tracción y flexión.

Los rangos de temperatura para la fabricación de madera plástica mediante el proceso de extrusión son entre 140°C a 170°C en el tornillo de la extrusora Haga clic o pulse aquí para escribir texto., Estas temperaturas son notablemente más bajas que las utilizadas en los procesos de inyección y termocompresión.

3.3.1 Proceso de Extrusión

La extrusión es el proceso más común para la producción de madera plástica, es un proceso de compresión en el cual se fuerza al material a fluir a través del orificio de un dado para generar un producto largo y continuo, cuya forma de la sección transversal queda determinada por la geometría del orificio. En general, se puede indicar que los dos componentes principales del extrusor son el cilindro y el tornillo. El dado no es un componente del extrusor, sino una herramienta especial que debe fabricarse con el perfil particular a producir. (Meza de Luna et al., 2022).

Es un proceso rápido y eficiente. Este proceso es a menudo más rentable que otros procesos de fabricación de polímeros y es ideal para la producción en masa. Energéticamente es eficiente ya que la mayoría de energía utilizada se convierte en calor para fundir el material y no se pierde en otros procesos. (Meza de Luna et al., 2022)

3.3.1. Proceso de Extrusión

La extrusión es un proceso de compresión en el cual se fuerza al material a fluir a través del orificio de un dado para generar un producto largo y continuo, cuya forma de la sección transversal queda determinada por la geometría del orificio. En general, se puede indicar que los dos componentes principales del extrusor son el cilindro y el tornillo. El dado no es un componente del extrusor, sino una herramienta especial que debe fabricarse con el perfil particular a producir. (Meza de Luna, García, González, Sierra, Chávez, Reyes, 2022).

La extrusora (Figura 2) es el núcleo de un sistema de procesamiento de WPC, y el propósito principal de la extrusora es fundir y mezclar el polímero, la madera y los aditivos en un proceso denominado composición. Además, la extrusora transporta la mezcla compuesta de madera y polímero a través de la matriz. Dentro de los principales sistemas de extrusión que se utilizan para procesar perfil se encuentra, la extrusión por tornillo simple. (Gardner et al., 2015)

Figura 2

Representación esquemática de un sistema de extrusión de plástico modelo Elypson ME-10



Nota: La figura anterior, presenta un el esquema de una extrusora modelo Elypson ME-10. Tomada de: Industrias Elypson. (2023).

La extrusión de plástico destaca por su alta productividad y se constituye como el proceso más relevante para la obtención de formas plásticas a gran escala. Su operatividad es eficaz y simple, una vez que se establecen las condiciones operativas, la producción fluye sin interrupciones, a menos que ocurra algún inconveniente grave. Este proceso se caracteriza por su maquinaria de extrusión asequible en comparación con otros métodos como la inyección y soplado. Además, su flexibilidad sobresale al permitir cambios en la producción sin requerir inversiones significativas. (<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>).

La madera y el plástico reciclado se fusionan a través del proceso de extrusión para generar perfiles y otros productos de madera plástica.

3.4. Costos de la Madera Natural y de la Madera Plástica

La tabla 5 presenta 6 referencias y especificaciones dimensionales de madera natural más utilizada en el proyecto de la primera línea del metro de Bogotá, y relacionan precios cotizados por tres proveedores diferentes.

Tabla 5

Cotizaciones de madera natural

Referencia Madera Natural	Precio unidad (COP) Incluye IVA			Especificaciones	Peso aproximado por pieza
	Proveedor 1	Proveedor 2	Proveedor 3		
Estacón cuadrado	36,719	40,410	44,900	0,095 x 0,095 x 3 Metros	18,9 kg
Larguero	35,081	39,000	37,850	0,085x0,04 x 3 Metros	7,2 kg
Listón	2,142	2,710	2,894	0,02x0,02 x 3 Metros	0,8 kg
Tablas	8,342	8,687	14,000	0,02x0,10 x 3 Metros	4,2 kg
Vara rolliza	10,500	12,528	16,821	0,08 diámetro x 3 Metros	10,5 kg
Planchón	50,932	46,416	37,468	0,04x0,30 x 3 Metros	25,2 kg

Nota: La tabla presenta los precios por unidad (COP) de diferentes tipos de madera natural utilizadas en el proyecto PLMB.

La tabla 6 presenta 5 referencias y especificaciones dimensionales de madera plástica que pueden ser utilizadas en el proyecto de la primera línea del metro de Bogotá, y podría reemplazar las especificaciones de madera natural utilizadas actualmente; se presentan precios cotizados por tres proveedores diferentes.

Tabla 6

Cotizaciones de madera plástica

Referencia Madera Plástica	Precio unidad (COP)			Especificaciones	Peso aproximado por pieza
	Incluye IVA				
	Proveedor 1	Proveedor 2	Proveedor 3		
Poste Cuadrado	89,250	125,087	127,900	0,10 x 0,10 x 3 Metros	17.5 kg
Larguero	29,750	42,707	62,900	0,09x0,04 x 2 Metros	5.5 kg
Tablas	65,450	60,450	54,900	0,02x0,15 x 2 Metros	4.5 kg
Poste Redondo	49,385	47,385	89,900	0,08 diámetro x 2,9 Metros	11 kg
Tablón / Planchón	115,100	119,800	139,900	0,05x0,20 x 2 Metros	15 kg

Nota: La tabla presenta los precios por unidad (COP) de diferentes tipos de madera plástica, con especificaciones similares a la madera natural.

- **Especificaciones Dimensionales:** Ambos productos cumplen con dimensiones específicas. Las medidas de los productos de madera plástica se asemejan en longitud y grosor a los de la madera natural, lo que sugiere la posibilidad de una transición en usos del proyecto.
- **Precios:** En términos generales, la madera plástica tiene precios superiores a la madera natural, posiblemente debido a los costos de producción del material plástico y sus características especiales como resistencia a la humedad y durabilidad. A pesar de esto, se debe recordar que la madera plástica puede compensar su mayor costo inicial con ventajas añadidas en mantenimiento y vida útil, como mencionamos previamente.

- **Disponibilidad del producto y confiabilidad de los proveedores:** Tanto los proveedores de madera natural como los de madera plástica son confiables y garantizan la disponibilidad y calidad de sus productos. Estos aspectos revisten importancia al tomar decisiones para la sustitución de los productos.

3.4.1. Costos asociados a la producción de madera plástica en el Proyecto PLMB

- Maquinaria requerida.

Se realizaron evaluaciones exhaustivas de diversas cotizaciones de máquinas extrusoras. Durante este proceso de selección, se tomaron en cuenta múltiples factores críticos, incluyendo el costo, la capacidad de producción, los tipos de plástico que pueden ser procesados, y los productos finales que pueden ser fabricados. A continuación, la Tabla 7 muestra una comparación de ofertas de las máquinas extrusoras.

Tabla 7

Comparación de ofertas de máquinas extrusoras

Marca	País Origen	Producción kg/hr	Material que procesa	Producto Final	Costo en dólares (US)
Jwell	China	80-100	HDPE -PVC	No especifica	101,000
PAS Extrusoras	Argentina	100-200	PP	Tablas de plastimadera	50,000
TEVA distribuidora	México	190-250	No especifica	Rectangular de 1 A 6” - Cuadrado de 1 A 6” Redondo de 1 A 6”	102,267
Búsano	Italia	200	PVC-PET-PP	Perfiles rígidos y flexibles con diferentes pesos y dimensiones	307,111
HEATmx	México	60	HDPE, LDPE, PP, PET	Panel dimensiones de 1250 mm x 2500 mm espesor de 8 mm a 60 mm.	90,625

Marca	País Origen	Producción kg/hr	Material que procesa	Producto Final	Costo en dólares (US)
Industrias Elypson ME-10	Argentina	20-40	HDPE, LDPE, PP, PET, PVC	Tablones, Rectangular Cuadrado, Redondo	51,000

Nota: La tabla compara ofertas de máquinas extrusoras de diferentes marcas y países de origen.

Como resultado de un análisis integral, hemos optado por la propuesta presentada por la empresa argentina Elypson, específicamente su modelo "ME-10". Este prototipo se distingue por las siguientes características:

- Produce tablones, perfiles rectangulares, postes cuadrados y redondos.
- Su producción es de 20 a 40 kg/h.
- 120 amperes en 220 v.
- Sus dimensiones son: alto 2,0 m, ancho 1,8 m y largo 4,00 m.
- Motor de 10 HP.
- Tornillo de 60 mm.
- Variador de velocidad.

Dado que la materia prima plástica proviene del posconsumo, se requieren procesos previos, como el molido o triturado y el lavado. En este contexto, se propone la adquisición de una lavadora y secadora/trituradora de plástico reciclado de la compañía SHULIY, específicamente el modelo SLS FS800, el cual presenta las siguientes características destacadas:

- Tipo de plástico que procesa: PET, HDPE, LDPE, PP, PS, PVC.
- Producción entre 30/50 kg/hr.
- Peso: 1500kg.
- Garantía: 1 año.
- Trifásico 380V/50Hz/3Phase.
- Material Cuchillas: acero de alta velocidad.
- Dimensión en ml (L*W*H): 3690(L)X2680(W)X2600(H).

Se considera también la adquisición de una sierra de mesa deslizante para corte de madera, de panel portátil Modelo MCV8D marca MAXCOOL CNC este equipo cumple con las especificaciones para corte de los tableros producidos por la extrusora. A continuación, se presentan los costos de la máquina seleccionada como propuesta para la planta. En la tabla 8, se incluyen los precios proporcionados por dos compañías en función de los modelos elegidos.

Tabla 8

Costos maquinaria y equipo

Maquinaria	Cantidad	Valor de en dólar (US)	Valor en Peso Colombiano
Extrusora Elypson ME-10	1	\$ 51,000	202,929,000 COP
Lavadora y secadora/trituradora SLS FS800	1	\$ 2100	8,355,900 COP
Sierra de Mesa MCV8D	1	\$ 3210	12,772,590 COP
Total			224,057,490 COP

Nota: La tabla resume la inversión en maquinaria para el proyecto, detallando la cantidad de unidades, el valor en dólares.

Se considera un dólar de \$3,979 para la fecha de 14 de noviembre de 2023; En el anexo 3 se presentan las cotizaciones de la maquinaria y equipo

- **Infraestructura**

La instalación debe incluir una zona de estacionamiento destinada a la carga y descarga de materias primas, insumos y productos terminados. Además, en las áreas directamente vinculadas al proceso de producción, se debe contar con un espacio para el almacenamiento de bultos de materia prima, estanterías, insumos y herramientas.

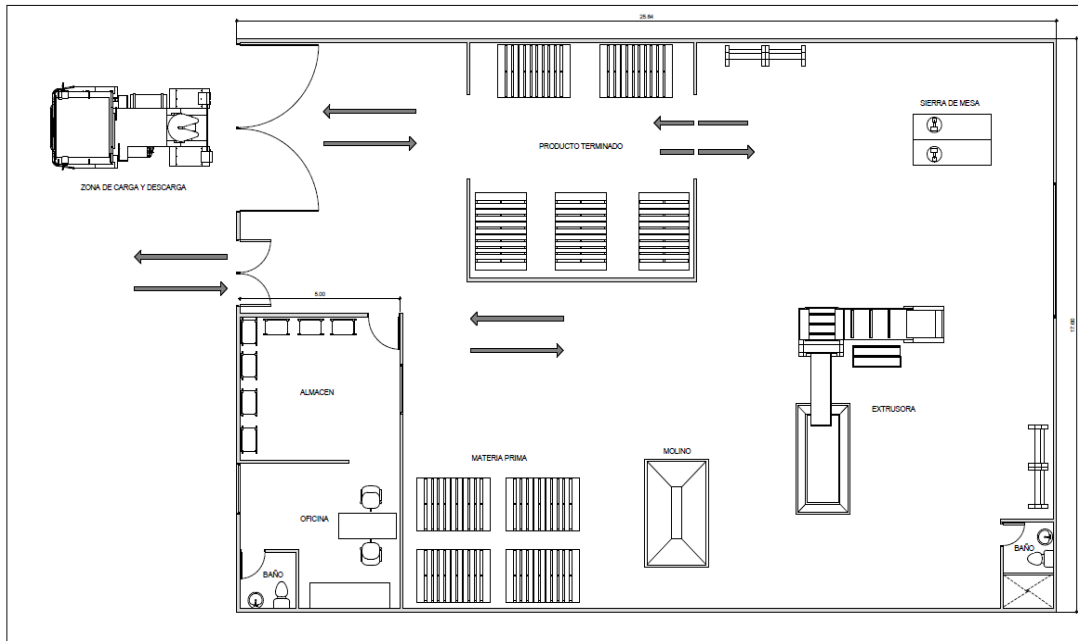
La máquina de extrusión utilizada para procesar madera plástica tiene unas dimensiones considerables: 2 metros de altura, 1,8 metros de ancho y 4 metros de largo. Por lo tanto, es esencial contar con un espacio generoso que permita un margen de separación de 1,5 a 2 metros con respecto a las paredes o estanterías. Esto se hace necesario para facilitar la movilidad de los operarios alrededor del módulo de extrusión. Además, resulta fundamental que los operarios tengan acceso a instalaciones sanitarias completas.

El área destinada al almacenamiento de productos terminados debe ser planificada minuciosamente para prevenir la contaminación con los residuos generados durante el proceso de producción. Los tabloncillos de producto terminado deben organizarse de manera ordenada, y el espacio debe disponer de pasillos amplios, así como de entradas y salidas espaciosas.

En lo que respecta al área administrativa, se requiere una oficina situada en el mismo nivel que la planta de producción, lo cual garantizará una gestión eficaz de la operación. Además, en términos eléctricos, se precisa una conexión trifásica de 220 voltios, ver figura 8 y 9 diseño y distribución de la planta.

Figura 3

Diseño y distribución de la Planta



Nota: La figura proporciona una visión integral del diseño y la distribución de la planta.

Figura 4

Diseño planta en 3D



Nota: La figura proporciona una representación tridimensional detallada del diseño de la planta.

Elaborado por el Arq. Stik Ruiz Pineda, (2023).

No será necesario adquirir un terreno adicional, dado que se dispone de un amplio espacio en el Patio Taller para la ubicación de la planta. La construcción de las instalaciones, con una superficie total de 438 metros cuadrados, se llevará a cabo considerando los costos típicos asociados a la infraestructura industrial similar construida para este proyecto en particular.

Será necesario equipar una oficina con elementos básicos como escritorio, silla, archivador y un computador. Asimismo, se requerirá una impresora, estantes y estibas.

Es importante destacar que el transporte no formará parte de la inversión inicial, ya que los residuos serán transportados utilizando vehículos del proyecto, el transporte del producto final será alquilado y los insumos serán suministrados por los proveedores correspondientes, en la tabla 9 se detallan los valores de la inversión inicial requerida para el proyecto.

Tabla 9*Inversión Inicial*

Inversión Inicial	Valor (COP)
Infraestructura	126,200,000
Maquinaria (Línea de extrusión)	224,057,490
Equipos de oficina y mobiliario	9,500,000
Capital de Trabajo	32,000,000
TOTAL	391,757,490

Nota: La figura detalla la inversión inicial requerida para el proyecto.

- Costos operativos del proyecto

Los costos operativos comprenden los gastos necesarios para que la planta pueda llevar a cabo sus operaciones. Estos costos pueden dividirse en dos categorías principales: costos fijos y costos variables. Los costos fijos son aquellos que permanecen constantes con el paso del tiempo y no varían independientemente del nivel de producción. Ejemplos de costos fijos incluyen los gastos asociados a servicios públicos, salarios y prestaciones sociales, transporte, entre otros. Por otro lado, los costos variables son aquellos que fluctúan en relación con el nivel de producción de la planta. En este contexto, los costos variables estarían relacionados con los gastos en productos necesarios para la producción de la madera plástica.

En este análisis, se estiman los costos para producir un promedio de 25 kg por hora de Wood-Plastic Composite (WPC), lo que equivale a 4,800 kg mensuales calculados de la siguiente manera:

Total producción mensual= 25 kg/hora*192 horas (jornada laboral máxima legal mensual)

Total producción mensual= 4800 kg/mes

En la tabla 10, se detallan los diferentes costos operacionales, incluyendo los salarios de cuatro empleados: tres operativos y una persona administrativa, los cantidades de materias primas son tomadas acorde a la formulación sugerida para el material.

Tabla 10*Descripción de costos de operación*

Descripción del Costos	Cantidad	Costo Mensual (COP)
Salarios de Producción y Administración	4	8,054,813
Gastos de Energía Eléctrica	13,200 kW	1,200,000
Materias Primas (aditivos químicos)	5,02% total Peso WPC (241 kg)	435,941
Materias Primas (Fibras orgánicas)	25% total peso WPC (1200 kg)	1,416,000
Materias Primas (Plástico Reciclado)	7182 kg	2,129,469
Mantenimiento y Reparaciones	4% (anual inversión inicial)	2,900,000
Transportes (producto final)	Alquiler	2,968,000
Otros Servicios Públicos (agua)	30 M3	815,500
Costo Total de Operación Mensual		19,919,723

Nota: Los costos de empleados y servicios públicos se obtienen de promedios de consumo de Gallo & González reciclaje empresa dedicada a fabricación de WPC, precio plástico reciclado Acoplásticos 2023.

El análisis del costo de producción por kilogramo (kg) de madera plástica, basado en los datos proporcionados en la tabla anterior, se llevó a cabo de la siguiente manera:

Para calcular el costo por kg de Wood-Plastic Composite (WPC), se dividió el costo total de operación mensual por la cantidad de WPC producido:

Costo por kg = Costo Total de operación mensual / Total producción mensual

Costo por kg = 19,919,723 pesos / 4800 kg = 4,152 pesos * kg

Este cálculo revela que el costo de producción por kg de WPC es de 4,152 pesos.

Comparando este resultado con las cotizaciones de tres proveedores diferentes de madera plástica, se evidencia que el precio promedio por kilogramo en la oferta más económica de cada proveedor sería de 11,029 pesos. En contraste, al analizar las cotizaciones de tres proveedores diferentes de madera natural, se concluye que el precio promedio por kilogramo sería de 8,036 pesos. (Ver tablas Cotizaciones madera natural y madera plástica).

Igualmente, con un margen amplio del 60% el precio de venta sería de 6,643 pesos por kg y una producción mensual de 4,800 kg, los ingresos mensuales serían de 31,870,440 pesos. Los costos mensuales de producción serían de 19,919,723 pesos, lo que da como resultado un margen de contribución mensual de 11,940,800 pesos. De tal forma que el costo de producción de madera plástica más un margen de utilidad en las condiciones específicas del proyecto resulta ser un 60% más económico que la adquisición de madera plástica a través de un proveedor. Además, es un 17% más económico que continuar utilizando madera natural como alternativa. Estos datos resaltan la ventaja económica de la producción interna de madera plástica en el contexto del proyecto.

Para recuperar la inversión inicial de 391,757,490 pesos, se necesitan aproximadamente 32.7 meses, equivalente a unos 2 años y 8 meses, manteniendo constantes los ingresos, los resultados se obtuvieron con la siguiente fórmula:

Ingresos Mensuales = 4,800 kg x 6,643 pesos/kg = 31,870,400 pesos/mes

Costos Mensuales de Producción = 4,800 kg x 4,152 pesos/kg = 19,929,600. pesos/mes

Margen de Contribución Mensual = 31,870,400 pesos/mes - 19,929,600 pesos/mes = 11,940,800 pesos/mes

Tiempo de Recuperación (TRI) = 391,757,490 / 11,940,800 = 32,7 meses (2,7 años)

Valor Presente Neto (VPN o VAN):

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

El VPN es positivo (\$44.664.925,82), lo que sugiere que el proyecto podría generar un retorno financiero positivo. Este es un buen indicador, ya que indica que la inversión inicial podría recuperarse y generar beneficios adicionales.

Tasa Interna de Retorno (TIR):

$$TIR = \frac{-I + \sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n i * F_i}$$

La Tasa Interna de Retorno (TIR) del 35% indica que el proyecto supera la tasa de descuento utilizada en el análisis. En un estudio a 5 años, una TIR positiva sugiere la viabilidad del proyecto en términos de rentabilidad, indicando que los flujos de efectivo generados son capaces de cubrir la tasa de rendimiento mínima requerida, y la inversión inicial podría recuperarse. En el anexo 4 se presenta tabla de cálculos de VPN y TIR.

4. CONCLUSIONES

Las investigaciones desarrolladas en este trabajo arrojan conclusiones significativas para el proyecto de construcción PLMB y su objetivo de incorporar madera plástica (WPC) como alternativa sostenible:

A través de un análisis documental detallado de las propiedades físicas y mecánicas de diversos polímeros, se identificaron el HDPE, PEBD, PET y PP como las opciones más adecuadas para la fabricación de madera plástica. Estos polímeros no solo exhiben propiedades resistentes sino también una alta reciclabilidad.

Los análisis comparativos realizados en los estudios analizados revelaron que la madera plástica supera en propiedades de resistencia al impacto, flexión, compresión, tracción y tensión, a la madera natural. Además, la madera plástica muestra una estabilidad dimensional superior y una resistencia química adecuada para aplicaciones en construcción.

A partir del análisis de la información reportada en las diferentes investigaciones es conveniente el proceso de extrusión como el método más eficiente y rentable para la producción de WPC (madera plástica compuesta), ofrece múltiples beneficios, como la capacidad de producir productos con formas y dimensiones precisas de manera continua, lo que permite una alta eficiencia en la productividad y genera un menor impacto ambiental, así como la tecnología mecánica como la más utilizada, es crucial para destacar la viabilidad y las ventajas de este enfoque en la fabricación de productos de WPC.

El análisis de costos demostró que la producción interna de WPC en el proyecto PLMB resultaría en un ahorro sustancial en comparación con la adquisición de WPC de proveedores externos o la continua utilización de madera natural. Esto sugiere una ventaja económica sólida para la producción de WPC. Estas conclusiones respaldan la viabilidad y el potencial de la madera plástica como una alternativa sostenible y económicamente atractiva en el proyecto de construcción PLMB y en la industria de la construcción en general. La transición hacia la utilización de WPC no solo puede conducir a una reducción de costos significativa sino también a una contribución positiva a la sostenibilidad ambiental y la eficiencia en la construcción.

5. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

A pesar de estos resultados favorables, es crucial reconocer que los indicadores de TIR y Valor Presente Neto (VPN) pueden mejorarse desde el punto de vista de rentabilidad y flujos de efectivo generados, esto señala áreas clave para mejorar:

- **Optimización de Costos:** Revisar detenidamente todos los costos asociados con el proyecto, buscar formas de reducir los costos de producción, especialmente mediante convenios con asociaciones u otras empresas que puedan suministrar materias primas, como residuos plásticos y residuos de fibras orgánicas.
- **Reducción de Costos de Inversión Inicial:** Involucrar a universidades o empresas con la capacidad de fabricar las líneas de extrusión localmente para disminuir su precio, considerando que las importaciones implican pagos en dólares. Esto puede tener un impacto significativo en los indicadores financieros.
- **Incremento de ingresos:** Explorar oportunidades para aumentar los ingresos, ya sea a través de la expansión de líneas de producción o la introducción de nuevos productos. Un aumento en los ingresos puede mejorar sustancialmente la TIR.
- **Eficiencia Operativa:** Mejorar la eficiencia operativa sin un aumento proporcional en los costos. Esto podría incluir la implementación de tecnologías más eficientes, mejores procesos de trabajo y medidas para reducir el consumo de recursos como agua, energía o combustibles.

Establecer alianzas estratégicas con las empresas constructoras y los diferentes proyectos de infraestructura en la ciudad dónde se articulen las acciones públicas y privadas, con el fin de lograr la reducción en la generación, aumento en la valorización en la mayor cantidad posible de residuos y disminución el consumo de recursos naturales en el sector de la construcción. Así mismo generar cadenas de suministro de los residuos generando valor compartido en términos de: reducción de costos de disposición final de residuos, cumplimiento de la normatividad, responsabilidad social compartida, construcción sostenible y participación en la economía circular.

Incentivar la investigación para la generación de productos y materiales obtenidos de la valorización de residuos como alternativa para la implementación de modelos de economía circular promoviendo así la competitividad en los encadenamientos productivos asociados al sector de la construcción.

REFERENCIAS

- Acero, A. P., Rodríguez, C., & Changelog, A. C. (2016). *LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories*. http://www.openlca.org/files/openlca/Update_info_open
- Acoplásticos. (2017). *Realidades del reciclaje de los plásticos*.
- Alfonso Roa, Ó. A. (2016). ¿Por qué Bogotá no tiene al menos una línea de metro? Y las razones por las que probablemente no la tendrá. *OPERA*, 19, 139–159.
<https://doi.org/10.18601/16578651.n19.08>
- Ana Bottet Latre. (2019). *Estudio de los plásticos como material reciclado para la obtención de material de construcción*.
- Awoyera, P. O., & Adesina, A. (2020). Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective. *Case Studies in Construction Materials*, 12.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00330>
- Awoyera, P. O., & Adesina, A. (2020). Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective. *Case Studies in Construction Materials*, 12.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00330>
- Basalp, D., Tihminlioglu, F., Sofuoglu, S. C., Inal, F., & Sofuoglu, A. (2020). Utilization of Municipal Plastic and Wood Waste in Industrial Manufacturing of Wood Plastic Composites. *Waste and Biomass Valorización*, 11(10), 5419–5430.
<https://doi.org/10.1007/s12649-020-00986-7>
- Benmbarek, T., Robert, L., Sammouda, H., Charrier, B., Orteu, J.-J., & Hugot, F. (2013). Effect of acetylation and additive on the tensile properties of wood fiber-high-density polyethylene composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(21), 1646–1655.
<https://doi.org/10.1177/0731684413505256i>
- Calderón, S. M., & Sotelo, T. (2021). *The circular economy in the development of plastic transformation projects in the construction sector in Colombia: a comparative analysis of international good practices*.
- Céspedes & Gaitán. (2020). *Proyecto de investigación caracterización de las propiedades físico-mecánicas de las especies de madera de acacia, eucalipto y pino caribe*.

- Chen, B., Luo, Z., Chen, H., Chen, C., Cai, D., Qin, P., Cao, H., & Tan, T. (2020). Wood Plastic Composites from the Waste Lignocellulosic Biomass Fibers of Bio-Fuels Processes: A Comparative Study on Mechanical Properties and Weathering Effects. *Waste and Biomass Valorization*, 11(5), 1701–1710. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0413-8>
- Chowdhury, F. I., Islam, J., Haldar, S. S., & Zayed, H. M. (2022). Recycled wood plastic biocomposites and development of new materials. In *Recycled Plastic Biocomposites* (pp. 119–145). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88653-6.00011-0>
- DIAS, B. Z.; ALVAREZ, C. E. de. Mechanical properties: wood lumber versus plastic lumber and thermoplastic composites. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 201-219, abr./jun. 2017. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000200153>
- Departamento Nacional Planeación. (2022). *Guía Nacional para la adecuada separación de residuos sólidos 2022 Subdirección General Sectorial Superintendencia de servicios Públicos Domiciliarios*.
- Departamento Nacional Planeación. (2021). *Sistema de indicadores ambientales, de sostenibilidad y economía circular (2018)* <https://www.cepal.org/sites/default/files/presentations/sistema-indicadores-ambientales-sostenibilidad-economia-circular-dane-colombia.pdf>
- Ding, C., Zhang, S., Pan, M., Li, M. C., Zhang, Y., & Mei, C. (2021). Improved processability and high fire safety of wood plastic composites via assembling reversible imine crosslinking network. *Chemical Engineering Journal*, 423. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130295>
- Effah, B., Van Reenen, A., & Meincken, M. (2018). Mechanical properties of wood-plastic composites made from various wood species with different compatibilisers. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(1), 57–68. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1186-7>
- Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company. (2016). *The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics*.
- García-Velázquez, Á., Guadalupe, M., Moreno, A., Casados-Pérez, M. A., & Brito-Páez, R. A. (2013). *Madera plástica con PET de post consumo y paja de trigo* (Vol. 13).

- Garzón Luisa, R., Carmona Esperanza, R., & Cubillos Anny, E. (2016). Madera plástica. Un producto amigo del planeta. *Semilleros*, 3(5), 41–48. www.redi4.edublogs.org/semilleros/
- Greenpeace. (2013). *Plásticos en los océanos*.
- Guo, Y., Zhu, S., Chen, Y., & Li, D. (2019). Thermal properties of wood-plastic composites with different compositions. *Materials*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/ma12060881>
- Herrera, J. P., Bedoya-Ruiz, D., & Hurtado, J. E. (2018). Seismic behavior of recycled plastic lumber walls: An experimental and analytical research. *Engineering Structures*, 177, 566–578. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.006>
- Hung, K. C., Yeh, H., Yang, T. C., Wu, T. L., Xu, J. W., & Wu, J. H. (2017). Characterization of wood-plastic composites made with different lignocellulosic materials that vary in their morphology, chemical composition and thermal stability. *Polymers*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/polym9120726>
- Hyvärinen, M., Ronkanen, M., & Kärki, T. (2019). The effect of the use of construction and demolition waste on the mechanical and moisture properties of a wood-plastic composite. *Composite Structures*, 210, 321–326. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.063>
- IDEAM (2018) Informe de monitoreo a la deforestación. <https://wmo.int/media/news-from-members/ideam-presento-los-datos-actualizados-del-monitoreo-la-deforestacion-en-2017>
- Ingeniería Electromecánica, C. DE, & José Efrén Barbosa Galarza Ing. Héctor Raúl Reinoso Peña herrera, I. (n.d.). *Universidad técnica de cotopaxi facultad de ciencias de la ingeniería y aplicadas “análisis de la composición y propiedades mecánicas de la madera plástica reciclada (WPC)” Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Electromecánico*.
- Isaza, C. A. V., Yepes, W. U., & Mena, J. (2022). Mechanical performance of polyolefinic wood plastic composites. *Revista Lasallista de Investigación*, 19(1), 265–284. <https://doi.org/10.22507/rli.v19n1a16>
- Informe de sostenibilidad del metro de Medellín (2021). /Memoria-de-Sostenibilidad-2021%20(1).pdf
- Jawaid, M., Singh, B., Kian, L. K., Zaki, S. A., & Radzi, A. M. (2023). Processing Techniques on Plastic Waste Materials for Construction and Building Applications. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 100761. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100761>

- Jian, B., Mohrmann, S., Li, H., Li, Y., Ashraf, M., Zhou, J., & Zheng, X. (2022). A Review on Flexural Properties of Wood-Plastic Composites. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 19). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym14193942>
- Jiang, L., Fu, J., & He, C. (2020). Reliability analysis of wood-plastic composites in simulated seawater conditions: Effect of iron oxide pigments. *Journal of Building Engineering*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101318>
- Josaga, S. A. S., Córdoba, J., Andres, B., Gaona, F., Sair, V., Lozano, D., Presentado, L., Florinda, I., & Moreno, S. (2020a). *EDIFICACIONES PRESENTADO POR*.
- Josaga, S. A. S., Córdoba, J., Andres, B., Gaona, F., Sair, V., Lozano, D., Presentado, L., Florinda, I., & Moreno, S. (2020b). *Edificaciones presentado por*.
- Kajaks, J., Kalnins, K., & Naburgs, R. (2018). Wood plastic composites (WPC) based on high-density polyethylene and birch wood plywood production residues. *International Wood Products Journal*, 9(1), 15–21. <https://doi.org/10.1080/20426445.2017.1410997>
- Keskisaari, A., & Kärki, T. (2018). The use of waste materials in wood-plastic composites and their impact on the profitability of the product. *Resources, Conservation and Recycling*, 134, 257–261. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.023>
- Koay, S. C., Subramanian, V., Chan, M. Y., Pang, M. M., Tsai, K. Y., & Cheah, K. H. (2018). Preparation and Characterization of Wood Plastic Composite Made Up of Durian Husk Fiber and Recycled Polystyrene Foam. *MATEC Web of Conferences*, 152. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815202019>
- Lemus, J. E. G. (n.d.). *Propiedades Físico Mecánicas de la madera plástica elaborada con polímeros reciclados como aglutinantes Fecha enviada: 5 enero 2022 Fecha corregida: 27 enero 2022 Canalización del Conocimiento Científico 27*.
- López Rodríguez, D. F., & Rojas González, A. F. (2018). Factores que influncian las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de materiales compuestos maderos plásticos. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 12(23), 93–102. <https://doi.org/10.31908/19098367.3708>
- López, Y. M., Gonçalves, F. G., Paes, J. B., Gustave, D., Gutemberg de Alcântara Segundinho, P., Vicente de Figueiredo Latorraca, J., Gomes da Silva, E. S., Theodoro Nantet, A. C., & Prata Filho, C. M. (2022). Comparative study of different technological processes on the physical-mechanical properties and flammability of wood plastic composite. *Journal of Building Engineering*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104391>

- Martínez López, Y., Paes, J. B., & Martínez Rodríguez, E. (2018). *Fireproof properties of wood plastic composite produced with different forest species and recycled thermoplastics*.
<http://orcid.org/0000-0001-7141-4823>
- Martínez-López, Y., Fernández-Concepción, R. R., Álvarez-Lazo, D. A., García-González, M., & Martínez-Rodríguez, E. (2014). Evaluation of physico-mechanical properties of wood-plastic boards produced in Cuba compared to conventional boards. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 20(3), 227–236.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.02.003>
- Martínez-López, Y. I., García-González, M. I., Ricardo Fernández-Concepción, R. I., Álvarez-Lazo, D. I., & Martínez-Rodríguez III, E. (2017). *ARTÍCULO ORIGINAL ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO* *Proceso de transformación de la materia prima para tableros de madera plástica Transformation process of raw material for wood plastic boards*. <http://www.rii.cujae.edu.co>
- Metro Línea 1. (2022). *PLAN DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO*.
- Moreno, P., Rodrigue, D., Giroux, Y., Ballerini, A., & Gacitúa, W. (2013). Caracterización mecánica y morfológica de termoplásticos reciclados espumados reforzados con subproductos de madera. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 15(1), 3–16.
<https://doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000001>
- NTC-ISO 14040-2022. (n.d.).
- Nyika, J., & Dinka, M. (2022). Recycling plastic waste materials for building and construction Materials: A minireview. *Materials Today: Proceedings*, 62, 3257–3262.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.226>
- Pillajo, C., & Maribel, G. (n.d.). *Escuela politécnica nacional facultad de ingeniería mecánica caracterización de un compuesto de madera plástica obtenido mediante extrusión y reforzado con polvo de bambú y nanoarcillas*.
- Ratanawilai, T., & Taneerat, K. (2018). Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering. *Construction and Building Materials*, 172, 349–357.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266>

- Rocha Álvarez, D. E., Pérez, C., & Villanueva, J. (2020). Material ecológico para construcción en vidrio, arena y poliplásticos (VAPoli). *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 30(2), 49–66. <https://doi.org/10.18359/rcin.4643>
- Rocha, D. B., & Rosa, D. dos S. (2019). Coupling effect of starch coated fibers for recycled polymer/wood composites. *Composites Part B: Engineering*, 172, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.052>
- Santos, F. A. Dos, Canto, L. B., Lucia, A., Da Silva, N., Lea, L., Visconte, Y., & Pacheco, E. B. A. V. (n.d.). *Processing and Properties of Plastic Lumber*. www.intechopen.com
- Segerholm, K. (2012). *Characteristics of wood plastic composites based on modified wood-moisture properties, biological resistance and micromorphology*.
- Shu, Z., Song, J., Yuan, Y., Chen, J., Zhang, S., Huang, L., & Liu, S. (2018). Lignocellulosic composite films. In *BioResources* (Vol. 13, Issue 4).
- Talcott, S., Uptmor, B., & McDonald, A. G. (2023). Evaluation of the Mechanical, Thermal and Rheological Properties of Hop, Hemp and Wood Fiber Plastic Composites. *Materials*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/ma16114187>
- Turku, I., K€ Arki, T., & Puurtinen, A. (2018). Durability of wood plastic composites manufactured from recycled plastic. *Heliyon*, e00559. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018>
- Turku, I., Keskiisaari, A., Kärki, T., Puurtinen, A., & Marttila, P. (2017). Characterization of wood plastic composites manufactured from recycled plastic blends. *Composite Structures*, 161, 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.073>
- Vanegas-Padilla, A. P., Fuentes-Fuentes, K. D., & Torres-Cervera, K. P. (2021). Comparación del ACV de 2 estibas construidas con madera natural y madera plástica en Simapro 8.4.0. *Revista Politécnica*, 17(34), 9–29. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v17n34a1>
- Vedrtnam, A., Kumar, S., & Chaturvedi, S. (2019). Experimental study on mechanical behavior, biodegradability, and resistance to natural weathering and ultraviolet radiation of wood-plastic composites. *Composites Part B: Engineering*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107282>
- Zárate & Gutiérrez. (2012). *Caracterización de maderas usadas en Boyacá de acuerdo con el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. 21(32).

Zhu, Z., Buck, D., Wang, J., Wu, Z., Xu, W., & Guo, X. (2022). Machinability of Different Wood-Plastic Composites during Peripheral Milling. *Materials*, 15(4).
<https://doi.org/10.3390/ma15041303>

GLOSARIO

ACA (Azodicarbonamida): Agente espumante utilizado en la producción de compuestos de madera y plástico (WPC) para mejorar propiedades como la densidad y la estructura celular (Moreno et al., 2013).

Álcalis: Sustancias químicas con carácter básico, consideradas en la investigación en relación con su interacción con los compuestos de madera y plástico (Jiang et al., 2020).

AM (Anhídrido Maléico): Compuesto químico relevante en la investigación, utilizado, por ejemplo, como agente de acoplamiento en la producción de compuestos de madera y plástico (Moreno et al., 2013).

Anisotropía: Propiedad de un material que exhibe diferentes propiedades físicas o mecánicas en distintas direcciones, como la madera natural (Céspedes & Gaitán, 2020).

Bagazo de Caña: Material fibroso residual obtenido después de extraer el jugo de la caña de azúcar, utilizado en la fabricación de compuestos de madera y plástico (Martínez et al., 2014).

Compuestos de madera y plástico (WPC): Materiales que combinan polímeros plásticos, como HDPE, PEBD, PVC, PS, PET y PP, con fibras orgánicas, produciendo un producto con propiedades mecánicas y físicas mejoradas (Santos et al., 2018).

Encofrados: Estructuras temporales utilizadas en la construcción para dar forma al hormigón fresco, donde los compuestos de madera y plástico pueden ser aplicados, considerando aspectos de resistencia y durabilidad (Metro Línea 1, 2022).

Extrusión: Proceso eficiente utilizado en la fabricación de madera plástica, donde los materiales son fundidos y formados a través de una boquilla (Turku et al., 2017).

Fibras Lignocelulósicas: Fibras derivadas de la madera u otras fuentes vegetales, utilizadas en la producción de compuestos de madera y plástico para mejorar propiedades mecánicas (Céspedes & Gaitán, 2020).

Frentes de Trabajo: Conjunto de actividades y operaciones relacionadas que se llevan a cabo en un lugar determinado dentro del sitio de construcción (Metro Línea 1, 2022).

Heterogéneo: Describe un sistema o material que no es uniforme en composición o estructura, con diferencias discernibles en sus partes constituyentes (Céspedes & Gaitán, 2020).

Hidrófobo: Indica la aversión o incapacidad de un material para interactuar con el agua, resistiendo su absorción o humectación (Céspedes & Gaitán, 2020).

Higroscópico: Se refiere a la capacidad de un material para absorber o retener agua del entorno, lo que puede afectar sus propiedades físicas y químicas (Céspedes & Gaitán, 2020).

Homogéneo: Se refiere a un sistema o material que es uniforme en composición o estructura, sin diferencias discernibles en sus partes constituyentes (Céspedes & Gaitán, 2020).

Isotrópico: Se refiere a un material que exhibe propiedades uniformes en todas las direcciones, sin anisotropía, lo que significa que las propiedades no varían con la dirección (Céspedes & Gaitán, 2020).

Maquinabilidad: Característica que evalúa la facilidad con la que un material puede ser trabajado mediante procesos de mecanizado, consideración importante en la aplicación de los compuestos de madera y plástico (Zhu et al., 2022).

Plastic Lumber: Tipo de madera plástica que consiste únicamente en plástico, ya sea reciclado o virgen, sin la mezcla de materiales naturales (Dias & Alvarez, 2016).

Propiedades Ignífugas: Características que indican la resistencia al fuego de un material, relevante para la seguridad en aplicaciones constructivas (Martínez et al., 2018).

Termocompresión: Proceso que implica la aplicación de calor y presión para la fabricación de compuestos de madera y plástico, influenciando sus propiedades físicas y mecánicas (Ding et al., 2021).

ANEXOS

Anexo 1.

Declaración de residuos de la PLMB

Anexo 2.

Tabla de formulación datos de residuos proyectados 5 años

Anexo 3.

Cotizaciones de la maquinaria y equipo

Anexo 4.

Tabla de cálculos de VPN y TIR