



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**DISEÑO Y EVALUACIÓN EN LA FABRICACIÓN SOSTENIBLE DE PLACAS
DE POLIPROPILENO MEDIANTE UN PROCESO TÉRMICO**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:
ROBERTO DEL CARMEN MORENO GUZMÁN

BAJO LA DIRECCIÓN DE:
DR. JOSÉ RAMÓN LAINES CANEPA

EN CODIRECCIÓN DE:
DR. JOSÉ AURELIO SOSA OLIVIER

VILLAHERMOSA, TABASCO. AGOSTO DE 2026

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día **02 de julio de 2026**, él que suscribe **Roberto del Carmen Moreno Guzman** alumno del Programa de **Lic. en Ingeniería Ambiental** con número de matrícula **172G24168** adscrito a la **División Académica de Ciencias Biológicas** de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la **Tesis** presentado para la obtención del título de **Licenciatura en Ingeniería Ambiental**, titulado **“DISEÑO Y EVALUACIÓN EN LA FABRICACIÓN SOSTENIBLE DE PLACAS DE POLIPROPILENO MEDIANTE UN PROCESO TÉRMICO”** dirigido por él **Dr. José Ramón Laines Canepa** y él **Dr. José Aurelio Sosa Olivier**.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentado de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a **02 de julio de 2026**.

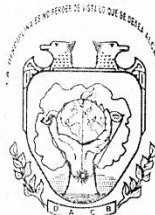


Roberto del Carmen Moreno Guzman



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2026
año de
**Margarita
Maza**

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 03 de Julio de 2026

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. ROBERTO DEL CARMEN MORENO GUZMÁN** egresado de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **"DISEÑO Y EVALUACIÓN EN LA FABRICACIÓN SOSTENIBLE DE PLACAS DE POLIPROPILENO MEDIANTE UN PROCESO TÉRMICO"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADEMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado





UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2026
año de
Margarita
Maza

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

JULIO 03 DE 2026

C. ROBERTO DEL CARMEN MORENO GUZMÁN
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL
P R E S E N T E

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 111 al 113 del Cap. IV del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"DISEÑO Y EVALUACIÓN EN LA FABRICACIÓN SOSTENIBLE DE PLACAS DE POLIPROPILENO MEDIANTE UN PROCESO TÉRMICO"**, asesorado por el Dr. José Ramón Laines Canepa y Dr. José Aurelio Sosa Olivier, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. José Roberto Hernández Vidal, Dra. Melina del Carmen Uribe López, Dr. José Ramón Laines Canepa, MIPA. Sergio Ramos Herrera y MCA. Deysi del Carmen Marín García.

A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA, ACCIÓN EN LA FE


DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
Archivo.





UJAT

UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2026
año de
Margarita
Maza

División Académica de Ciencias Biológicas DIRECCIÓN

Villahermosa, Tab. 02 de julio de 2026

C. ROBERTO DEL CARMEN MORENO GUZMÁN

Pas. de la Lic. en Ingeniería Ambiental

Presente

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (**Tesis**), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su trabajo recepcional **DISEÑO Y EVALUACIÓN EN LA FABRICACIÓN SOSTENIBLE DE PLACAS DE POLIPROPILENO MEDIANTE UN PROCESO TÉRMICO.**

Se incluyó citas, se excluyó bibliografía y se estableció el umbral de exclusión de coincidencias pequeñas a 16 palabras.

RESULTADO DE SIMILITUD	0 %
	83 páginas y 14723 palabras

Finalmente, se le solicita al **C. ROBERTO DEL CARMEN MORENO GUZMÁN**, integrar en la versión final del trabajo recepcional, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p. Dr. José Ramón Laines Canepa. Director de trabajo recepcional
C.c.p. Dr. José Aurelio Sosa Olivier. Codirector de trabajo recepcional
C.c.p. Archivo

KM 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
VILLAHERMOSA, CENTRO, TABASCO, MEX.

Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Uso de papel reciclado economiza energía, evita contaminación y desperdicio de agua y ayuda a conservar los bosques

ROBERTO DEL CARMEN MORENO GUZMÁN

DISEÑO Y EVALUACIÓN EN LA FABRICACIÓN SOSTENIBLE DE PLACAS DE POLIPROPILENO MEDIANTE UN PROCESO TÉ...

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:604305239

Fecha de entrega

2 jul 2026, 4:50 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

2 jul 2026, 4:52 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Roberto del C. Moreno Guzmán_TR tesis.pdf

Tamaño del archivo

2.2 MB

83 páginas

14.723 palabras

90.327 caracteres

0% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 16 palabras)
- Abstract
- Trabajos entregados

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 0%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 0%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1

Internet

www.plasticgarbageproject.org

<1%

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 02 de julio de 2026.

Por medio de la presente manifiesto haber colaborado como AUTOR en la producción, creación y/o realización de la obra denominada **“DISEÑO Y EVALUACIÓN EN LA FABRICACIÓN SOSTENIBLE DE PLACAS DE POLIPROPILENO MEDIANTE UN PROCESO TÉRMICO”** Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES



Roberto del Carmen Moreno Guzman

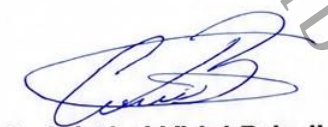


Dr. José Ramón Laines Canepa

TESTIGOS



Dra. Julita Guadalupe Meza Cruz



C. Cristhel Vidal Brindis

DEDICATORIA.

En memoria de mis abuelos, y con un reconocimiento profundamente especial a mi abuela paterna, Gloria Inés Estrada Cantoral, quien en vida asumió con amor el papel de madre y padre. Gracias por brindarme una educación basada en valores, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por enseñarme, con tu ejemplo de trabajo, sacrificio, fortaleza y perseverancia, que los sueños se alcanzan con esfuerzo y determinación. Aunque hoy no estés físicamente a mi lado, tu amor, tus enseñanzas y tu recuerdo permanecen vivos en cada paso que doy y en cada logro que alcanzo. Este triunfo también te pertenece.

A mi hija, Gloria Arisbeth Moreno Gómez, el motivo de cada uno de mis esfuerzos inspiración y la fortaleza para seguir adelante y por recordarme, cada día, que no existen obstáculos imposibles cuando se lucha con amor, compromiso y perseverancia. Cada sacrificio realizado durante este camino tuvo como propósito construir un mejor presente y un futuro lleno de oportunidades para ti. Este logro es, ante todo, una muestra del inmenso amor que siento por ti.

A mis hermanos, con el deseo de que este logro sea una prueba de que la disciplina, la dedicación, la constancia y el esfuerzo son capaces de vencer cualquier adversidad. Espero que este momento los motive a perseguir sus propios sueños con valentía, confianza y determinación, convencidos de que ninguna meta es inalcanzable cuando se trabaja con honestidad y perseverancia.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que, de una u otra forma, formaron parte de este camino. A quienes me brindaron una palabra de aliento, compartieron sus conocimientos, confiaron en mis capacidades y me acompañaron en los momentos de mayor dificultad.

AGRADECIMIENTOS.

Expreso mi más profundo y sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que, con su apoyo, orientación y confianza, hicieron posible la realización y culminación de esta investigación, presentada como requisito para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Ambiental.

De manera especial, agradezco a mis directores de tesis, Dr. José Ramón Laínes Canepa y Dr. José Aurelio Sosa Olivier, por su invaluable orientación científica y metodológica, sus valiosas observaciones y el acompañamiento brindado durante el desarrollo de este proyecto. Su confianza, compromiso y constante motivación fueron fundamentales para fortalecer esta investigación y hacer posible su culminación.

Expreso también mi reconocimiento a los integrantes de mi Comité de Revisión: al Dr. José Roberto Hernández Barajas, Presidente; a la Dra. Melina del Carmen Uribe López, Secretaria; y al Dr. José Ramón Laínes Canepa, Vocal, por sus observaciones, recomendaciones y aportaciones académicas que enriquecieron significativamente este trabajo. Asimismo, agradezco al M.I.P.A. Sergio Ramos Herrera y a la M.C.A. Deysi del Carmen Marín García, suplentes del Comité, por su disposición y participación en este proceso académico.

Agradezco al Mtro. Marco Antonio Hernández Cobián por facilitar el acceso a la plataforma Turnitin, contribuyendo al fortalecimiento de la integridad y la originalidad de esta investigación. Mi gratitud al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Tabasco (CCYTET) por el financiamiento otorgado para el desarrollo de este proyecto, al Laboratorio de Pruebas de Resistencias de Materiales, así como a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, a los docentes de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental, al personal administrativo y de apoyo, al Director de la División Académica y al Rector, Lic. Guillermo Narváez Osorio, por su compromiso con la formación de profesionales y el fortalecimiento de la educación superior.

ÍNDICE DE CONTENIDO.

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	MARCO TEÓRICO.....	4
II.1	Los plásticos.....	4
II.1.1	El origen de los plásticos.	4
II.1.2	Los tipos de plásticos y su clasificación.....	5
II.1.2.1	PET (número 1).....	5
II.1.2.2	HDPE (número 2).....	5
II.1.2.3	PVC (número 3).....	5
II.1.2.4	LDPE O PEBD (número 4).....	6
II.1.2.5	Polipropileno (número 5).....	6
II.1.2.6	Poliestireno (número 6).....	7
II.1.2.7	Otros plásticos (número 7).....	7
II.2	Historia del uso de los plásticos y sus posibles aplicaciones.	8
II.2.1	Aplicación en embalaje industrial.....	9
II.2.2	Aplicación en área biomédica, medicina y atención sanitaria.	9
II.2.3	Aplicación en sector de industria automotriz.....	10
II.2.4	Aplicación en electrónica y de uso eléctrico.....	10
II.2.5	Aplicación dentro de la construcción y fabricación de materiales.....	11
II.2.6	Aplicación en sistemas de calidad agrícola.....	11
II.2.7	Aplicación de uso aeroespacial y aviación.....	11
II.3	Afectaciones del uso de plástico en la salud humana.	13

II.3.1	Medio de contaminación y/o exposición en humanos.	14
II.3.1.1	Vías respiratorias.	14
II.3.1.2	Vías digestivas.	14
II.3.1.3	Sistema endocrino.	14
II.3.1.4	Otros medios de contaminación.	15
II.4	Procesos de fabricación de placas de polipropileno.	15
II.4.1	Polimerización por adición.	15
II.4.2	Mezclado en fundido (melt blending).	16
II.4.3	Extrusión y triturado de láminas y placas.	16
II.4.4	Moldeo por compresión.	16
II.4.5	Fabricación asistida por ultrasonido.	16
II.5	MDF Melamina.	17
II.5.1	Características generales.	17
II.5.2	Aplicaciones principales.	18
III.	JUSTIFICACIÓN.	19
IV.	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.	21
IV.1	Pregunta general.	21
IV.2	Preguntas específicas.	21
IV.2.1	De parámetros térmicos.	21
IV.2.2	De parámetros mecánicos.	21
IV.2.3	De consumo energético.	21
IV.2.4	De costos.	21
IV.2.5	De sostenibilidad.	22
V.	HIPÓTESIS.	23

VI.	OBJETIVOS.	23
VI.1	Objetivo general.	23
VI.2	Objetivos específicos.	23
VII.	METODOLOGÍA.	24
VII.1	Generalidades de la metodología	24
VII.2	Área de estudio.	27
VII.2.1	Área de estudio de la fabricación de las placas de polipropileno.	27
VII.2.2	Área de aplicación de resistencia a flexión, compresión de placas y cilindros de PP, PPRT Y MDF.	28
VII.3	Elaboración de placas con polipropileno residual.	29
VII.3.1	Recolección del material.	29
VII.3.2	Proceso de trituración de materiales a base de polipropileno.	30
VII.3.2.1	Especificaciones de equipo de trituración.	30
VII.3.2.2	Carga de material a trituradora.	30
VII.3.2.3	Recolección de material en dispensadora.	31
VII.3.3	Moldeo y formación de placa en horno.	33
VII.3.3.1	Proceso de postlavado y tamizado de polipropileno triturado.	33
VII.3.3.2	Preparación de materiales para el empotramiento en molde.	34
VII.3.3.3	Control en el peso de materiales.	34
VII.3.3.4	Preparación del molde y polipropileno a proceso térmico.	35
VII.3.3.5	Integración de polipropileno a área de proceso térmico.	38
VII.3.3.6	Aislamiento del PP en horno industrial.	38
VII.3.3.7	Monitoreo de fundición del polipropileno.	39
VII.3.3.8	Prensado de placas.	40
VII.3.3.9	Desmolde de placas de PP.	41

VII.4	Preparación de muestras para pruebas mecánicas.....	42
VII.4.1	Placas para pruebas de flexión.	42
VII.4.2	Preparación de cilindros para pruebas de compresión.....	42
VII.4.3	Ejecución de pruebas mecánicas en placas.....	43
VII.4.4	Procedimiento para la determinación de la máxima flexión con base en su resistencia.....	46
VII.4.5	Aplicación de prueba mecánica de compresión para cilindros de PP peletizado y PP residual triturado.....	47
VII.5	Procedimiento para el cálculo de la resistencia a la compresión.	48
VII.6	Análisis de sustentabilidad.....	50
VII.7	Indicaciones para validar cálculos del gasto de corriente eléctrica.	50
VII.8	Indicaciones para validar cálculos de la huella de carbono.	52
VII.9	Análisis estadístico.....	53
VIII.	RESULTADOS.....	55
VIII.1	Resultados generales en flexión de placas.....	55
VIII.2	Resultados generales de resistencia a la compresión en cilindros.	57
VIII.3	Flexión MDF melamina vs PPRT.....	58
VIII.4	Análisis de sustentabilidad.....	60
VIII.4.1	Consumo energético.	60
VIII.4.2	Huella de carbono.	63
VIII.4.3	Costos y materiales.	64
VIII.4.4	Relación costo-desempeño mecánico.....	66
VIII.4.5	Análisis multicriterio de materiales	68
IX.	DISCUSIÓN.....	71
X.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	74
X.1	Conclusiones.....	74

X.2	Recomendaciones.....	75
XI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1. Diagrama del proceso generalizado para la fabricación de placas de polipropileno.	26
Ilustración 2. Geolocalización de laboratorios y Centro de Acopio para el Tratamiento de Residuos en la DacBiol-UJAT.	27
Ilustración 3. Ubicación de laboratorio de Resistencia a Materiales para construcción.	28
Ilustración 4. Recolección de materiales de polipropileno.	29
Ilustración 5. Trituradora industrial con Carga de material a base de polipropileno.	31
Ilustración 6. Recolección del polipropileno en dispensador.	32
Ilustración 7. Proceso de postlavado.	33
Ilustración 8. Peso de Polipropileno.	34
Ilustración 9. Limpieza y lubricación de molde para placa de PP.	35
Ilustración 10. Dispersión de polipropileno en molde.	36
Ilustración 11. Nivelado de polipropileno en molde.	37
Ilustración 12. Sellado con ajuste manual de PP a proceso térmico.	37
Ilustración 13. Transporte y aseguramiento de molde en horno industrial.	38
Ilustración 14. Monitoreo de fundición de polipropileno residual triturado y peletizado.	39
Ilustración 15. Prensado de molde en caliente.	40
Ilustración 16. Placa de polipropileno a base de pellets.	41
Ilustración 17. Molde de cilindros de PP.	43
Ilustración 18. Datos y registro de calibración de equipo de pruebas.	44
Ilustración 19. Proceso de flexión en placas.	45
Ilustración 20. proceso de compresión en cilindros de pp.	48
Ilustración 21. Mediciones de consumo energético.	53
Ilustración 22. Comportamiento térmico durante el proceso de fabricación de placas y cilindros de PP y PPRT.	61

Ilustración 23. Consumo de energía eléctrica por equipo y muestra durante la fabricación de placas.....	62
Ilustración 24. Participación porcentual promedio de cada equipo en el consumo energético total del proceso.	62
Ilustración 25. Comparación de costo por kilogramo de material (México, 2024–2025).....	66
Ilustración 26. Análisis multicriterio de materiales (escala 0–10 por dimensión). 68	
Ilustración 27. Polígono multicriterio de sustentabilidad.	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Informe de carga bruta y flexión máxima de placas PP y PPRT.....	56
Tabla 2. Datos de carga bruta y compresión de PP y PPRT.	57
Tabla 3. Comparación de placas polipropileno triturado residual y MDF melamina.	59
Tabla 4. Consumo de energía eléctrica por equipo y muestra durante la fabricación de placas de PP.	60
Tabla 5. Huella de carbono por muestra durante el proceso de fabricación de placas de polipropileno.....	63
Tabla 6. Análisis de costos por material (Mercado mexicano, 2024–2025)	65
Tabla 7. Indicador CD (costo-desempeño).	67

ÍNDICE DE ECUACIONES.

Ecuación 1. Resistencia a la flexión.....	46
Ecuación 2. Capacidad máxima a la compresión.....	49
Ecuación 3. Cálculo de área de cilindro.	49
Ecuación 4. Sustitución de datos en ecuación de área de cilindro.....	49
Ecuación 5. sustitución final de área de cilindro para cálculo de compresión.	50
Ecuación 6. Cálculo de consumo eléctrico.....	50
Ecuación 7. Cálculo de consumo eléctrico total.	51
Ecuación 8. Cálculo de huella de carbono.	52

DISEÑO Y EVALUACIÓN EN LA FABRICACIÓN SOSTENIBLE DE PLACAS DE POLIPROPILENO MEDIANTE UN PROCESO TÉRMICO.

RESUMEN.

La generación de residuos plásticos constituye uno de los principales desafíos ambientales a nivel mundial debido al incremento de su producción y a las limitadas alternativas para su valorización. En México, el polipropileno (PP) representa una proporción significativa de los residuos plásticos posconsumo; sin embargo, gran parte de este material aún no se reincorpora a procesos productivos. En el estado de Tabasco, esta problemática se intensifica por el aumento en la generación de residuos sólidos urbanos, lo que hace necesario desarrollar tecnologías sostenibles bajo los principios de la economía circular.

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar y evaluar un proceso sostenible para la fabricación de placas de polipropileno residual triturado (PPRT) mediante un proceso térmico controlado, comparando su desempeño técnico, económico y ambiental con placas elaboradas a partir de polipropileno peletizado (PP) y MDF melamina como material de referencia. La metodología comprendió la recuperación, clasificación, limpieza, trituración, fundición, moldeo y prensado del material reciclado, así como ensayos de resistencia mecánica, consumo energético, huella de carbono y costos de producción.

Los resultados mostraron que las placas de PPRT alcanzaron una resistencia promedio a la flexión de 93.21 kg/cm², estadísticamente equivalente al PP peletizado (100.03 kg/cm²) y superior al MDF melamina (24.33 kg/cm²). En compresión obtuvieron 110.16 kg/cm², confirmando su viabilidad para aplicaciones semiestructurales. La condición óptima correspondió al procesamiento de 7.0 kg de material a 270 °C durante 120 minutos. Se concluye que el proceso desarrollado constituye una alternativa técnicamente viable, económicamente competitiva y

ambientalmente sostenible para fortalecer la economía circular y el aprovechamiento de residuos plásticos en México.

PALABRAS CLAVES: Polipropileno residual triturado, economía circular, resistencia mecánica, sustentabilidad, MDF melamina.

ABSTRACT.

Plastic waste generation has become one of the world's major environmental challenges due to increasing production and limited recovery alternatives. In Mexico, polypropylene (PP) represents a significant share of post-consumer plastic waste; however, much of this material is still not reincorporated into productive processes. In the state of Tabasco, this issue is intensified by the growing generation of municipal solid waste, highlighting the need for sustainable technologies based on circular economy principles.

This study aimed to design and evaluate a sustainable process for manufacturing recycled shredded polypropylene (RSPP) boards through a controlled thermal process, comparing their technical, economic, and environmental performance with boards produced from virgin polypropylene pellets (PP) and melamine-faced medium-density fiberboard (MDF) as a reference material. The methodology included the recovery, sorting, cleaning, shredding, melting, molding, and pressing of recycled polypropylene, followed by mechanical strength tests, energy consumption, carbon footprint, and production cost assessments.

The results showed that RSPP boards achieved an average flexural strength of 93.21 kg/cm², statistically equivalent to virgin polypropylene boards (100.03 kg/cm²) and higher than melamine-faced MDF (24.33 kg/cm²). Under compression, RSPP boards reached 110.16 kg/cm², confirming their suitability for semi-structural applications. The optimal manufacturing conditions were 7.0 kg of material processed at 270 °C for 120 minutes. The proposed process is a technically feasible,

economically competitive, and environmentally sustainable alternative that promotes circular economy strategies and plastic waste valorization in Mexico.

KEYWORDS: Recycled polypropylene; Circular economy; Plastic waste valorization; Thermal processing; Sustainability; Mechanical properties.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

I. INTRODUCCIÓN.

Los materiales plásticos se han consolidado como materiales de alto impacto para satisfacer diversas necesidades en contextos cotidianos, incluyendo el hogar, la medicina, la industria del embalaje, así como los sectores biomédico, automotriz y de la construcción. La creciente demanda de productos plásticos ha generado una expansión constante en los sectores energéticos y petroquímicos (Tahir et al., 2023).

En las últimas décadas, el polipropileno (PP) se ha posicionado de manera relevante como uno de los polímeros termoplásticos de mayor uso como consecuencia de su bajo costo, facilidad de procesamiento y propiedades mecánicas favorables, permitiendo así su aplicación en múltiples sectores industriales (Shahid et al., 2023). Así mismo, las poliolefinas que comprenden tanto el polipropileno (PP) como el polietileno (PE), constituyen los principales componentes de los residuos sólidos urbanos (RSU) como consecuencia de su uso generalizado en productos básicos. Estas resinas ofrecen buenas propiedades mecánicas y son fáciles de procesar; además, su alta disponibilidad y bajo costo de producción contribuyen significativamente a la contaminación plástica global (Jones et al., 2023).

El uso cotidiano de plásticos puede tener un impacto ambiental considerable que incluye la contaminación hídrica y del aire, relacionando varios compuestos químicos que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático a través de la huella de carbono asociada. El agotamiento de combustibles fósiles es un problema dado que los plásticos provienen de fuentes no renovables; por otro lado, la disposición final inadecuada de estos desechos en vertederos afecta negativamente a la fauna terrestre y marina. Por lo tanto, resulta esencial reducir el uso de plásticos e incrementar su reciclaje para mitigar estos impactos ambientales negativos (Tahir et al., 2023).

En México, el manejo de los RSU, en particular de los plásticos en consumo provenientes de polipropileno, ha cobrado importancia por las repercusiones ambientales y sociales que implica. A nivel nacional, se estima que se consumen cerca de siete millones de toneladas anuales de polímeros, de los cuales una proporción significativa corresponde al polipropileno (Chirinos, 2024).

La falta de gestión adecuada para estos residuos plásticos ha desencadenado una proliferación de vertederos expuestos directamente al medio ambiente y los recursos naturales, que representan una fuente considerable de contaminantes del suelo y agua además de emisiones significativas de gases efecto invernadero (SEMARNAT, 2023). En el estado de Tabasco se generan diariamente más de 2,437.5 toneladas de residuos sólidos urbanos, de las cuales aproximadamente 330 toneladas corresponden a residuos plásticos. De estas últimas, más de 100 toneladas provienen únicamente de seis colonias del municipio Centro (SEMADES, 2023).

Al igual que muchas partes del país, Tabasco enfrenta problemas graves relacionados con la disposición final inadecuada de residuos plásticos, práctica comúnmente observada que genera tiraderos a cielo abierto, tanto en áreas urbanas como rurales. Esta situación no solo contribuye a contaminar el suelo y las fuentes hídricas sino también genera emisiones nocivas para el clima (Román, 2020).

Además, la existencia de esos vertederos abiertos constituye un riesgo significativo para la salud pública local ya que pueden ser focos propensos para vectores transmisores de enfermedades; asimismo contaminan aguas potables e inducen problemas respiratorios como consecuencia de liberaciones tóxicas durante el proceso natural de descomposición.

Desde hace varios años, específicamente desde 2006, dentro de la institución de ciencias biológicas, perteneciente a la UJAT se realiza el manejo integral de residuos. Se estima que aproximadamente el 32 % del total generado puede recuperarse, mientras el resto termina en disposición final, lo que indica un potencial económico, social y ambiental de aprovechamiento mediante valorización y reciclaje (Ávila et al., 2020).

De esta manera se evidencia la necesidad urgente, dentro de la DACBiol, de integrar la gestión adecuada de residuos con especial énfasis a base de polipropileno. En este contexto, la presente investigación tiene como propósito crear y analizar un método sostenible para la fabricación de placas utilizando polipropileno reciclado, considerando aspectos mecánicos, económicos y medioambientales.

Asimismo, se evaluaron materiales de referencia (MDF melamina y PP peletizado) para determinar la viabilidad de la alternativa sustentable en aplicaciones de mobiliario y componentes estructurales ligeros, lo cual abre la posibilidad de futuros estudios especializados en ámbitos médicos, industriales y estructurales.

II. MARCO TEÓRICO.

II.1 Los plásticos.

II.1.1 El origen de los plásticos.

Los plásticos constituyen una amplia familia de materiales poliméricos con propiedades físicas y químicas diversas, lo que permite su aplicación en distintos sectores industriales en función de los requerimientos específicos del producto.

Los plásticos provienen principalmente de materias primas derivadas de hidrocarburos y sus subproductos petroquímicos; solo alrededor del 4 % de la producción mundial de petróleo y gas natural se destina a la fabricación de polímeros.

La vida útil de los productos plásticos varía en función de su composición, aplicación y condiciones de uso; algunos pueden permanecer durante años en servicio, mientras que otros, como envases y contenedores, se convierten rápidamente en residuos posconsumo. La gestión integral de los residuos plásticos constituye una prioridad para los gobiernos debido a los impactos ambientales asociados a su disposición inadecuada. Cuando estos residuos no son gestionados correctamente pueden generar contaminación del suelo, agua y aire; sin embargo, mediante estrategias de economía circular pueden reincorporarse como materia prima en nuevos procesos productivos (Sintac, 2024).

La norma NMX-E-232-2011 establece la clasificación de los plásticos mediante un sistema de codificación que facilita su identificación, separación y reciclaje, contribuyendo a una gestión adecuada de los residuos (Sintac, 2024). Por otra parte, la NOM-052-SEMARNAT-2005 establece el procedimiento para identificar si un residuo presenta características de peligrosidad, de acuerdo con criterios como corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad ambiental, inflamabilidad y biológico-infecciosidad (Sintac, 2024).

II.1.2 Los tipos de plásticos y su clasificación.

II.1.2.1 PET (número 1).

El plástico número uno, denominado PET o bien tereftalato de polietileno, es un termoplástico lineal proveniente del grupo de los poliésteres obtenido como resultado de la policondensación entre el etilenglicol y el ácido tereftálico. Se caracteriza por su durabilidad a la corrosión y desgaste, alto grado de transparencia y cristalinidad. Se ocupa en empaques de bebidas, botellas de alimentos, textiles y fibras. Es un material ligero, transparente y resistente, además de reciclable. Sin embargo, puede degradarse por el calor y la radiación solar, y su descomposición puede liberar compuestos peligrosos (Sintac, 2024).

II.1.2.2 HDPE (número 2).

El plástico identificado con el número 2 corresponde al polietileno de alta densidad (HDPE), un termoplástico incoloro y translúcido caracterizado por su elevada resistencia mecánica, química y térmica. Se manifiesta con densidades que oscilan entre 0.933 y 0.978 g/cm³. Esto proporciona una unión favorable de densidad/resistencia. Es más rígido y más resistente a la corrosión, temperatura e impactos que el polietileno de baja densidad. Se encuentra en productos como envases de leche, bolsas comerciales de compras y tuberías. Plástico duradero y resistente fácil de reciclar, su degradación puede ser lenta y la combustión produce productos químicos tóxicos (Sintac, 2024).

II.1.2.3 PVC (número 3).

El plástico número 3 está asociado con el cloruro de polivinilo (PVC), producido mediante cloruro de vinilo tomando el proceso de polimerización del mismo monómero es un polímero ligero, rígido, químicamente inerte y resistente a la corrosión. además, es un conductor eléctrico débil y dispositivo aislante (tanto de naturaleza eléctrica como térmica). Eso es lo que lo hace importante para muchas otras industrias. es un material para tuberías, marcos de ventanas y revestimientos de paredes. Presenta alta resistencia

a la intemperie inclusive a una variedad de agentes químicos, pero sus propiedades pueden degradarse en ambientes muy calurosos y soleados, libera productos químicos peligrosos si se quema, y reciclar un plástico hecho con él puede ser altamente complicado (Sintac, 2024).

II.1.2.4 **LDPE O PEBD (número 4).**

El polímero número cuatro hace referencia al PEBD o LDPE definido como polietileno de baja densidad, resina termoplástica que tiene una estructura muy amplia, por lo que su densidad está entre 0.911 y 0.941 g/cm³, menor que el HDPE. Es conocido por su generalidad en aplicaciones, excelente resistencia, buena barrera de humedad, resistencia química y claridad óptica. Se utiliza en bolsas de compras, envolturas de alimentos y ciertos tipos de tuberías. Presenta buena flexibilidad y resistencia además de ser fácil de reciclar; aunque puede ser altamente degradado por la radiación térmica o solar liberando sustancias tóxicas (Sintac, 2024).

II.1.2.5 **Polipropileno (número 5).**

El polipropileno (PP) definido como el plástico número 5, fue desarrollado a partir del refinado del petróleo. Este tipo de plástico, cuenta con la densidad básica más baja (entre 0.895 y 0.92 g/cm³), distintivo por sus propiedades mecánicas bien establecidas, resistencia a ácidos y solventes (especialmente a concentraciones muy altas), versatilidad en múltiples materiales y fibras. Se utiliza ampliamente para el envasado de alimentos, contenedores de medicamentos y juguetes. Es un material resistente y duradero; reciclable; sin embargo, su degradación puede ser difícil y al quemarlo emite muchos contaminantes (Sintac, 2024).

En la actualidad existen tres tipos específicos de polímero disponibles; el polipropileno copolímero (PPC) está compuesto por copolímeros de bloque de etileno-propileno que exhiben mejores propiedades de flexión, mayor estabilidad térmica y superior resistencia al agrietamiento por tensión que el PPH (polipropileno homopolímero) (Sintac, 2024). El

polipropileno copolímero aleatorio (PPR), producido por la polimerización desequilibrada de cadenas de etileno y propileno, cubre una gran profundidad y rango de fusión y presenta propiedades como excelente brillo, maleabilidad y transparencia, la resistencia al impacto es mayor que la del polipropileno homopolímero (Sintac, 2024). El polipropileno homopolímero (PPH) es el tipo común de PP, con buena soldabilidad y mecanizado, y una alta relación resistencia/peso de su propileno puro polimerizado, es la forma más comúnmente utilizada de PP en las industrias por su atractiva resistencia a los grados de corrosión y estabilidad térmica (Sintac, 2024).

II.1.2.6 Poliestireno (número 6).

El plástico número 6 se utiliza para la polimerización de poliestireno (PS) del monómero de estireno. Es un termoplástico duro y sólido a temperatura ambiente; la polimerización con calor lo ablanda y así puede ser moldeado. Tiene ligereza, durabilidad y efecto aislante y amortiguador en sus recubrimientos. Hay variantes que incluyen poliestireno para usos generales (GPPS), poliestireno de impactos altos (HIPS) y poliestireno de expansión (EPS). Se encuentra en vasos y platos desechables, bandejas de carne y contenedores de comida para llevar. Con suficiente característica de ligereza para ser fabricado o reciclado fácilmente, pero es propenso a la degradación y liberación de materiales peligrosos por exposición al calor y la luz (Sintac, 2024).

II.1.2.7 Otros plásticos (número 7).

El plástico número siete, son polímeros que no están categorizados como del 1 al 6. Esto incluye el policarbonato (PC), un plástico amorfo perteneciente a la derivado con base en poliésteres que se destacan por su resistencia, rigidez, dureza, favorable resistencia al impacto y baja cristalinidad. Además, el PC es fácil de moldear, se puede trabajar y tiene cierta resistencia a la temperatura tanto para el calor como para el intercambio de calor (Sintac, 2024).

Desde la perspectiva molecular, el policarbonato se caracteriza por su robustez frente a impactos y altas temperaturas, su capacidad translúcida comparable al vidrio, su baja densidad y su alta maleabilidad, que permite procesos como pintado, aserrado, taladrado y doblado. También hay plásticos combinados, como el acrilonitrilo butadieno estireno/policarbonato (ABS/PC), que se fabrican combinando la procesabilidad del ABS con las características mecánicas, tanto la capacidad de resistencia a temperaturas y al impacto del pc; otros plásticos con identificación compleja (Sintac, 2024).

Estos plásticos categorizados están en la categoría 7, que presenta la mayor preocupación, ya que tienen una composición química y material diversa, por lo que no son fácilmente reciclables. Potencialmente contienen sustancias peligrosas que generar daño al ambiente y a la salud de los seres vivos (por ejemplo, BPA), por lo que deben usarse con precaución con medidas de seguridad y reemplazarse por alternativas más seguras (Sintac, 2024). En resumen, el sistema de codificación ayuda en la categorización: plásticos del 1 al 6: los más comunes y la categoría 7 -sustancias más específicas. y en la categoría 1, exhibieron visibilidad, en la categoría 2, opacidad y, en las categorías 4, 5 y 6, resistencia térmica, permitiéndoles ser utilizados como contenedores de microondas en algunos casos (Sintac, 2024).

II.2 Historia del uso de los plásticos y sus posibles aplicaciones.

El auge de los plásticos y el interés científico e industrial en estos materiales se remonta a mediados del siglo XIX, asociado con la necesidad de sustituir materiales naturales como el marfil en la fabricación de productos comerciales, entre ellos las bolas de billar. Con el paso del tiempo, materiales como el polietileno, cloruro de polivinilo, poliestireno, polimetilmetacrilato, PET, polipropileno y poliamidas se integraron progresivamente a la vida cotidiana, fenómeno ampliamente asociado con el crecimiento exponencial del uso de materiales poliméricos en la sociedad moderna (Prieto-Ortiz, 2023).

Aunque estos materiales hacen posibles numerosas actividades, han generado una gran contaminación ambiental con afectaciones en la flora, fauna y salud humana. En el mundo se han consolidado reglamentos e incluso ley a base de estos residuos, así como estrategias para limitar el mal uso y la contaminación plástica. Sin embargo, la pandemia de COVID-19 generó otras afectaciones, entre ellas el uso excesivo de plásticos para equipos de protección personal, lo que incrementó la contaminación y las amenazas a la salud que lo rodean para la vida (Prieto-Ortiz, R. G., 2023).

II.2.1 Aplicación en embalaje industrial.

Los plásticos están en la base de la industria del envasado, hacen que todos nuestros productos sean ligeros, fuertes y protectores. Se basa en la fabricación de películas transparentes hasta contenedores rígidos, los plásticos ayudan a proteger los alimentos de gérmenes y enfermedades y proporcionan una vida útil extra larga. El PET y HDPE, se utilizan con frecuencia en el envasado de alimentos y bebidas por sus características naturales y no tóxicas. Ejemplos de ellos es el envasado farmacéutico como blíster, botellas y jeringas de plástico, garantizan la esterilización y seguridad de los artículos médicos. De la misma manera en bienes de consumo, en cuidado personal, cosméticos y productos para el hogar, los plásticos son valorados por su maleabilidad, bajo costo y capacidad para adoptar formas elaboradas que permiten diseños de marca distintivos (Eco Recycling Today, 2024).

II.2.2 Aplicación en área biomédica, medicina y atención sanitaria.

Los plásticos han transformado gradualmente, la industria de la salud, ofreciendo una gama de materiales esterilizables, asequibles y seguros para el equipo y dispositivos médicos: como lo son jeringas desechables, bolsas intravenosas e instrumentos quirúrgicos de plástico minimizan el riesgo de contaminación y podrían ser desechados de manera segura después de su uso. Proporcionando prótesis e implantes; hay una gran línea de plásticos de nueva generación como los polietilenos que se utilizan en

prótesis y reemplazos articulares como consecuencia de su durabilidad y compatibilidad biológica. (Eco Recycling Today, 2024).

II.2.3 Aplicación en sector de industria automotriz.

La industria automotriz incorpora plásticos para reducir el peso de los vehículos, mejorar la eficiencia del motor y optimizar los mecanismos de seguridad: partes interiores y exteriores: los plásticos se encuentran en tableros de instrumentos, parachoques y paneles de carrocería para minimizar el peso de los vehículos y un menor consumo en sistemas de combustible y motor: los plásticos de alto rendimiento también forman la base de los sistemas de combustible, baterías y componentes del motor, ya que son resistentes a altas temperaturas y oxidación. seguridad y aislamiento: los plásticos se utilizan para aislar componentes automotrices y reducir el ruido, lo que resulta en un proceso de conducción más cómodo y seguro (Eco Recycling Today, 2024).

II.2.4 Aplicación en electrónica y de uso eléctrico.

Los plásticos sirven como componentes vitales en la electrónica porque aseguran un fuerte aislamiento y durabilidad, proporcionan mucha flexibilidad, etc. Estos se aplican en la fabricación de carcasas y cubiertas, protegen partes delicadas como teléfonos inteligentes o televisores, brindan al dispositivo gran flexibilidad y portabilidad ligera.

En cableado y aislamiento: los plásticos aíslan los cables, proporcionándoles buena protección contra los riesgos de la electricidad, extendiendo la vida útil de los aparatos eléctricos.

Dispositivos portátiles: los plásticos ahora son parte de todas las tecnologías portátiles, como smartwatch o medidores de actividades físicas, donde el peso ligero, la durabilidad y la flexibilidad son primordiales (Eco Recycling Today, 2024).

II.2.5 Aplicación dentro de la construcción y fabricación de materiales.

Los polímeros han revolucionado la construcción con sus propiedades de resistencia, estabilidad y resistencia a las influencias ambientales: tuberías y fontanería: hay muchas aplicaciones que involucran tuberías de PVC, principalmente por razones como resistencia a la corrosión, ligereza y fácil instalación. aislamiento y techado: los materiales de aislamiento que incorporan plásticos pueden reducir los costos de energía mientras mejoran la eficiencia del edificio al asegurar temperaturas interiores sostenibles. ventanas y puertas: una mezcla de policarbonato y otros plásticos se utiliza para formar ventanas duraderas y resistentes a impactos, brindando seguridad y aislamiento (Eco Recycling Today, 2024).

II.2.6 Aplicación en sistemas de calidad agrícola.

Dentro de la agricultura, los plásticos aumentan la productividad y gestionan bien el agua, por lo que son cruciales en la agricultura actual: invernaderos y cubiertas de cultivos: el uso de películas plásticas en invernaderos protege los cultivos de condiciones climáticas severas y promueve un ambiente controlado para el crecimiento. películas de acolchado: el acolchado plástico retiene la humedad en el suelo, reduce las malezas y regula la temperatura, entre otros factores que aumentan los rendimientos de los cultivos. sistemas de riego: las tuberías de plástico en los sistemas de riego proporcionan una distribución eficiente del agua. reduce el desperdicio y apoya la agricultura sostenible (Eco Recycling Today, 2024).

II.2.7 Aplicación de uso aeroespacial y aviación.

De amplia importancia en la milicia, sectores gubernamentales, públicos y transporte privado es la industria aeroespacial, en la que utiliza plásticos para fabricar componentes ligeros y duraderos que mejoran el consumo energético y tienen una conciencia ambiental: uso de componentes interiores: marcos de asientos, paredes de cabina, material plástico de compartimentos superiores, reduce el peso de la aeronave mientras maximiza la seguridad. aislamiento térmico: los plásticos de alta resistencia térmica se

utilizan para aislar componentes sensibles, lo cual es crítico para optimizar el rendimiento y la seguridad a grandes altitudes. economía de combustible: los compuestos plásticos ligeros utilizados en componentes estructurales proporcionan ahorros de energía, resultando en la sostenibilidad de las aeronaves contemporáneas (Eco Recycling Today, 2024).

II.3 Afectaciones del uso de plástico en la salud humana.

Los plásticos, en especial cuando se fragmentan en microplásticos y nanoplásticos, representan un riesgo creciente para el bienestar del ser humano como consecuencia de su habilidad de ingresar al organismo por ingestión, inhalación y contacto dérmico. estas partículas pueden encontrarse en agua, alimentos, aire y superficies de uso cotidiano, facilitando su bioacumulación en tejidos y órganos (Ruíz-Santoyo et al., 2025).

Diversos estudios reportan que la exposición continua a partículas plásticas puede inducir estrés oxidativo, inflamación celular, alteraciones metabólicas y afectaciones en el sistema endocrino, principalmente por la presencia de aditivos químicos como ftalatos, bisfenoles y estabilizantes térmicos, los cuales pueden liberarse durante su degradación o procesamiento térmico (Ruíz-Santoyo et al., 2025).

Desde una perspectiva ocupacional, durante procesos de transformación térmica de polímeros como el polipropileno, pueden generarse emisiones de compuestos orgánicos volátiles, partículas ultrafinas y subproductos que incrementan el riesgo de exposición respiratoria. esto resulta especialmente relevante en investigaciones relacionadas con el diseño sostenible de placas de polipropileno reciclado, ya que la evaluación ambiental debe considerar no solo la reducción del residuo, sino también el bienestar del ser humano, tanto del operador, como del entorno cercano (Ruíz-Santoyo et al., 2025).

Asimismo, la acumulación prolongada de micro plásticos en el organismo se ha asociado con posibles alteraciones en sistemas respiratorio, digestivo, cardiovascular y neurológico, por lo que su estudio es fundamental en proyectos enfocados en economía circular, reciclaje mecánico y manufactura sostenible (Ruíz-Santoyo et al., 2025).

II.3.1 Medio de contaminación y/o exposición en humanos.

II.3.1.1 Vías respiratorias.

La vía respiratoria es una de las más importantes, ya que partículas suspendidas en el aire pueden ser inhaladas y depositarse en pulmones, bronquios y alvéolos. una vez retenidas, generan inflamación pulmonar, estrés oxidativo, irritación bronquial y daño tisular, incrementando el riesgo de enfermedades respiratorias crónicas y disminución de la función pulmonar (Celi-Simbaña, 2023).

II.3.1.2 Vías digestivas.

Por vía digestiva, los micro plásticos ingresan mediante agua, alimentos, bebidas calientes en envases plásticos y partículas liberadas por utensilios o empaques. en el tracto gastrointestinal pueden alterar el microbiota intestinal, la absorción de nutrientes y la barrera mucosa, provocando inflamación intestinal, disbiosis y posibles alteraciones metabólicas (Celi-Simbaña, 2023).

II.3.1.3 Sistema endocrino.

A nivel sistema endocrino, los plásticos pueden liberar aditivos como ftalatos, bisfenoles y retardantes térmicos, los cuales actúan como disruptores endocrinos, interfiriendo con hormonas tiroideas, sexuales y metabólicas. Esto puede generar alteraciones reproductivas, cambios hormonales, afectaciones en fertilidad y desregulación metabólica (Pereira, 2026).

También se han documentado efectos en el sistema nervioso, ya que nanopartículas plásticas de menor tamaño pueden atravesar barreras biológicas y llegar al cerebro. Este fenómeno se asocia con neuroinflamación, estrés oxidativo neuronal y riesgo potencial de enfermedades neurodegenerativas, como consecuencia de la capacidad de estas partículas para cruzar la barrera hematoencefálica (Pereira, 2026).

II.3.1.4 Otros medios de contaminación.

Durante la fabricación térmica de placas de polipropileno, la exposición ocupacional ocurre por la liberación de vapores, compuestos orgánicos volátiles y partículas ultrafinas generadas por el calentamiento del polímero. estas emisiones pueden afectar principalmente el sistema respiratorio y, en exposiciones prolongadas, contribuir a inflamación sistémica, irritación ocular y cefaleas ocupacionales (Celi-Simbaña, 2023).

II.4 Procesos de fabricación de placas de polipropileno.

A pesar de que ya existen varios procesos industriales establecidos para la producción de placas de polipropileno, de acuerdo a Shirvanimoghaddam et al. (2021) sigue habiendo una escasez notable de investigaciones centradas en métodos económicos y a escala semiindustrial vinculados a la economía circular. Esta falta resalta la urgencia de realizar estudios que combinen la valorización de residuos plásticos con procedimientos accesibles y fácilmente replicables, como el planteado en esta investigación, lo cual contribuiría a fomentar la sostenibilidad en contextos locales.

II.4.1 Polimerización por adición.

El proceso de síntesis del PP parte de la polimerización por adición. En la poliadición, los monómeros con dobles enlaces se unen para formar cadenas largas y repetitivas denominadas polímeros; Este proceso es utilizado para crear termoplásticos como el polipropileno. el control de este proceso determina directamente la estructura molecular del material y, en consecuencia, sus propiedades mecánicas y de procesamiento.

II.4.2 **Mezclado en fundido (melt blending).**

Shirvanimoghaddam et al. (2021) describen el mezclado en fundido como una estrategia directa para la manufactura de compuestos de polipropileno, destacando que parámetros como temperatura y velocidad de deformación influyen significativamente en las propiedades mecánicas del producto final. Este proceso resulta especialmente relevante en la fabricación de placas compuestas donde se requiere incorporar elastómeros o cargas para modificar la tenacidad del material.

II.4.3 **Extrusión y triturado de láminas y placas.**

La extrusión constituye el método industrial predominante para la fabricación continua de placas de polipropileno.

Durante el procedimiento de triturado de placas y láminas, el plástico pasa a través de un canal ancho y con planicie que define el grosor; estas láminas pueden cortarse o termoformarse para la fabricación final de baldes o paneles, siendo su rigidez y resistencia al impacto fundamentales en sectores como la construcción y el embalaje industrial (Shirvanimoghaddam et al., 2021).

II.4.4 **Moldeo por compresión.**

Durante la formación por compresión, la materia prima se coloca dentro del mismo, aplicando calor y compresión hasta que se tome la forma deseada en este caso la del molde; es una forma muy utilizada para la creación de piezas de gran tamaño y duraderas. Este proceso se aplica frecuentemente en la producción de placas de polipropileno reciclado, donde la homogeneidad del material puede ser menor que en el material virgen (Cabello Alemán, 2023).

II.4.5 **Fabricación asistida por ultrasonido.**

Shirvanimoghaddam et al. (2021) reportan que el proceso de fabricación asistido por ultrasonido, cuya primera aplicación en polímeros data de 1954, permite una

mejor procesabilidad del PP, una dispersión superior de rellenos en nanocompuestos y puede realizarse sin solventes ni modificaciones superficiales adicionales. Esto representa una ventaja relevante desde la perspectiva de la sostenibilidad del proceso, al reducir la utilización de agentes químicos auxiliares.

II.5 MDF Melamina.

II.5.1 Características generales.

El MDF melamina, también denominado MDF recubierto con melamina (MDF-LAM), es un tablero derivado de la madera fabricado a partir de fibras lignocelulósicas finas provenientes principalmente de residuos de madera, astillas industriales, aserrín y subproductos forestales, las cuales son desfibradas, secadas y mezcladas con resinas sintéticas, comúnmente urea-formaldehído (UF) o melamina-urea-formaldehído (MUF), para posteriormente ser compactadas mediante presión y temperatura controladas. Después del prensado, la superficie recibe un laminado decorativo impregnado con resina melamina, que mejora la resistencia superficial, la estabilidad dimensional y el acabado estético (Yilmaz, 2024; Rodríguez et al., 2024).

Desde su origen industrial, el MDF melamina surge como una evolución del MDF convencional para responder a necesidades de mayor resistencia al desgaste, humedad moderada, abrasión y facilidad de limpieza, definiéndolo como una de las opciones más utilizadas para diseño interior y mobiliario contemporáneo. Su procedencia está directamente relacionada con el aprovechamiento sostenible de residuos forestales y fibras recicladas de madera, alineándose con modelos de economía circular y valorización de residuos lignocelulósicos (Rodríguez et al., 2024).

En términos de composición, la capa superficial de melamina proviene de papeles decorativos impregnados con resina melamina-formaldehído, una

resina termoestable caracterizada por su elevada dureza, resistencia química y estabilidad térmica. Esta capa es fusionada al tablero durante la etapa de laminación, generando superficies lisas, texturizadas o imitaciones madera, piedra y otros acabados arquitectónicos (Dorieh et al., 2022).

II.5.2 **Aplicaciones principales.**

Las principales aplicaciones del MDF melamina se concentran en la fabricación de muebles, escritorios, closets, cocinas integrales, repisas, divisiones interiores, mobiliario escolar, recubrimientos murales, plafones, puertas y módulos de laboratorio, como consecuencia de su bajo costo, facilidad de mecanizado y alta calidad superficial (Yılmaz, 2024; Rodríguez et al., 2024) además, estudios recientes reportan que el MDF melamina ha ampliado su uso hacia elementos constructivos ligeros, revestimientos decorativos y aplicaciones termo activas en interiores, gracias a mejoras en la formulación de resinas y tratamientos superficiales que incrementan su desempeño mecánico y térmico (Dasiewicz et al., 2024).

III. JUSTIFICACIÓN.

La acumulación de residuos plásticos constituye uno de los principales desafíos ambientales del siglo XXI, como consecuencia de su persistencia en los ecosistemas y a su resistencia a la degradación biológica, lo que genera impactos negativos en la biodiversidad, la calidad del suelo y los cuerpos de agua (Leal-Martínez et al., 2022; Zhu et al., 2022). A nivel global, la producción de plásticos supera las 400 megatoneladas anuales, siendo el polietileno (PE) y el polipropileno (PP) los polímeros más utilizados y, por ende, los que mayor volumen de residuos generan (Geyer, 2021; PlasticsEurope, 2023). En particular, el polipropileno destaca por su creciente demanda industrial y su amplia presencia en productos de consumo, lo que incrementa su contribución al problema de contaminación ambiental.

En el contexto latinoamericano, y especialmente en el sureste mexicano, la gestión inadecuada de residuos plásticos agrava la problemática ambiental y social, afectando de manera significativa a comunidades con limitada infraestructura para su manejo (Mendoza-Tinoco et al., 2022). En regiones como Tabasco, caracterizadas por una alta biodiversidad y abundancia de ecosistemas acuáticos, la acumulación de residuos plásticos genera impactos económicos y ambientales relevantes, incrementando los costos de limpieza, afectando actividades productivas y deteriorando la calidad de vida de la población (Ramos-Leal et al., 2021).

Ante esta problemática, el reciclaje mecánico del polipropileno se presenta como una alternativa viable dentro del enfoque de economía circular, al permitir la valorización de residuos y la reducción del uso de materias primas vírgenes (Bazán, 2022). La transformación de estos residuos en productos de valor agregado, como placas estructurales para mobiliario y aplicaciones semiestructurales, contribuye simultáneamente a la disminución de la contaminación plástica y a la reducción de

la presión sobre recursos naturales, particularmente los de origen maderero (Tisserant et al., 2022; Arrieta et al., 2023).

En este sentido, la comparación entre materiales reciclados de polipropileno y materiales convencionales como el MDF melamina resulta fundamental para determinar la viabilidad técnica de su sustitución. El MDF presenta limitaciones significativas en ambientes tropicales húmedos, como la absorción de humedad, la deformación estructural y la emisión de compuestos orgánicos volátiles, lo que reduce su vida útil y aumenta su impacto ambiental (Cheng et al., 2022). Por el contrario, el polipropileno reciclado ofrece propiedades como resistencia química, durabilidad e hidrofobicidad, lo que lo posiciona como una alternativa potencialmente superior en dichas condiciones (López-Farías et al., 2022).

Asimismo, en el ámbito institucional, la generación de residuos de polipropileno dentro de la DACBIOL-UJAT representa una oportunidad para implementar estrategias de gestión sostenible basadas en la valorización de materiales. La aplicación de procesos de reciclaje dentro del entorno universitario no solo permite reducir la cantidad de residuos generados, sino que también fomenta la formación de una cultura ambiental orientada a la sustentabilidad, alineada con los principios de la economía circular y los objetivos de la Agenda 2030, particularmente el Objetivo de Desarrollo Sostenible 12 relativo a la producción y consumo responsables (Lozano et al., 2022).

En este contexto, la presente investigación se justifica al proponer una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable para la valorización del polipropileno residual generado en la DACBIOL-UJAT, mediante su transformación en placas con potencial aplicación en mobiliario y elementos estructurales ligeros. Esta propuesta contribuye a la reducción de residuos, a la sustitución de materiales de mayor impacto ambiental y al fortalecimiento de modelos de desarrollo sostenible en el ámbito universitario y regional.

IV. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.

IV.1 Pregunta general.

¿Bajo qué condiciones experimentales las placas fabricadas a partir de polipropileno residual triturado presentan un desempeño mecánico, económico y ambiental competitivo frente a las placas de MDF melamina?

IV.2 Preguntas específicas.

IV.2.1 De parámetros térmicos.

¿Qué condiciones térmicas de fabricación permiten obtener placas homogéneas de polipropileno residual triturado mediante el proceso térmico propuesto?

IV.2.2 De parámetros mecánicos.

¿Qué resistencia a la flexión presentan las placas fabricadas con polipropileno residual triturado en comparación con las placas de PP peletizado y MDF melamina? ¿Qué resistencia a la compresión presentan los cilindros elaborados con PP peletizado y polipropileno residual triturado?

IV.2.3 De consumo energético.

¿Cuánta energía eléctrica consume la fabricación de una placa bajo las condiciones experimentales evaluadas? ¿Qué etapa del proceso de fabricación concentra el mayor consumo energético: trituración, fusión en horno o prensado? ¿Cómo varía el consumo energético en función del peso del material procesado?

IV.2.4 De costos.

¿Cuál es el costo unitario estimado de fabricación por placa de polipropileno bajo condiciones piloto? ¿Qué costo energético representa cada placa producida? ¿Qué

material presenta la mejor relación costo-desempeño mecánico entre el PP peletizado, el PPRT y el MDF melamina?

IV.2.5 De sostenibilidad.

¿Qué ventaja ambiental representa el uso de polipropileno residual triturado frente al polipropileno virgen en términos de emisiones de CO₂ equivalente? ¿Cuál es la huella de carbono asociada al proceso de fabricación de placas de polipropileno bajo las condiciones evaluadas? ¿De qué manera el aprovechamiento del polipropileno residual contribuye a estrategias de economía circular y reducción de residuos sólidos urbanos?

V. HIPÓTESIS.

H1: Las placas fabricadas a partir de polipropileno residual triturado (PPRT) presentarán una resistencia a la flexión igual o superior a la del MDF melamina y propiedades mecánicas comparables a las obtenidas con polipropileno peletizado.

H2: El uso de polipropileno residual triturado (PPRT) permitirá reducir el impacto ambiental y los costos de producción en comparación con el MDF melamina.

VI. OBJETIVOS.

VI.1 Objetivo general.

Diseñar y evaluar un proceso de fabricación sostenible de placas de polipropileno, considerando su desempeño mecánico, viabilidad económica e impacto ambiental.

VI.2 Objetivos específicos.

- Diseñar un proceso de fabricación eficiente orientado a mejorar la resistencia mecánica y durabilidad de las placas de polipropileno.
- Comparar el desempeño mecánico de las placas de polipropileno frente al MDF melamina mediante pruebas de flexión y compresión.
- Evaluar la viabilidad económica del proceso de fabricación, considerando los costos de materiales e insumos.

VII. METODOLOGÍA.

VII.1 Generalidades de la metodología

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental, exploratorio y a escala piloto, organizado en una secuencia cronológica de actividades realizadas en laboratorio. Se fabricaron placas 180cm x 90cm y de 20 × 20 cm con polipropileno peletizado (PP), polipropileno residual triturado (PPRT) y MDF melamina como material de referencia; adicionalmente, se elaboraron cilindros de 10 cm de altura y 5 cm de diámetro con PP peletizado y PPRT para las pruebas de compresión.

Para cada condición experimental se elaboraron cuatro muestras. El tamaño de muestra se estableció con base en estudios exploratorios de desarrollo tecnológico y en las limitaciones operativas derivadas del proceso de fabricación a escala piloto, considerando la disponibilidad de materiales, tiempo de procesamiento y capacidad del equipo utilizado.

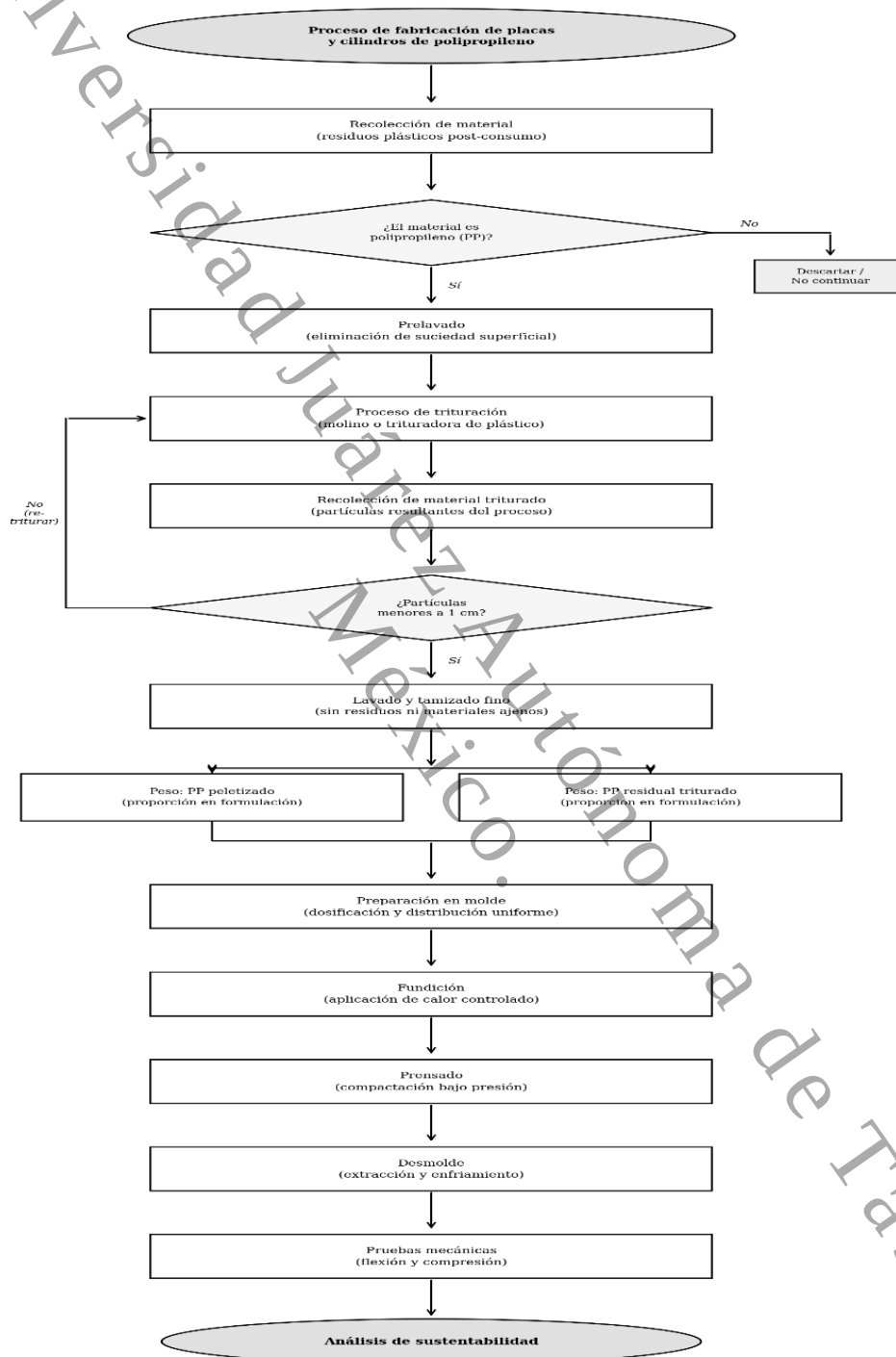
La selección del MDF melamina como material de referencia se fundamentó en su uso frecuente en la fabricación de mobiliario y productos de uso cotidiano. El diseño experimental se desarrolló con base en estudios previos realizados en la DACBiología-UJAT (Laines Canepa, 2023).

Las variables independientes fueron el tipo de material (PP, PPRT y MDF melamina) y la geometría de la muestra (placa o cilindro). Las variables dependientes correspondieron a la resistencia a la flexión (kg/cm^2) en placas y a la resistencia a la compresión (kg/cm^2) en cilindros, como parámetros de evaluación mecánica.

El análisis de los datos incluyó estadística descriptiva para determinar medias y variabilidad de las muestras, así como la evaluación del indicador de costo-desempeño y el análisis de sustentabilidad del proceso. Posteriormente, se verificó

la normalidad de los datos y se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) con prueba post hoc de Tukey para comparar las propiedades mecánicas entre materiales, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Los cálculos y análisis se realizaron mediante el lenguaje de programación Python. La distribución de los datos fue evaluada mediante análisis descriptivo y verificación gráfica de normalidad. Debido al carácter exploratorio del estudio y al tamaño de muestra limitado, los resultados fueron interpretados considerando tendencias comparativas entre materiales y variabilidad experimental inherente al proceso de fabricación.

Ilustración 1. Diagrama del proceso generalizado para la fabricación de placas de polipropileno.



Nota. Diagrama de las etapas del proceso generalizado de la fabricación de placas de polipropileno.

Elaboración de gráfico por Roberto Moreno.

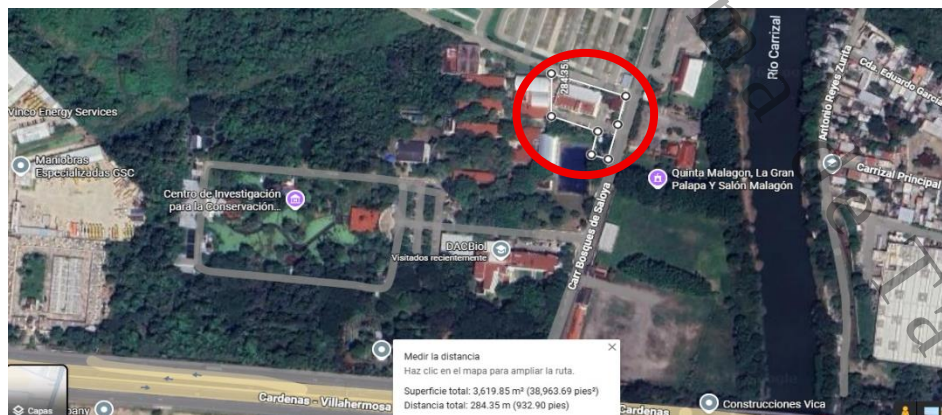
VII.2 Área de estudio.

VII.2.1 Área de estudio de la fabricación de las placas de polipropileno.

El diseño experimental se efectuó dentro de los laboratorios de investigación de residuos de la División Académica de Ciencias Biológicas, perteneciente a la UJAT, con ubicación definida como VHSA–Cárdenas km 0.51 s/n, desvío a Bosques de Saloya, C.P. 86150, VHSA, Tabasco, México.

La localización geográfica del sitio experimental corresponde a las coordenadas 17.989673° latitud norte y -92.973103° longitud oeste, dentro de la ciudad de Villahermosa, Tabasco. Este laboratorio fue seleccionado por contar con la infraestructura necesaria para el desarrollo de procesos térmicos, trituración, moldeo y evaluación de materiales a base de polipropileno reciclado, especializado en la gestión y valorización de residuos de polipropileno, condiciones que permitieron la obtención de las muestras experimentales.

Ilustración 2. Geolocalización de laboratorios y Centro de Acopio para el Tratamiento de Residuos en la DacBiol-UJAT.



Nota. Ubicación georreferenciada del CATRE de la DACBiol y área experimental, con una superficie aproximada de 3,619.85 m² y un perímetro de 284.35 m (Google Maps, s. f.).

VII.2.2 **Área de ap
placas y ci**

ra las muestras de entorno m
un laboratorio especializado
n ubicación 18.068917° latitud
estado de Tabasco, dentro de

stración 3. *Ubicación de lab*

Ilustración 3. Ubicación de laboratorio de Resistencia a Materiales para construcción.



para georreferenciar el lugar
la construcción especialista

VII.3 Elaboración de placas con polipropileno residual.

VII.3.1 Recolección del material.

Para la fabricación de las placas de polipropileno, se recolectó RSU dentro de las instalaciones del CATRE de la DACBiol-UJAT, realizando segregación de los residuos acopiados para separar los elaborados a base de polipropileno (principalmente tapas de refresco). Se realizó lavado preliminar con agua a temperatura ambiente, seguido de inmersión en solución de agua y detergente suave con fibras no abrasivas, enjuague abundante y secado en área ventilada, evitando exposición solar directa.

Ilustración 4. Recolección de materiales de polipropileno.



Nota. Recolección de materiales a base de polipropileno. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, capturada en el área de residuos dentro del Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, en la UJAT-DACBiol, 2025.

VII.3.2 Proceso de trituración de materiales a base de polipropileno.

VII.3.2.1 Especificaciones de equipo de trituración.

El proceso de trituración se efectuó utilizando un equipo industrial de 40 HP operando a 1,770 rpm, equipado con cuchillas de corte con filo tipo V/chevrón. El sistema contaba con una abertura de alimentación de 73.3 × 56.0 cm y una salida de descarga de 15 cm de diámetro, trabajando en ciclos aproximados de 15 minutos por carga. El objetivo del proceso consistió en reducir el tamaño del polipropileno residual para obtener partículas homogéneas adecuadas para el proceso de fabricación térmica posterior.

VII.3.2.2 Carga de material a trituradora.

Posteriormente al proceso de selección, lavado y secado, se cargaron aproximadamente 100 kg de polipropileno residual de manera gradual y uniforme hacia el área receptora del equipo de trituración. El material fue procesado hasta obtener partículas con tamaños aproximados entre 0.5 y 1 cm. Cuando se identificaban fragmentos con dimensiones mayores o distribución no homogénea, el material era sometido nuevamente al ciclo de trituración. Durante el proceso se descartaron partículas contaminadas, materiales ajenos al polipropileno y residuos con deformaciones excesivas, obteniéndose finalmente material apto para el proceso de fabricación térmica.

Ilustración 5. Trituradora industrial con Carga de material a base de polipropileno.



Nota. Proceso de trituración de polipropileno residual utilizada durante el desarrollo experimental. Imagen original capturada por Roberto del Carmen Moreno Guzmán en las instalaciones del CATRE-DACBioI, UJAT, 2025.

VII.3.2.3 Recolección de material en dispensadora.

Seguido de la trituración, se ejecutó la recolección del polipropileno residual en una bandeja, asegurando su correcto triturado y homogeneidad en el tamaño de las partículas, para pasarlo nuevamente al proceso de lavado y la determinación de la ausencia de partículas extrañas que pudieran cambiar el proceso.

Ilustración 6. *Recolección del polipropileno en dispensador.*



Nota. Recolección de material. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, capturada en la UJAT-DACBIOL, Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, 2025.

VII.3.3 Moldeo y formación de placa en horno.

VII.3.3.1 Proceso de postlavado y tamizado de polipropileno triturado.

Seguido de la recolección, se llevó a cabo nuevamente el lavado del material para descartar material ajeno al polipropileno adherido; de esto se tamizó de manera que no pasaran partículas menores a 0.5 cm de diámetro. El proceso de tamizado fue ingeniado con el colador que se utiliza en cemento y/o arena (malla o tamiz No. 35), entre dos personas moviéndolo de un lado a otro, recolectando el polvo (micropartículas) para darle una disposición en el mismo centro.

Ilustración 7. *Proceso de postlavado.*



Nota. Lavado, limpieza y secado de polipropileno residual triturado final. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, capturada en la UJAT-DACBIOL, Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, 2025.

VII.3.3.2 Preparación de materiales para el empotramiento en molde.

Para el inicio de esta etapa se integraron los materiales finales para el proceso de moldeo, identificando los tres materiales a diferenciar: polipropileno residual triturado (materiales extraídos del CATRE), polipropileno peletizado, en donde este último se obtuvo de manera comercial y se puede adquirir en cualquier centro de distribución de materiales para termoformado de plásticos, y finalmente placas de MDF melamina como blanco a comprar dentro del proceso que se efectuó en pruebas de presión y flexión.

VII.3.3.3 Control en el peso de materiales.

Se taró el recipiente utilizado como receptor del material para dispersarlo en una báscula de plataforma digital (Rhino BAPCA-200); adherido de esto, se obtuvieron pesos de materiales de 6.5 kg, 7 kg y 7.5 kg. Es decir, tres pesos diferentes de polipropileno residual triturado y tres de polipropileno peletizado para la formación de las placas, sin contar el MDF melamina, como consecuencia de que este solo se cortó en placas de 20 × 20 cm.

Ilustración 8. *Peso de Polipropileno.*



Nota. Peso de polipropileno peletizado y residual triturado. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, capturada en la UJAT-DACBiol, Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, 2025.

VII.3.3.4 Preparación del molde y polipropileno a proceso térmico.

En un molde de acero inoxidable diseñado con base en estudios previos de (Laines Canepa et al., 2023), este con medidas 1.80 m × 0.90 m y 0.20 m × 0.20 m, se crearon placas en donde el polipropileno se dispersó de manera uniforme en cantidades de 6.5 kg, 7 kg y 7.5 kg para el molde más grande y el aforo en el de 0.20 m × 0.20 m en diferentes tiempos y condiciones.

Previo al vaciado del PP, se agregó aceite vegetal comestible en la superficie del recipiente como un antiadherente y así evitar que se pegara el material al fundirse; después se procedió a dispersar el polipropileno dentro del molde con ayuda de una pala plana y con apoyo de medición para niveles de superficies se evaluó que fuera dispersado de manera uniforme.

Ilustración 9. Limpieza y lubricación de molde para placa de PP.



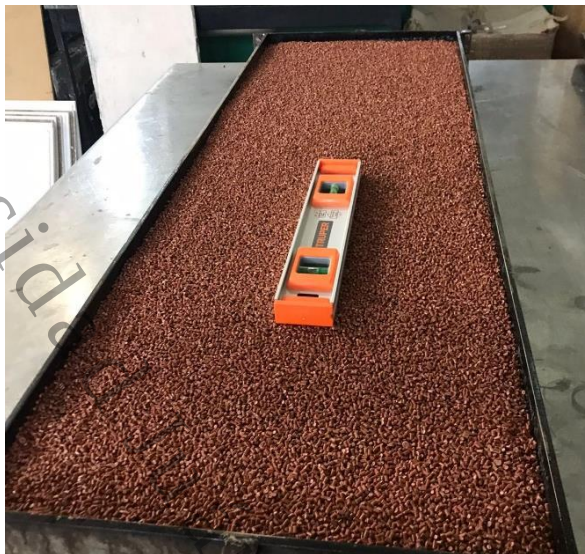
Nota. Limpieza exhaustiva del moldeador de las placas. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, capturada en la UJAT-DACBiol, División Académica de Ciencias Biológicas, Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, 2025.

Ilustración 10. *Dispersión de polipropileno en molde.*



Nota. Dispersado de PP en molde. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, capturada en la UJAT-DACBIol, Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, 2025.

Ilustración 11. Nivelado de polipropileno en molde.



Nota. Verificación de dispersado homogéneo en molde, capturada en la UJAT-DACBiol, Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, 2025.

Ilustración 12. Sellado con ajuste manual de PP a proceso térmico.



Nota. Se visualiza el ajuste de la cubierta superior que sella el molde para efectuar el proceso térmico. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, capturada en la UJAT-DACBiol, Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, 2025.

VII.3.3.5 Integración de polipropileno a área de proceso térmico.

Con base en un diseño que efectuó Laines Canepa et al. (2023), con un horno a base de resistencias térmicas de complexión rectangular con medidas de 2 m × 1.5 m × 1 m, se llevó a cabo la fundición, en donde se experimentó con temperaturas de 270 ± 30 °C para cada una de las muestras programadas y pesos diferentes, registrando la temperatura cada 30 minutos hasta la fundición completa. Se aplicó presión con prensa manual de hierro tipo tornillo hasta contacto de bordes macho-hembra del molde, seguido de enfriamiento a temperatura ambiente durante mínimo 3 horas.

VII.3.3.6 Aislamiento del PP en horno industrial.

Previamente, con la estabilidad térmica dentro del equipo fundidor, se estimó la temperatura inicial de 270 °C; posteriormente, con ayuda de una transportadora y equipo de seguridad para altas temperaturas, se movilizó el molde asegurado y ajustado hacia el equipo fundidor.

Ilustración 13. Transporte y aseguramiento de molde en horno industrial.



Nota. Aseguramiento de molde dentro del horno industrial con temperatura estable de 270 °C. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, capturada en la UJAT-DACBIol, Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, 2025.

VII.3.3.7 Monitoreo de fundición del polipropileno.

Durante el proceso térmico aplicado, se realizaron mediciones de temperatura con una pistola térmica, direccionándola hacia el molde en la parte superior e inferior de cada uno de sus lados, esto cada 30 minutos hasta terminar el fundido, en el cual, mediante un orificio, se verificó con un punzón, picando hasta el fondo, mientras el horno industrial indicaba la temperatura alcanzada generalmente en todo el interior del horno.

La toma se llevó a cabo para evaluar el comportamiento, características y calidad del fundido, esto para cada una de las muestras: polipropileno y polipropileno residual triturado que se generó dentro de la DACBiol.

Ilustración 14. Monitoreo de fundición de polipropileno residual triturado y peletizado.



Nota. Monitoreo de temperatura cada 30 minutos. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, capturada en la UJAT-DACBiol, Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, 2025.

VII.3.3.8 Prensado de placas.

Se sacaron muestras después de 1.5 h para peso de 6.5 kg, 2 h para el peso de 7 kg y 2.5 h para el peso de 7.5 kg; se retiró el molde del horno sin abrirlo o manipularlo internamente para pasarlo a la prensa, la cual es una prensa hidráulica con capacidad para 8 toneladas, previamente fabricada y diseñada por Laines Canepa et al. (2023), en la cual se aplicó presión hasta que los bordes de la tapa y base del molde pegaran sin forzar el choque entre ambos.

Ilustración 15. Prensado de molde en caliente.



Nota. Prensado del molde con el polipropileno en reciente estado de fundición. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, capturada en la UJAT-DACBIOL, Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, 2025.

VII.3.3.9 Desmolde de placas de PP.

Se dejó enfriar en prensa bajo presión un aproximado de 3 horas para el desmolde, sin forzar con algún método de enfriamiento; consecutivamente se quitaron los seguros del molde y, con ayuda de una espátula, se fue desprendiendo para separar totalmente la placa del molde. Este proceso se aplicó para cada una de las muestras que se realizaron, siempre registrando los resultados como peso inicial, peso final, tiempo de fusión, registro de temperaturas, detalles físicos y de calidad de la placa.

Ilustración 16. Placa de polipropileno a base de pellets.



Nota. Obtención de placa con polipropileno peletizado de origen comercial. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, capturada en la UJAT-DACBIOL, Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, 2025.

VII.4 Preparación de muestras para pruebas mecánicas.

VII.4.1 Placas para pruebas de flexión.

De las placas obtenidas de los diferentes pesos y materiales, se seleccionaron las más aptas con base en una inspección visual, en donde se descartaron las que presentaban defectos visibles como grietas, malformaciones y burbujas de aire, dejando las mejor formadas y más completas.

Se realizó el corte de placas: cuatro placas de 20 cm × 20 cm; es decir, cuatro placas de polipropileno residual triturado, cuatro placas de polipropileno peletizado y cuatro placas de MDF melamina como blanco a comparar, como consecuencia de que este se encuentra a gran escala en diversas estructuras.

VII.4.2 Preparación de cilindros para pruebas de compresión.

Con base al procedimiento de la fabricación de placas se moldearon los dos tipos de polipropileno (cada uno en su debido proceso) presentes en un molde base con las siguientes medidas, 0.05m respecto al diámetro y 0.1m respecto a la altura en el cual se llenó hasta el borde del molde para obtener cilindros, derivando hacia las pruebas mecánicas.

Ilustración 17. Molde de cilindros de PP.

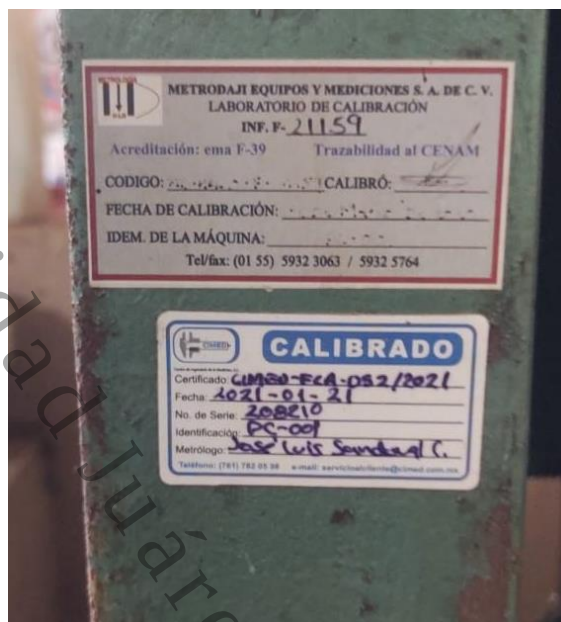


Nota. Cilindro de polipropileno en proceso de enfriamiento para desmolde. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, capturada en la UJAT-DACBIOL, Centro de Acopio y Tratamiento de Residuos, 2025.

VII.4.3 Ejecución de pruebas mecánicas en placas.

En el laboratorio de pruebas de resistencia de materiales, se sometieron a pruebas de flexión y compresión cada una de las muestras. Se inició con las placas de los tres tipos de materiales: PPRT, PP y MDF melamina, ejerciendo las pruebas correspondientes; también se integraron los cilindros de PP y PPRT, registrando los resultados mostrados en la ventana del equipo, con ayuda de un instrumento especializado en pruebas de resistencia con denominación ALCON®. Con la debida calibración y aseguramiento de parámetros métricos confiables.

Ilustración 18. Datos y registro de calibración de equipo de pruebas.



Nota. Placa de certificación métrica de equipo. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, tomada en laboratorio de resistencia de materiales para construcción, Villahermosa, Tabasco, 2025.

Tomando las placas de 20 cm × 20 cm, estas de cada una de las muestras: polipropileno residual triturado, polipropileno peletizado y MDF melamina, se sujetaron al instrumento de prueba de manera que se ejerciera una fuerza de presión directa sobre cada una de ellas de forma gradual mediante un pistón. Se aseguró que la presión se aplicara de manera homogénea y que la placa estuviera correctamente posicionada dentro del equipo, centrada respecto a sus bordes.

Ilustración 19. Proceso de flexión en placas.

(a)



(b)



(c)



(d)



Nota. (a) Placas de polipropileno y MDF a incorporar al proceso. (b) Vista lateral de placas de PP. (c) Revisión de fuerza aplicada al quiebre inmediato de la placa de PP. (d) Muestras de PP residual triturado al quiebre completo. Fotografías originales tomadas en el laboratorio de resistencia de materiales, Villahermosa, Tabasco, 2025.

VII.4.4 Procedimiento para la determinación de la máxima flexión con base en su resistencia.

Con base en la metodología propuesta por Laines Canepa et al. (2023), se adoptó el procedimiento para determinar la capacidad máxima de flexión de las placas de polipropileno reciclado. Este parámetro mecánico se calculó mediante la ecuación siguiente:

Ecuación 1. Resistencia a la flexión.

$$R_f = \frac{3FL}{2wh^2}$$

donde:

- F = Peso máximo aplicado.
- L = Distancia en bases de apoyo.
- w = Anchura del objeto o placa.
- h = Grosor del objeto o placa.

La resistencia a la flexión se expresó en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²).

Para la obtención del valor representativo, se llevó a cabo el ensayo de flexión sobre cada una de las tablas fabricadas, registrando la carga máxima soportada antes de presentar deformación o falla estructural. Posteriormente, los datos obtenidos fueron sustituidos en la ecuación correspondiente para calcular la resistencia mecánica a la flexión de cada muestra.

VII.4.5 Aplicación de prueba mecánica de compresión para cilindros de PP peletizado y PP residual triturado.

Se seleccionaron cuatro muestras cilíndricas ($h = 10$ cm, $d = 5$ cm) por material (PP y PPRT) para las pruebas de compresión. Se utilizó el mismo equipo descrito en la sección VII.4.3. de este documento, para la prueba de resistencia a la compresión marca ALCON; además, se utilizó material de protección: lentes, guantes y el monitoreo con apoyo de otra persona del registro de datos para no errar, como consecuencia de que al ser un proceso industrial donde se aplica fuerza requiere de cuidado y atención a la actividad.

La carga fue aplicada de manera axial mediante una prensa hidráulica hasta alcanzar la deformación máxima o falla estructural de la probeta cilíndrica. El valor máximo registrado se empleó para determinar la resistencia a la compresión, utilizando el área transversal calculada a partir del diámetro inicial de la muestra. La altura de 10 cm permitió mantener una relación geométrica adecuada para minimizar fenómenos de pandeo y asegurar la uniformidad del esfuerzo compresivo durante el ensayo.

Ilustración 20. proceso de compresión en cilindros de pp.

(a)



(b)



(c)



(d)



Nota. (a) Cilindros de PP peletizado y PPRT incorporados al proceso. (b) Toma en proceso de aplicación de compresión a cilindro. (c) Vista lateral del equipo en compresión. (d) Muestras de cilindro a la ruptura inmediata. Fotografías originales tomadas en el laboratorio de resistencia de materiales, Villahermosa, Tabasco, 2025.

VII.5 Procedimiento para el cálculo de la resistencia a la compresión.

La capacidad máxima de compresión de los cilindros de polipropileno reciclado se determinó mediante la relación entre la carga máxima aplicada por la prensa hidráulica y el área transversal de la muestra. Cada dato obtenido durante este procedimiento con los cilindros de polipropileno fue sustituido al final de la fórmula planteada para el posterior análisis de resultados.

La ecuación empleada fue la mostrada a continuación:

Ecuación 2. Capacidad máxima a la compresión.

$$\Sigma_c = \frac{F}{A}$$

donde:

- Σ_c = Capacidad máxima a la compresión
- F = Carga máxima aplicada
- A = Área transversal del cilindro

para los cilindros, el área se calculó mediante:

Ecuación 3. Cálculo de área de cilindro.

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

donde:

d = diámetro del cilindro (cm)

sustituyendo el diámetro de 5 cm:

Ecuación 4. Sustitución de datos en ecuación de área de cilindro.

$$a = \frac{\pi(5)^2}{4}$$
$$a = 19.63 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto, la expresión final para calcular la capacidad máxima a la compresión de la muestra fue:

Ecuación 5. *sustitución final de área de cilindro para cálculo de compresión.*

$$\sigma_c = \frac{F}{19.63}$$

VII.6 **Análisis de sustentabilidad.**

El análisis de sustentabilidad se llevó a cabo mediante la integración de indicadores mecánicos, energéticos, económicos y ambientales, con la finalidad de comparar el desempeño del polipropileno peletizado, el polipropileno residual triturado y el MDF melamina bajo un mismo marco de evaluación.

Para poder identificar la alternativa más sostenible ambientalmente, económica y técnica, alineándose con los principios de la economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2013) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, particularmente el ODS 12 referente a producción y consumo responsables (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015).

VII.7 **Indicaciones para validar cálculos del gasto de corriente eléctrica.**

El cálculo del consumo energético se llevó a cabo considerando los tres equipos principales que operan a 220 V de corriente alterna: el horno industrial de resistencias térmicas, la trituradora industrial de 40 HP y la prensa hidráulica de 8 toneladas. La energía eléctrica consumida se estimó por equipo y por muestra, considerando la potencia nominal eléctrica y el tiempo efectivo de uso en la trituradora, horno y prensa hidráulica (Cengel & Boles, 2014). Posteriormente, se obtuvo el consumo total del proceso de manufactura por placa:

Ecuación 6. Cálculo de consumo eléctrico.

$$E = P \times T$$

donde:

E = energía eléctrica consumida (kwh)

P = potencia del equipo (kw)

T = tiempo de operación (h)

La potencia del horno industrial se estimó a partir de la relación $P = V \times I$, donde el voltaje de operación fue de 220 V y la corriente nominal de 22.7 A, resultando en una potencia de 4.99 kW $\approx$ 5.0 kW (Fraile Mora, 2008). La trituradora industrial de 40 HP se convirtió a unidades del Sistema Internacional mediante el factor 1 HP = 0.7457 kW, obteniendo una potencia de 29.83 kW; sin embargo, el tiempo de operación de trituración fue de 15 minutos (0.25 h) por ciclo de carga (Laines Canepa et al., 2023). La prensa hidráulica operó con una potencia estimada de 2.2 kW durante un tiempo de prensado activo de 5 minutos (0.083 h) por muestra.

El consumo energético total por muestra se calculó como la suma de las energías parciales de cada equipo:

Ecuación 7. Cálculo de consumo eléctrico total.

$$E_{\text{total}} = E_{\text{horno}} + E_{\text{trituradora}} + E_{\text{prensa}}.$$

Los tiempos de proceso en el horno variaron según el peso del material: 1.5 h para muestras de 6.5 kg, 2.0 h para muestras de 7.0 kg y 2.5 h para muestras de 7.5 kg, tal como se registró durante el procedimiento en el horno industrial. Esta variación responde a la mayor masa térmica requerida para alcanzar la fusión completa del polipropileno conforme incrementa el peso del material (Harper, 2006).

VII.8 Indicaciones para validar cálculos de la huella de carbono.

Las afectaciones por carbono se estimaron para la etapa de trituración, a partir del gasto total de energía eléctrica y un factor de emisión correspondiente. Se incorporó una comparación de ciclo de vida de polipropileno residual triturado frente al polímero virgen.

Mediante el análisis de ciclo de vida simplificado (ACV-S), durante la fabricación (cradle to gate), conforme a la norma ISO 14064-1:2018 y de acuerdo con las instituciones de gobierno con base en especialistas sobre el cambio climático (IPCC, 2006), se logró convertir la energía consumida en contaminación de gases de efecto invernadero (GEI), manifestadas como dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 8. Cálculo de huella de carbono.

$$\text{GEI (kg CO}_2\text{eq)} = \text{E total} \times \text{FE}$$

Donde:

GEI = Contaminantes en kg de CO₂ equivalente

E total = Energía eléctrica total consumida (kWh)

FE = Factor de contaminación en electricidad a nivel nacional (kgCO₂eq/kWh).

El factor de emisión empleado fue de 0.454 kg CO₂eq/kWh, correspondiente al factor de emisión de la red eléctrica en nuestro país (México), con base en la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y reportado en el Inventario Nacional de Emisiones (SEMARNAT, 2021; IPCC, 2006). Este valor integra la mezcla de fuentes

de generación eléctrica del Sistema Eléctrico Nacional, incluyendo termoeléctricas, hidroeléctricas y fuentes renovables.

Ilustración 21. Mediciones de consumo energético.



Nota. Multímetro para mediciones eléctricas y de consumo. Fotografía original de Roberto del Carmen Moreno Guzmán, tomada en laboratorio de la DACBiol, Villahermosa, Tabasco, 2025.

VII.9 Análisis estadístico.

Los datos obtenidos a partir de las pruebas de resistencia a la flexión y compresión se analizaron mediante estadística descriptiva, incluyendo el cálculo del promedio y la desviación estándar (DE) para cada uno de los materiales evaluados (PP, PPRT y MDF melamina).

Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) unidireccional con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ para determinar diferencias estadísticamente significativas entre los materiales.

Cuando se identificaron diferencias significativas, se llevó a cabo una prueba post hoc de Tukey para identificar los grupos que presentaron dichas diferencias.

Todos los análisis estadísticos se realizaron mediante el lenguaje de programación Python (versión 3.12), utilizando las bibliotecas científicas NumPy, SciPy y Statsmodels.

Para evaluar la distribución de los datos obtenidos en las pruebas mecánicas, se verificó la normalidad mediante análisis descriptivo y evaluación gráfica de dispersión. Posteriormente, se aplicó una prueba t de Student para comparar específicamente las medias entre PPRT y MDF melamina, de manera complementaria al ANOVA con Tukey, considerando un nivel de significancia estadística de $\alpha = 0.05$. Este procedimiento permitió identificar diferencias relevantes en el comportamiento mecánico de las muestras analizadas.

VIII. RESULTADOS.

VIII.1 Resultados generales en flexión de placas.

Se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a la flexión de placas fabricadas con polipropileno peletizado (PP), polipropileno residual triturado (PPRT) y su comparación con MDF melamina como material de referencia.

Las diferencias observadas entre materiales fueron analizadas considerando las condiciones controladas del proceso experimental y la naturaleza exploratoria del estudio. Debido a la escala piloto de fabricación y al comportamiento inherente de los polímeros reciclados, se contempló un margen de variabilidad asociado a la homogeneidad del material y al proceso térmico aplicado.

Los resultados obtenidos sugieren que el polipropileno residual triturado presenta un comportamiento mecánico competitivo frente al MDF melamina, bajo las condiciones evaluadas. Cabe señalar que el estudio no incluyó pruebas específicas de humedad ni exposición térmica prolongada; estas ventajas potenciales se discuten con base en la literatura en la sección de Discusión.

A partir de la sustitución de valores en la ecuación correspondiente, se calcularon los valores de resistencia a la flexión mostrados en la Tabla 1. Al realizar la sustitución de valores para la obtención de la resistencia a flexión, se visualizó la siguiente información:

Tabla 1. Informe de carga bruta y flexión máxima de placas PP y PPRT.

Muestra	Peso aplicado a PP (kg)	Peso aplicado a PPRT (kg)	Flexión PP (kg/cm ²)	Flexión PPRT (kg/cm ²)
Placa 1	1030	980	96.562	91.875
Placa 2	1000	974	93.750	91.312
Placa 3	1098	1021	102.938	95.719
Placa 4	1140	1002	106.875	93.938

Nota. El PP peletizado presentó una resistencia promedio a la flexión de 100.03 kg/cm², mientras que el PPRT alcanzó 93.21 kg/cm². Aunque el PP mantiene un valor ligeramente superior, el PPRT conserva una respuesta mecánica altamente competitiva, lo que confirma su potencial de reutilización en placas (Moreno Guzmán, 2025).

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los datos de resistencia a la flexión evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los materiales evaluados ($p < 0.05$), indicando que el tipo de material influye directamente en el comportamiento mecánico.

La prueba post hoc de Tukey evidenció que el PP y el PPRT no presentan diferencias significativas entre sí ($p > 0.05$), mientras que ambos difieren significativamente del MDF melamina ($p < 0.001$).

VIII.2 Resultados generales de resistencia a la compresión en cilindros.

Los resultados de resistencia a la compresión indican que el polipropileno peletizado (PP) presentó los valores más altos en todas las muestras evaluadas, con un promedio de 184.90 kg/cm², mientras que el polipropileno residual triturado (PPRT) alcanzó un promedio de 110.16 kg/cm².

El valor máximo registrado fue de 222.10 kg/cm² para el PP, mientras que el PPRT alcanzó un máximo de 131.94 kg/cm². Aunque el PPRT presenta menor resistencia, sus valores indican un comportamiento mecánico adecuado para aplicaciones semiestructurales.

Tabla 2. Datos de carga bruta y compresión de PP y PPRT.

Muestra	Peso aplicado a PP (kg)	Peso aplicado a PPRT (kg)	Compresión PP (kg/cm ²)	Compresión PPRT (kg/cm ²)
Cilindro 1	3600	1750	183.393	89.149
Cilindro 2	4360	1980	222.109	100.866
Cilindro 3	3708	2590	188.895	131.941
Cilindro 4	2850	2330	145.186	118.696

Nota. En compresión, el PP obtuvo un promedio de 184.90 kg/cm² frente a 110.16 kg/cm² del PPRT. Se observa mayor dispersión en el material residual, pero con valores suficientes para aplicaciones semiestructurales. Datos de autoría propia: Moreno Guzmán (2025).

VIII.3 Flexión MDF melamina vs PPRT.

Los datos experimentales presentados en la Tabla 3 evidencian una diferencia mecánica altamente significativa a favor del PPRT, material que superó al MDF melamina en la totalidad de las muestras ensayadas.

El valor máximo de flexión del PPRT fue de 95.72 kg/cm², correspondiente a la placa 3, mientras que el mayor valor registrado para el MDF melamina fue de 27.38 kg/cm², también en la placa 1.

A nivel de carga aplicada, el PPRT soportó entre 974 y 1021 kg, mientras que el MDF melamina únicamente resistió entre 227 y 292 kg, lo que refleja una capacidad de carga entre 3 y 4 veces superior del material reciclado.

Este comportamiento confirma que el PPRT presenta una mayor capacidad de deformación antes de la ruptura, asociada a la naturaleza termoplástica del polipropileno, la cual favorece una mejor redistribución de esfuerzos. En contraste, el MDF melamina mostró una respuesta más frágil y menos tolerante a esfuerzos de flexión, comportamiento característico de materiales lignocelulósicos compactados con resinas melamínicas, cuya falla suele ocurrir por microfracturas internas y desprendimiento superficial (Lipski, 2024).

Estos resultados confirman que el PPRT presenta un desempeño mecánico significativamente superior al MDF melamina, validando su potencial como material alternativo en aplicaciones estructurales ligeras.

Tabla 3. Comparación de placas polipropileno triturado residual y MDF melamina.

Muestra	peso aplicado a PPRT (kg)	Peso aplicado a MDF melamina. (kg)	Flexión PPRT (kg/cm ²)	Flexión MDF melamina. (kg/cm ²)
Placa1	980	292	91.875	27.375
Placa2	974	245	91.312	22.969
Placa3	1021	274	95.719	25.688
Placa4	1002	227	93.938	21.281

Nota. La resistencia promedio a flexión del PPRT fue de 93.21 kg/cm², mientras que el MDF alcanzó 24.33 kg/cm². Esto representa una mejora aproximada del 283.1 % a favor del PPRT, posicionándolo como la alternativa más viable. Datos de autoría propia: Moreno Guzmán (2025).

VIII.4 Análisis de sustentabilidad.

VIII.4.1 Consumo energético.

Tabla 4. Consumo de energía eléctrica por equipo y muestra durante la fabricación de placas de PP.

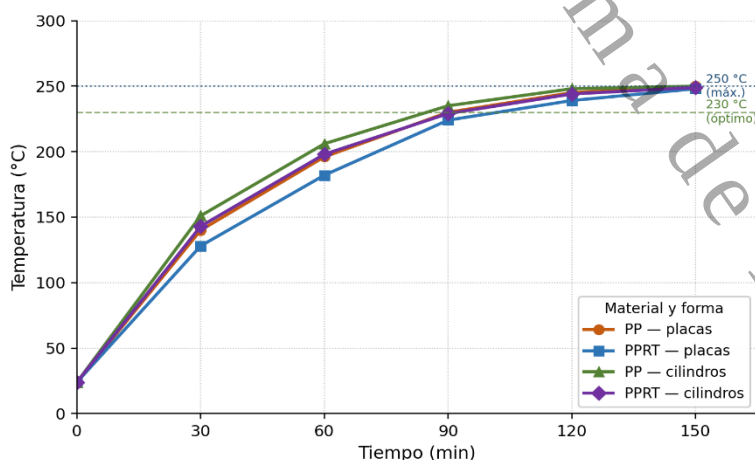
Muestra	Material	Peso (Kg)	Tiempo horno (H)	E horno (Kwh)	E trituradora (Kwh)	E prensa (Kwh)	E total (Kwh)
PP-6.5	PP peletizado	6.5	1.5	7.491	7.457	0.183	15.131
PP-7.0	PP peletizado	7	2	9.988	7.457	0.183	17.628
PP-7.5	PP peletizado	7.5	2.5	12.485	7.457	0.183	20.125
PRT-6.5	PP residual triturado	6.5	1.5	7.491	7.457	0.183	15.131
PRT-7.0	PP residual triturado	7	2	9.988	7.457	0.183	17.628
PRT-7.5	PP residual triturado	7.5	2.5	12.485	7.457	0.183	20.125

Nota. E = energía eléctrica. Potencia del horno = 5.0 kW a 220 V; trituradora = 29.83 kW (40 HP), tiempo de operación = 0.25 h; prensa hidráulica = 2.2 kW, tiempo = 0.083 h. Elaboración propia con base en Cengel y Boles (2014) y datos de campo (2025).

El equipo con mayor contribución al consumo total fue el horno, con valores entre 7.491 y 12.485 kWh, representando aproximadamente entre 49.5 % y 62.0 % del consumo total del proceso, dependiendo del tiempo de fundición. Por su parte, la trituradora industrial mantuvo un consumo constante de 7.457 kWh, como consecuencia de que el tiempo de operación fue fijo (0.25 h) para todas las muestras, independientemente del peso procesado.

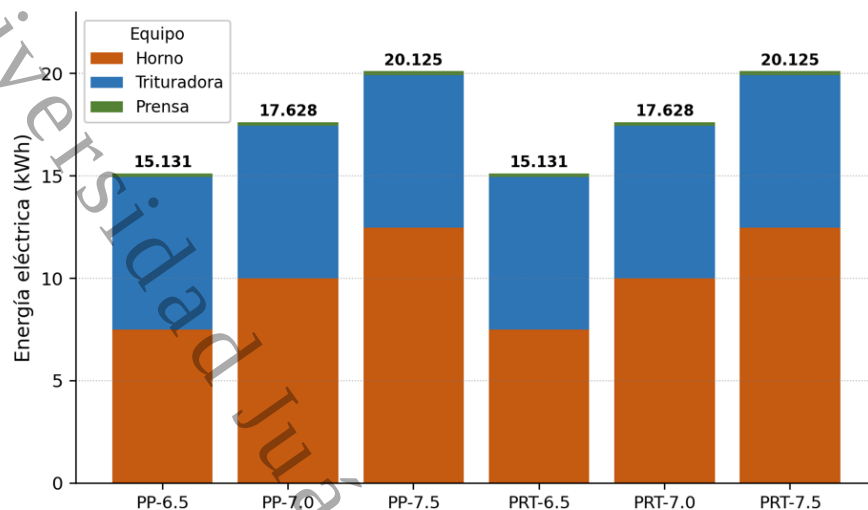
El consumo energético registrado durante la fabricación de las placas se encuentra directamente relacionado con los parámetros térmicos aplicados durante el proceso de conformado. A medida que aumentó el tiempo de permanencia del material en el horno, también se incrementó el consumo de energía eléctrica, debido a la necesidad de mantener temperaturas adecuadas para la fusión y compactación del polipropileno. Para complementar este análisis, en las figuras siguientes se presentan los perfiles de temperatura registrados durante la fabricación de las placas de polipropileno peletizado y polipropileno residual triturado, los cuales permiten evaluar el comportamiento térmico del material y su influencia en el consumo energético del proceso.

Ilustración 22. Comportamiento térmico durante el proceso de fabricación de placas y cilindros de PP y PPRT.



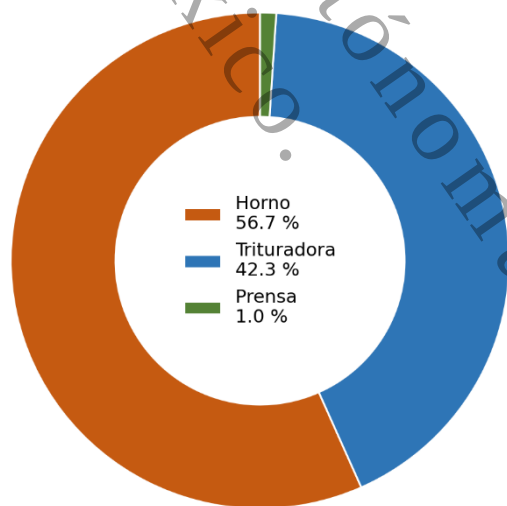
Nota. Curvas de temperatura (°C) vs. tiempo (min) para las cuatro condiciones de proceso. La línea discontinua verde indica el punto óptimo de calidad del fundido (230 °C). Elaboración de Roberto Moreno.

Ilustración 23. Consumo de energía eléctrica por equipo y muestra durante la fabricación de placas.



Nota. Barras apiladas por muestra; el valor sobre cada barra corresponde a la energía total (kWh).
Elaboración propia con base en la Tabla 4.

Ilustración 24. Participación porcentual promedio de cada equipo en el consumo energético total del proceso.



Nota. Promedio del consumo energético de las seis muestras (PP y PPRT, 6.5, 7 y 7.5 kg).
Elaboración propia con base en la Tabla 4.

VIII.4.2 Huella de carbono.

Tabla 5. Huella de carbono por muestra durante el proceso de fabricación de placas de polipropileno.

Muestra	Material	Peso (kg)	Tiempo horno (h)	E total (kwh)	Huella de carbono (kg CO ₂ eq)
PP-6.5	PP peletizado	6.5	1.5	15.131	6.869
PP-7.0	PP peletizado	7.0	2.0	17.628	8.003
PP-7.5	PP peletizado	7.5	2.5	20.125	9.137
PRT-6.5	PP residual triturado	6.5	1.5	15.131	6.869
PRT-7.0	PP residual triturado	7.0	2.0	17.628	8.003
PRT-7.5	PP residual triturado	7.5	2.5	20.125	9.137

Nota. La huella de carbono se calculó a partir de un factor de emisión de 0.454 kg CO₂eq/kWh, conforme a metodologías de inventarios de GEI de SEMARNAT e IPCC. FE = factor de emisión; GEI = gases de efecto invernadero; CO₂eq = dióxido de carbono equivalente. Roberto Moreno (2025)

Los resultados presentados en la Tabla 5 muestran que la huella de carbono aumenta progresivamente en función del consumo energético total y del tiempo de permanencia en el horno, manteniendo una relación directa entre ambas variables.

La menor emisión se registró en las muestras de 6.5 kg, con un valor de 6.869 kg CO₂eq por placa, mientras que la máxima emisión correspondió a las placas de 7.5

kg, alcanzando 9.137 kg CO₂eq, lo que representa un incremento aproximado del 33.0 % respecto a la condición inicial.

Este comportamiento confirma que la etapa térmica constituye el principal punto crítico ambiental del proceso, ya que el incremento del tiempo de fundición repercute directamente en el aumento de emisiones indirectas asociadas al consumo de electricidad.

Las muestras de PP peletizado y PP residual triturado (PPRT) presentaron valores idénticos de huella de carbono dentro de la etapa de manufactura, como consecuencia de que ambas siguieron el mismo tiempo de horno, igual consumo energético total, mismos equipos y la misma secuencia operativa.

Sin embargo, desde una perspectiva de análisis de ciclo de vida (ACV), el PPRT presenta una ventaja ambiental significativamente superior, ya que evita la producción de resina virgen.

La fabricación de polipropileno virgen genera aproximadamente entre 1.9 y 2.1 kg CO₂eq por kilogramo de resina producida, considerando extracción de materias primas, refinación y polimerización (PlasticsEurope, 2020).

Por lo tanto, aunque ambas rutas muestran la misma huella en la etapa de transformación térmica, el PPRT reduce sustancialmente la huella global del sistema, al eliminar las emisiones asociadas a la síntesis de nuevo polímero.

VIII.4.3 Costos y materiales.

Los costos de referencia se obtuvieron de las siguientes fuentes: para el PP peletizado virgen, PelletsMx (2025) reporta un precio estimado de \$25 MXN/kg,

valor consistente con los reportes de PelletsMx (2025). Para el PPRT, PelletsMex (2026) señala precios entre \$12.50 y \$18.25 MXN/kg, tomándose un valor promedio de \$15.00 MXN/kg. Para el MDF melamina, con base en la densidad típica del material (600–800 kg/m³) y precios disponibles en distribuidores nacionales como Sodimac México (2024), se estima un costo aproximado de \$20 MXN/kg.

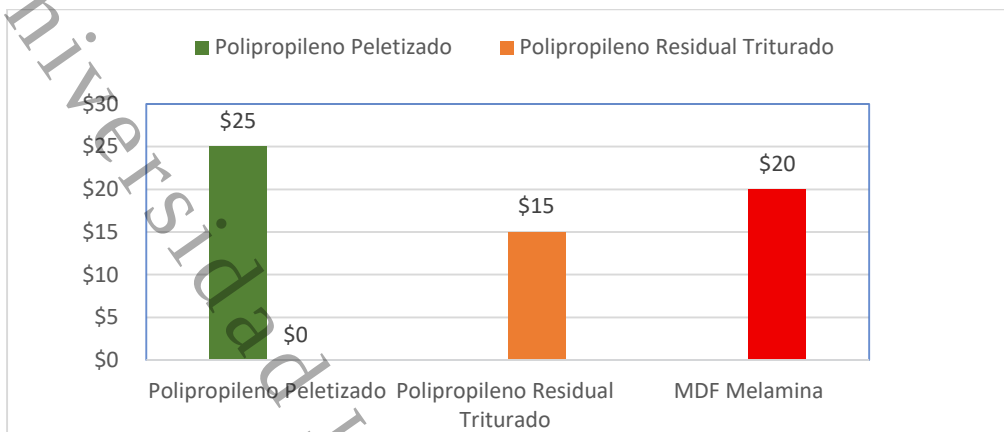
Estos resultados evidencian la ventaja económica del PPRT frente a materiales convencionales, al presentar un menor costo por kilogramo sin comprometer significativamente su desempeño mecánico.

Tabla 6. *Análisis de costos por material (Mercado mexicano, 2024–2025)*

Material	precio ref. (Mxn/kg)	Fuente	Tipo de mercado	Variabilidad
PP peletizado (virgen)	\$25.00	pellets (2025)	Resina virgen industrial	\$22–\$30/kg
PP residual triturado	\$15.00	pellets (2025)	Material reciclado posconsumo	\$12.50– \$18.25/kg
MDF melamina	~\$20.00	Sodimac México (2024); mercado libre (2024)	Tablero industrial	\$15–\$25/kg

Nota. Precios de referencia estimados para compras en volumen medio en el mercado mexicano. Los valores pueden variar según proveedor, región y condiciones de mercado. MXN = pesos mexicanos. Datos obtenidos de fuentes secundarias especializadas.

Ilustración 25. Comparación de costo por kilogramo de material (México, 2024–2025).



Nota. Precios estimados de referencia por kilogramo para cada material en el mercado mexicano durante el período 2024–2025. Fuentes: Mercado Libre (2024). Elaboración propia (Moreno Guzmán, 2025).

VIII.4.4 Relación costo-desempeño mecánico

Para evaluar la eficiencia económica de cada material, se construyó un indicador de costo-desempeño (CD), definido como el cociente entre la resistencia media a la flexión (kg/cm^2) y el costo por kilogramo (MXN/kg). Un valor CD más alto indica mayor resistencia mecánica por peso monetario invertido.

Tabla 7. Indicador CD (costo-desempeño).

Material	Resistencia flexión media (kg/cm ²)	Costo (Mxn/kg)	Indicador cd (kg/cm ² por Mxn/kg)
PP peletizado	100.031	\$25.00	4.001
PP residual triturado	93.211	\$15.00	6.214
MDF melamina	24.328	\$20.00	1.216

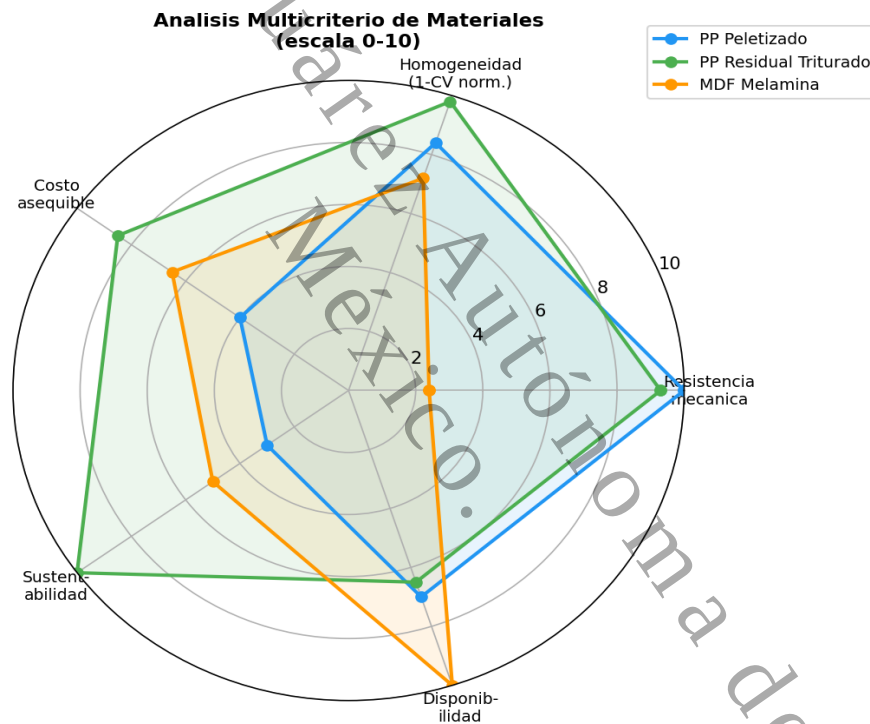
Nota. CD = cociente entre resistencia media a la flexión y costo por kilogramo. Un CD mayor indica mejor relación costo-desempeño. Datos de autoría propia: Moreno Guzmán (2025); precios de referencia de QuimiNet (2024) y Sodimac México (2024).

El análisis revela que el PPRT presenta el mejor indicador de costo-desempeño (CD = 6.214), superando ampliamente al PP peletizado (CD = 4.001) y al MDF melamina (CD = 1.216). Esto significa que, por cada peso mexicano invertido en material, el PPRT ofrece una eficiencia costo-desempeño (CD) un 55.3 % mayor que el PP peletizado, aun cuando su resistencia mecánica absoluta es ligeramente inferior y 5.1 veces mayor que el MDF. Este resultado posiciona al PPRT como la alternativa más eficiente desde la perspectiva económica, especialmente considerando que su costo es 40 % menor al del PP peletizado virgen.

VIII.4.5 Análisis multicriterio de materiales

A fin de integrar los hallazgos mecánicos, económicos y ambientales en una evaluación global, se desarrolló un análisis multicriterio (AMC) basado en cinco dimensiones: (a) resistencia mecánica, (b) homogeneidad del material (inverso del CV normalizado), (c) costo asequible (inverso del precio por kg normalizado), (d) sustentabilidad ambiental (inverso de la huella de carbono normalizado) y (e) disponibilidad comercial en México. Cada dimensión se normalizó en una escala de 0 a 10. La ilustración 23 presenta el diagrama de radar resultante.

Ilustración 26. Análisis multicriterio de materiales (escala 0–10 por dimensión).



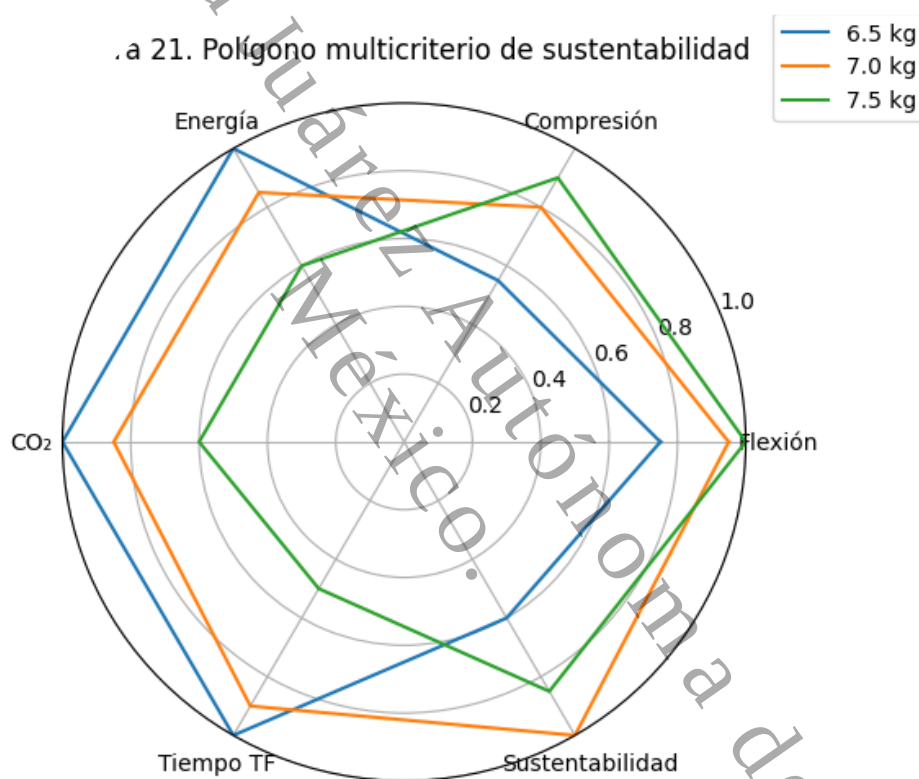
Nota. Diagrama de radar que integra cinco dimensiones de evaluación: resistencia mecánica, homogeneidad, costo asequible, sustentabilidad ambiental y disponibilidad comercial. Cada eje está normalizado en escala 0–10. Datos de autoría propia y fuentes secundarias: Moreno Guzmán (2025); QuimiNet (2024); Plataforma ZEO (2020); ATICA (2025).

El análisis multicriterio revela que ningún material domina absolutamente en todas las dimensiones. El PP peletizado lidera en resistencia mecánica, pero obtiene las puntuaciones más bajas en costo y sustentabilidad. El MDF melamina presenta alta

disponibilidad, pero baja resistencia mecánica. El PPRT destaca como el material más equilibrado: obtiene la puntuación más alta en sustentabilidad (10/10) y costo asequible (8.5/10), mientras mantiene una resistencia mecánica muy próxima al PP peletizado (9.3/10) y la mayor homogeneidad de todos los materiales (9.8/10).

En conjunto, el análisis multicriterio confirma que el PPRT representa la alternativa más equilibrada entre desempeño mecánico, costo y sustentabilidad ambiental, consolidándose como el material más viable dentro del presente estudio.

Ilustración 27. Polígono multicriterio de sustentabilidad.



Nota. La figura representa la evaluación multicriterio de las condiciones de 6.5, 7.0 y 7.5 kg, considerando seis criterios: máxima flexión, máxima compresión, consumo energético, huella de carbono, tiempo de termoformado y sustentabilidad global. Elaboración propia con base en datos experimentales de resistencia mecánica, consumo energético, huella de carbono y termoformado (Moreno Guzmán, 2025).

La condición de 7.0 kg presenta el polígono más equilibrado y uniforme, lo que indica un comportamiento sobresaliente en la mayoría de los criterios evaluados. Esta condición alcanzó valores altos en flexión y compresión, manteniendo simultáneamente un consumo energético moderado y una huella de carbono intermedia, sin comprometer la calidad física de la placa ni incrementar excesivamente el tiempo de proceso.

Desde la perspectiva del termoformado, el criterio de tiempo TF resultó determinante en la toma de decisión multicriterio. Aunque la condición de 6.5 kg presentó la mejor puntuación en tiempo por requerir únicamente 1.5 horas de horno, su desempeño global se vio afectado por la aparición de burbujas, huecos internos y falta de llenado del molde, defectos que reducen la continuidad estructural del material y comprometen su aplicación en elementos semiestructurales.

La condición de 7.0 kg representa el mejor balance entre desempeño mecánico, eficiencia térmica y sustentabilidad, ya que logró una fundición homogénea a los 120 minutos a $\sim 270^{\circ}\text{C}$, con placas funcionales, ligeras rugosidades superficiales aceptables y ausencia de defectos críticos como huecos o subllenado. Esta combinación favorece una alta calidad del termoformado sin penalizar significativamente el costo energético del sistema.

IX. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permitieron realizar una comparación directa entre el desempeño mecánico del polipropileno reciclado y el MDF con recubrimiento melamínico, evidenciando diferencias significativas en términos de resistencia estructural, estabilidad dimensional y comportamiento frente a esfuerzos de flexión y compresión.

Es importante señalar que, dado el tamaño de muestra utilizado ($n = 4$ por tratamiento), los resultados obtenidos deben interpretarse como evidencia exploratoria. Con este tamaño muestral, la potencia estadística del ANOVA es limitada y el análisis resulta sensible a la presencia de valores atípicos. Por ello, las diferencias identificadas entre materiales constituyen tendencias comparativas relevantes que deberán ser confirmadas en estudios con mayor tamaño muestral.

Los hallazgos coinciden parcialmente con investigaciones previas relacionadas con el reciclaje mecánico de polipropileno, donde se reporta que las propiedades mecánicas del material pueden conservarse dentro de rangos funcionales siempre que el proceso térmico sea controlado adecuadamente y se minimice la degradación del polímero durante su transformación.

El polipropileno reciclado presentó un desempeño mecánico superior al MDF melamina, resultado que puede atribuirse a la naturaleza termoplástica del material, su mayor capacidad de deformación antes de la falla y su menor susceptibilidad a la absorción de humedad. Este comportamiento resulta consistente con estudios previos que reportan ventajas estructurales de materiales poliméricos reciclados frente a materiales lignocelulósicos, especialmente en ambientes con alta humedad relativa.

Asimismo, el polipropileno reciclado mostró mayor estabilidad dimensional y resistencia a la humedad, propiedades directamente relacionadas con su carácter hidrofóbico, representando una ventaja relevante para aplicaciones potenciales en regiones tropicales como el estado de Tabasco (López-Farias et al., 2022).

En términos de resistencia a la flexión, el polipropileno peletizado (PP) alcanzó un valor promedio de 100.03 kg/cm², ligeramente superior a los 93.21 kg/cm² obtenidos para el polipropileno residual triturado (PPRT). Esta diferencia sugiere que el proceso de reciclaje mecánico y termoformado preserva gran parte de la integridad estructural del material, aun cuando pueden presentarse ligeras variaciones derivadas de procesos de degradación térmica, heterogeneidad del residuo reciclado y presencia de impurezas microscópicas, resultados compatibles con lo reportado por Lisperguer et al. (2013).

La comparación entre el MDF melamina y el PPRT evidenció una menor resistencia mecánica del MDF frente a esfuerzos de flexión, registrando valores promedio de 24.33 kg/cm². Este comportamiento confirma las limitaciones estructurales del MDF frente a materiales termoplásticos reciclados, particularmente en condiciones donde la humedad y la deformación térmica pueden afectar la integridad del material lignocelulósico.

Desde la perspectiva ambiental, el análisis de sustentabilidad indicó que la etapa de mayor impacto energético correspondió al proceso térmico, especialmente durante el uso del horno industrial. No obstante, el PPRT presenta ventajas ambientales significativas frente al polipropileno virgen, debido a que evita parcialmente las emisiones asociadas a la producción de resina nueva, estimadas entre 1.9 y 2.1 kg CO₂eq por kilogramo de material producido (PlasticsEurope, 2020). Además, el aprovechamiento de residuos plásticos contribuye a disminuir la disposición final de residuos sólidos urbanos y favorece estrategias de economía circular.

Desde el punto de vista económico, el indicador costo-desempeño posicionó al PPRT como el material más eficiente, al presentar una relación favorable entre resistencia mecánica y costo de producción. Este resultado demuestra que la valorización de residuos plásticos puede representar una alternativa técnicamente funcional y económicamente competitiva frente a materiales convencionales.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten aceptar parcialmente las hipótesis planteadas, confirmando que el polipropileno residual triturado (PPRT) constituye una alternativa viable desde el punto de vista mecánico, económico y ambiental frente al MDF melamina. Sin embargo, una de las principales limitaciones del estudio fue el tamaño de muestra reducido ($n = 4$), así como la variabilidad inherente del material reciclado y las condiciones experimentales a escala piloto. Por ello, se recomienda ampliar el tamaño muestral, incorporar análisis de envejecimiento acelerado y desarrollar estudios a escala semiindustrial para fortalecer la validez estadística y técnica de futuras investigaciones.

X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

X.1 Conclusiones.

Se diseñó y evaluó un proceso de fabricación térmica a escala piloto para placas elaboradas con polipropileno residual triturado generado en la DACBiol-UJAT, identificando que la condición de 270 °C durante 120 minutos presentó el comportamiento más favorable para el termoformado bajo las condiciones experimentales del estudio.

El polipropileno residual triturado demostró potencial técnico y ambiental como material alternativo al MDF melamina en aplicaciones estructurales ligeros, particularmente por su posibilidad de reciclaje y por el aprovechamiento de residuos plásticos que, de otro modo, podrían enviarse a disposición final.

Las placas de polipropileno residual triturado (PPRT) superaron significativamente al MDF melamina en resistencia a la flexión (93.21 vs. 24.33 kg/cm²) y presentaron valores funcionales en resistencia a la compresión (110.16 kg/cm²), resultados que respaldan parcialmente las hipótesis planteadas en la investigación.

El PPRT se identificó como la alternativa más eficiente desde el punto de vista económico, al presentar una relación costo-desempeño favorable en comparación con el polipropileno peletizado y el MDF melamina, evidenciando el potencial de valorización de residuos plásticos dentro de esquemas de economía circular.

El análisis ambiental evidenció que el uso de polipropileno reciclado contribuye a la reducción de la huella de carbono del sistema, al evitar parcialmente las emisiones asociadas a la producción de polímero virgen y disminuir la disposición final de residuos plásticos.

La condición experimental correspondiente a 7.0 kg mostró el mejor equilibrio entre resistencia mecánica, consumo energético y calidad del termoformado, lo que sugiere viabilidad potencial para aplicaciones a escala semiindustrial.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que el aprovechamiento de residuos de polipropileno puede constituir una alternativa sostenible para la fabricación de materiales con aplicación potencial en mobiliario y elementos estructurales ligeros, contribuyendo simultáneamente a la valorización de residuos, reducción del impacto ambiental y fortalecimiento de estrategias de economía circular en el ámbito universitario y regional.

X.2 Recomendaciones.

Ampliar el tamaño muestral a $n \geq 10$ por material en investigaciones futuras, con el fin de incrementar el poder estadístico y mejorar la precisión de los resultados.

Desarrollar un análisis de ciclo de vida (ACV) completo que incluya las etapas de transporte, uso, mantenimiento y disposición final de los materiales evaluados.

Evaluar la incorporación de aditivos compatibilizantes o refuerzos (como fibras de vidrio o cargas minerales) para mejorar las propiedades mecánicas del polipropileno residual triturado (PPRT).

Implementar sistemas de control térmico automatizado en el proceso de termoformado para optimizar el consumo energético y reducir la variabilidad del proceso.

Analizar la viabilidad de desarrollar materiales compuestos híbridos mediante la combinación de polipropileno reciclado con fibras naturales locales, con el objetivo de mejorar la rigidez estructural y reducir costos de producción.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- American Psychological Association. (2020). Publication manual of the American Psychological Association (7th ed.). APA.
- Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S., & Pillai, S. (2021). Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Science of the Total Environment*, 759, 143536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536>
- Arrieta, M. P., Samper, M. D., Aldas, M., & López, J. (2023). On the use of PLA-PHB blends for sustainable food packaging applications. *Materials*, 16(2), 718. <https://doi.org/10.3390/ma16020718>
- Ashby, M. F. (2013). *Materials and the environment: Eco-informed material choice* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Ávila, I., Laines, J., Magaña, A., Sosa, J., Hernández, G., & Núñez, E. (2020). Residuos sólidos en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco: Una estimación y potencial de aprovechamiento. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 6(6), 204.
- Barragán-Ocaña, A., del Valle-Rivera, M. C., Olmos-Peña, S., & Sánchez-Estrada, M. (2021). Plastic waste management in Mexican universities: A diagnosis for improving environmental policies. *Sustainability*, 13(21), 11712. <https://doi.org/10.3390/su132111712>
- Bazán, J. (2022). Propuesta de un nuevo producto de polipropileno reciclado con base de yeso y su aplicación en trasdosados autoportantes [Tesis de licenciatura, Universidad de Sevilla]. <https://hdl.handle.net/11441/140901>

- Bueno, J., Álvarez, F., & Santiago, S. (2005). Biodiversidad del estado de Tabasco. CONABIO.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials science and engineering: An introduction (10th ed.). Wiley.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2014). Termodinámica (8.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Cheng, H., Xu, Y., & Wang, Z. (2022). Mechanical and moisture resistance properties of recycled polypropylene composite boards for furniture applications. *Construction and Building Materials*, 318, 126021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126021>
- Córdova-López, Y. I., Bautista-Valier, E., Laines-Canepa, J. R., Sosa-Olivier, J. A., & Espinosa de los Monteros-Reyna, A. E. (2024). Sustitución sostenible del tablero de MDF-melamina en mesas binarias desechadas en instituciones de educación superior. *Journal of Basic Sciences*, 10(28), 10–21.
- Lipski, A. (2024). Strength of high-density wood-based panels... *Drewno*, 67(212), 45–58.
- Dasiewicz, J., et al. (2024). Thermally active medium-density fiberboard (MDF) with phase change materials for interior applications. *Materials*, 17(18), 1–18.
- Dorieh, A., et al. (2022). A review of recent progress in melamine-formaldehyde resin nanocomposites for coating applications. *Progress in Organic Coatings*, 163, 106660. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106660>
- Eco Recycling Today. (2024, 27 de octubre). Aplicaciones de plásticos en diferentes industrias. <https://www.recyclingtoday.org/es/blogs/news/plastics-applications-across-industries>

- Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition.
- Galvis, N. (2014). Caracterización del polipropileno reciclado disponible a partir de tapas... [Tesis de licenciatura, Universidad EAFIT].
- García-Velázquez, A., Amado-Moreno, M., Toscano-Palomar, L., Seufert-García, O., & Beltrán-Félix, P. (2019). Reciclado de plásticos... *Investigación y Ciencia*, 27(76), 11–18.
- Geyer, R. (2021). Production, use, and fate of synthetic polymers. En M. Streit-Bianchi et al. (Eds.), *Mare plasticum — The plastic sea* (pp. 13–26). Springer.
- Haro-Martínez, A., & Taddei-Bringas, I. (2014). Sustentabilidad y economía... *Economía, Sociedad y Territorio*, 14(46), 743–767.
- Hossain, M., et al. (2023). Research and application of polypropylene... *Discover Nano*, 19(2).
- Huang, Y., et al. (2023). From waste to wealth... *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(6), 2710–2718.
- Hussain, A., et al. (2023). Sustainable fabrication... *Materials Today Sustainability*, 22.
- Irle, M., & Barbu, M. C. (2021). Wood-based panels... *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(4), 783–798.
- Jones, H., et al. (2023). Thermomechanical properties... *Polymers*, 15(21), 4200.
- López-Farías, R., et al. (2022). Mechanical characterization... *Journal of Cleaner Production*, 340, 130821.

- Maris, J., et al. (2021). Advances in mechanical recycling... Polymer Degradation and Stability, 183, 109436.
- Matei, E., et al. (2017). Recycled polypropylene improved... International Journal of Polymer Science, 2017.
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030...
- Orjuela, I., et al. (2018). Desarrollo de ladrillos... Revista Informador Técnico, 82(2), 25–27.
- PlasticsEurope. (2023). Plastics – the fast Facts 2023 [Informe]. PlasticsEurope. https://plasticseurope.org/de/wp-content/uploads/sites/3/2023/10/Plasticsthefastfacts2023_Final.pdf
- Prieto-Ortiz, R. G. (2023). Contaminación ambiental... Revista Colombiana de Cirugía, 38(1), 22–29.
- Rodríguez, G. E., et al. (2024). Physical and mechanical properties... Forests, 15(5), 802.
- Rojas-Valencia, M. N., et al. (2021). Diagnosis of plastics... Sustainability, 13(4), 2284.
- Ruíz-Santoyo, V., Cruz-Mérida, J., García Carvajal, S., & Arenas Arroccena, M. C. (2025). Microplásticos y nanoplasticos: una amenaza para la salud humana y el medio ambiente. Mundo Nano, 18(34), e69832. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2025.34.69832>
- Saleem, J., et al. (2023). Assessing the environmental footprint... Environmental Technology & Innovation, 32.

- Sandoval-García, E., et al. (2023). Midiendo la economía circular... Revista Internacional de Estadística y Geografía, 14(1), 38–53.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). Inventario nacional de fuentes de contaminación plástica.
- Sintac. (2024, 23 de diciembre). Tipos de plásticos y características: cómo reducir su uso. <https://sintac.es/conoce-los-7-tipos-de-plastico-y-sus-caracteristicas/>
- Sodimac México. (2024). Tablero de MDF de 18 mm 1.22 m × 2.44 m blanco absoluto. <https://www.sodimac.com.mx/sodimac-mx/product/637033/Tablero-de-MDF-de-18-mm-1.22-m-x-2.44-m-blanco-absoluto/637033>
- Tisserant, A., et al. (2022). Solid waste and the circular economy... Journal of Industrial Ecology, 26(3), 636–649.
- Turku, I., et al. (2023). Mechanical performance... Composites Part B: Engineering, 249, 110384.
- Vázquez-Morillas, A., et al. (2021). Biodegradation and composting... Sustainability, 13(2), 797.
- Yamamoto, T., & Ota, Y. (2021). Creating a laminated carbon fiber... Composite Structures, 255.
- Yilmaz, E. (2024). Environmental impact assessment... Case Studies in Construction Materials, 20, e02733.
- Zhu, F., et al. (2022). Occurrence and ecological impacts... Pedosphere, 29(2), 141–155.

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	Diseño y evaluación en la fabricación sostenible de placas de polipropileno mediante un proceso térmico
Autor de la Tesis:	Roberto del Carmen Moreno Guzman
ORCID:	https://orcid.org/0009-0000-2423-3202
Resumen de la Tesis:	La generación de residuos plásticos constituye uno de los principales desafíos ambientales a nivel mundial debido al incremento de su producción y a las limitadas alternativas para su valorización. En México, el polipropileno (PP) representa una proporción significativa de los residuos plásticos posconsumo; sin embargo, gran parte de este material aún no se reincorpora a procesos productivos. En el estado de Tabasco, esta problemática se intensifica por el aumento en la generación de residuos sólidos urbanos, lo que hace necesario desarrollar tecnologías sostenibles bajo los principios de la economía circular. La presente investigación tuvo como objetivo diseñar y evaluar un proceso sostenible para la fabricación de placas de polipropileno residual triturado (PPRT) mediante un proceso térmico controlado, comparando su desempeño técnico, económico y ambiental con placas elaboradas a partir de polipropileno peletizado (PP) y MDF melamina como material de referencia. La metodología comprendió la recuperación, clasificación, limpieza, trituración, fundición, moldeo y prensado del material reciclado, así como ensayos de resistencia mecánica, consumo energético, huella de carbono y costos de producción. Los resultados mostraron que las placas de PPRT alcanzaron una resistencia promedio a la flexión de 93.21 kg/cm², estadísticamente equivalente al PP peletizado (100.03 kg/cm²) y superior al MDF melamina (24.33 kg/cm²). En compresión obtuvieron 110.16 kg/cm², confirmando su viabilidad para aplicaciones semiestructurales. La condición óptima correspondió al procesamiento de 7.0 kg de material a 270 °C durante 120 minutos. Se concluye que el proceso desarrollado constituye una alternativa técnicamente viable, económicamente competitiva y ambientalmente sostenible para fortalecer la economía circular y el aprovechamiento de residuos plásticos en México.

Palabras claves de la Tesis:	Polipropileno residual triturado, economía circular, resistencia mecánica, sustentabilidad, MDF melamina
Referencias citadas:	Arrieta, M. P., López, J., Ferrándiz, S., & Peltzer, M. A. (2023). Characterization of PLA-lignocellulosic composites for sustainable applications. <i>Polymers</i>, 15(2), 345. https://doi.org/10.3390/polym15020345 ASTM International. (2022). ASTM D790-22: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM International. ASTM International. (2023). ASTM D695-23: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. ASTM International. Bazán, P. (2022). Economía circular y reciclaje mecánico de poliolefinas. <i>Revista Iberoamericana de Polímeros</i>, 23(4), 215–228. Cabello Alemán, J. (2023). Procesos de moldeo por compresión aplicados a polímeros reciclados. Editorial Alfaomega. Cheng, S., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Environmental performance of wood-based panels under humid conditions. <i>Journal of Cleaner Production</i>, 349, 131338. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131338 Chirinos, R. (2024). Consumo y gestión de polímeros en México. <i>Revista Mexicana de Ingeniería Ambiental</i>, 15(1), 45–59. Dasiewicz, M., Kowalski, B., & Nowak, P. (2024). Advances in melamine-coated MDF panels for interior applications. <i>Construction and Building Materials</i>, 418, 135124. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135124 Dorieh, A., Namazi, H., & Ahmadi, M. (2022). Melamine-formaldehyde resins and their applications in wood composites. <i>Polymers</i>, 14(11), 2210. https://doi.org/10.3390/polym14112210 Geyer, R. (2021). Production, use, and fate of synthetic polymers. <i>Science Advances</i>, 7(18), eabd0288. https://doi.org/10.1126/sciadv.abd0288 Jones, M., Williams, R., & Smith, T. (2023). Polyolefin waste generation and recycling challenges. <i>Resources, Conservation and Recycling</i>, 192, 106927. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106927 Laines Canepa, J. R. (2023). Diseño experimental para la fabricación de placas de polipropileno reciclado en la DACBiol-UJAT [Informe técnico].

	Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Leal-Martínez, A., Hernández, P., & Ruiz, G. (2022). Impacto ambiental de los residuos plásticos en ecosistemas tropicales. <i>Revista Latinoamericana de Medio Ambiente</i>, 12(3), 101–118. López-Farías, R., Méndez, J., & Castillo, D. (2022). Mechanical and moisture resistance properties of recycled polypropylene composites. <i>Materials Today Communications</i>, 31, 103566. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103566 Lozano, R., Barreiro-Gen, M., & Zafar, A. (2022). Universities and the Sustainable Development Goals: A review. <i>Journal of Cleaner Production</i>, 349, 131318. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131318 Mendoza-Tinoco, D., Salazar, M., & Pérez, L. (2022). Gestión de residuos plásticos en América Latina. <i>Waste Management</i>, 138, 45–56. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.012 Norma Mexicana NMX-E-232-CNCP-2011. Industria del plástico—Reciclado—Símbolos de identificación de plásticos. Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2022). <i>Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options</i>. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/de747aef-en PlasticsEurope. (2023). <i>Plastics – the Facts 2023</i>. PlasticsEurope. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2023). <i>Turning off the Tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy</i>. UNEP. Ramos-Leal, J., Torres, A., & Hernández, M. (2021). Contaminación por residuos sólidos urbanos en ecosistemas acuáticos de Tabasco. <i>Revista Mexicana de Ciencias Ambientales</i>, 12(2), 55–70. Rodríguez, J., Martínez, F., & López, A. (2024). MDF melamina: propiedades y aplicaciones en mobiliario contemporáneo. <i>Materiales y Construcción</i>, 74(354), e338. https://doi.org/10.3989/mc.2024.338 Ruíz-Santoyo, V., Cárdenas, M., & Gómez, L. (2025). Microplásticos y salud humana: mecanismos de exposición y efectos potenciales. <i>Environmental Research</i>, 245, 118012. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118012
--	---

	SEMARNAT. (2023). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Shahid, M., Ali, S., & Khan, A. (2023). Polypropylene: Properties, processing and industrial applications. <i>Polymers</i>, 15(9), 2031. https://doi.org/10.3390/polym15092031 Shirvanimoghaddam, K., Motamed, B., Ramakrishna, S., & Naebe, M. (2021). Death by waste: Fashion and textile circular economy case. <i>Science of the Total Environment</i>, 718, 137317. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137317 Tahir, M., Ahmad, N., & Iqbal, J. (2023). Environmental impacts of plastic production and waste management. <i>Journal of Environmental Management</i>, 334, 117484. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117484 Tisserant, A., Pauliuk, S., & Merciai, S. (2022). Circular economy strategies for plastics and wood substitution. <i>Resources, Conservation and Recycling</i>, 180, 106176. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106176 Yilmaz, A. (2024). Mechanical performance and durability of melamine-faced MDF panels. <i>Construction and Building Materials</i>, 420, 135890. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135890 Zhu, Q., Li, X., & Wang, Y. (2022). Plastic pollution and ecosystem impacts: A global review. <i>Science of the Total Environment</i>, 806, 150420. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150420
--	---