

# Desarrollo y caracterización de un material compuesto biodegradable PLA - Phragmites Australis - poli (coetereftalato de butileneadipato)

Jorge Fajardo-Seminario<sup>1</sup>, Joaquín Peña-Crespo<sup>2</sup>, César Paltán-Zhingre<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo de investigación en nuevos materiales y procesos de transformación (GiMaT), Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Email: jfajardo@ups.edu.ec

<sup>2</sup>Grupo de investigación en nuevos materiales y procesos de transformación (GiMaT), Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Email: jpenace@est.ups.edu.ec

<sup>3</sup>Grupo de investigación en nuevos materiales y procesos de transformación (GiMaT), Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Email: cpaltan@ups.edu.ec

## Resumen

En el presente estudio se desarrolló un nuevo material compuesto biodegradable a partir de una matriz de ácido poliláctico (PLA) reforzada con fibras cortas de Phragmites Australis (PA). En la composición se incorporaron contenidos de 0.5 y 1.5% v/v de poli (coetereftalato de butileneadipato) modificado con anhídrido injertado para evaluar su desempeño como agente de acople y como lubricante interno. Se caracterizaron sus propiedades mecánicas y reológicas a diferentes composiciones 20, 30 y 40 % v/v de refuerzo. Con el compuesto biodegradable se manufacturaron probetas según ISO 725 mediante procesos de extrusión e inyección, para realizar ensayos de tracción, flexión e impacto. Además, se determinó el índice de fluidez de cada mezcla mediante ensayo MFI. Los resultados se limitan a los rangos de composiciones evaluadas. La rigidez y resistencia al impacto se ven incrementadas mientras que la resistencia a la tracción y flexión decrecen con respecto al PLA sin refuerzo.

**Palabras clave:** materiales compuestos, biobasados, PLA, fibras naturales.

## Abstract

In the present study, a new biodegradable composite material was developed from a polylactic acid (PLA) matrix reinforced with short Phragmites Australis (PA) fibers. Anhydride grafted anhydride modified poly (butylene terephthalate coeterephthalate) contents of 0.5 and 1.5% v/v were incorporated in the composite to evaluate its performance as a coupling agent and as an internal lubricant. Their mechanical and rheological properties were characterized at different compositions 20, 30 and 40 % v/v reinforcement. With the biodegradable composite, specimens were manufactured according to ISO 725 by extrusion and injection processes, to perform tensile, flexural and impact tests. In addition, the flow index of each mixture was determined by MFI testing. The results are limited to the ranges of compositions evaluated. Stiffness and impact strength are increased while tensile and flexural strength decrease with respect to unreinforced PLA.

**Keywords:** composite materials, biobased, PLA, natural fibers

## 1. Introducción

En la actualidad, los materiales compuestos han adquirido gran importancia dentro de los materiales de ingeniería, con aplicaciones en diferentes sectores industriales, debido a sus excelentes propiedades mecánicas y bajo peso [1]. En muchos casos, tanto las

fibras de refuerzo (fase dispersa) como las matrices de materiales compuestos, son sintéticas y se obtienen de fuentes no renovables, siendo algunos ejemplos las fibras de vidrio, carbono y aramida [2] y polímeros como el polipropileno (PP), polietileno (PE), poliestireno, etc. [3]. Sin embargo, en vista de las crecientes preocupaciones con respecto a la

sostenibilidad de los productos que consumimos, y debido a la implementación de políticas ambientales más exigentes en muchos países, los ingenieros y científicos se encuentran en una constante búsqueda de alternativas renovables y eco-amigables para sustituir a los materiales tradicionales en aplicaciones estructurales [2], [4].

Los plásticos más utilizados en la elaboración de materiales compuestos son el polipropileno (PP), polietileno (PE), poliestireno (PS) y policloruro de vinilo (PVC). En este sentido, existe una preocupación global con respecto a productos basados en el petróleo, debido a su naturaleza no biodegradable y a que provienen de una fuente no renovable [3]. Según Carla Vaca [5] en un informe de las Naciones Unidas, cada año se producen 369 millones de toneladas de plástico, de las cuales 11 millones terminan en los océanos. Si no se toman medidas para controlar este problema, se espera que estos niveles se tripliquen para el año 2040. Esta contaminación supone una situación muy preocupante debido a que se destruyen los ecosistemas marinos y terrestres, y en consecuencia se afecta la salud humana y las redes de alimentos. Es por esto por lo que cada vez más investigadores están interesados en buscar y desarrollar materiales biodegradables provenientes de fuentes renovables que puedan reemplazar a los polímeros tradicionales obtenidos del petróleo. Las matrices biodegradables más utilizadas son: ácido poliláctico (PLA), almidón termoplástico y polihidroxialcanoatos (PHA). Su versatilidad y capacidad para descomponerse de manera natural los convierten en una opción convincente para reducir la huella ecológica. El ácido poliláctico (PLA), es un polímero biodegradable que se obtiene de diferentes fuentes renovables como la papa, el almidón de maíz y la remolacha [3], [6]. Actualmente ha incursionado en diversas aplicaciones, desde envases compostables hasta dispositivos médicos.

Por otra parte, las fibras más estudiadas como refuerzo de materiales compuestos bio-basados son el lino, abacá, cáñamo, banano y bambú. Es necesario diversificar las fuentes de reforzantes naturales en conceptos de economía circular. El Phragmites australis (PA), comúnmente conocido como carrizo es una planta familia del bambú, la cual también posee características que vuelven atractiva a su fibra, como una rápida tasa de crecimiento y gran disponibilidad en muchos países. El PA ha sido utilizado en la construcción, como una fuente de biogás o en la producción de papel, sin embargo, su uso en la industria de los materiales compuestos ha sido poco investigado [7], [8].

El presente estudio busca aportar en el campo de los materiales compuestos con potencial aplicación industrial para sustituir a plásticos convencionales de un solo uso, mediante la elaboración y caracterización de un material compuesto biodegradable con matriz de PLA reforzada con fibra de PA. Además, en vista de

que una de las dificultades más grandes en el desarrollo de biocompuestos es la incompatibilidad entre la fibra y la matriz, se pretende evaluar el efecto de un agente de acople de poli (coetereftalato de butileneadipato) modificado con anhídrido injertado sobre las propiedades mecánicas del material resultante. Los resultados del estudio se limitan a los rangos de contenidos empleados.

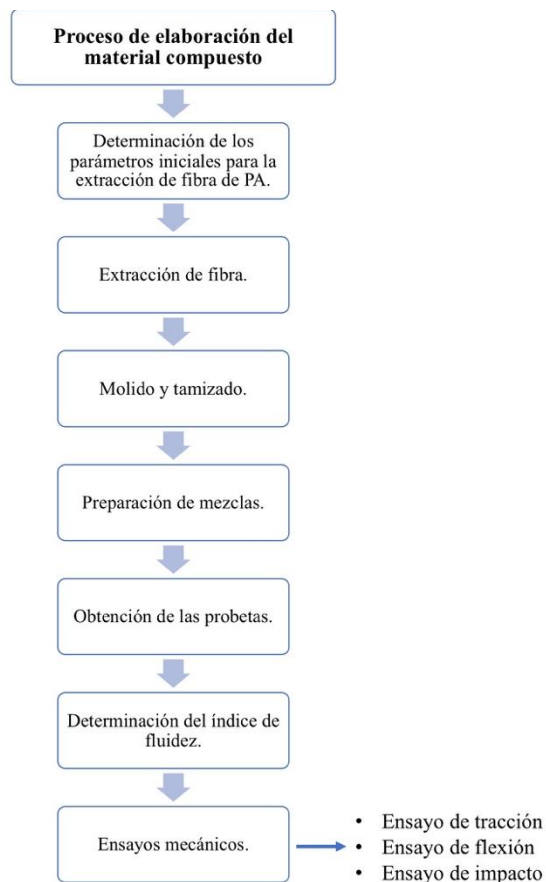
## 2. Metodología

### 2.1. Glosario

A continuación se describen las abreviaciones que se utilizan a lo largo del documento.

- **v/v:** Porcentaje volumétrico. Se determina mediante el volumen de un componente dividido para el volumen total de la mezcla multiplicado por 100.
- **PLA:** ácido poliláctico.
- **PA:** Phragmites Australis.
- **BP-1:** Agente de acople utilizado en la elaboración del biocompuesto.

En el presente proyecto se evaluaron distintos contenidos de fibra y agente de acople en las mezclas para determinar su impacto sobre las propiedades mecánicas de los compuestos. En la figura 1 se muestran las etapas desarrolladas para obtener el composite.



**Figura 1.** Diagrama de flujo del proceso de elaboración del material compuesto.

## 2.2. Composiciones

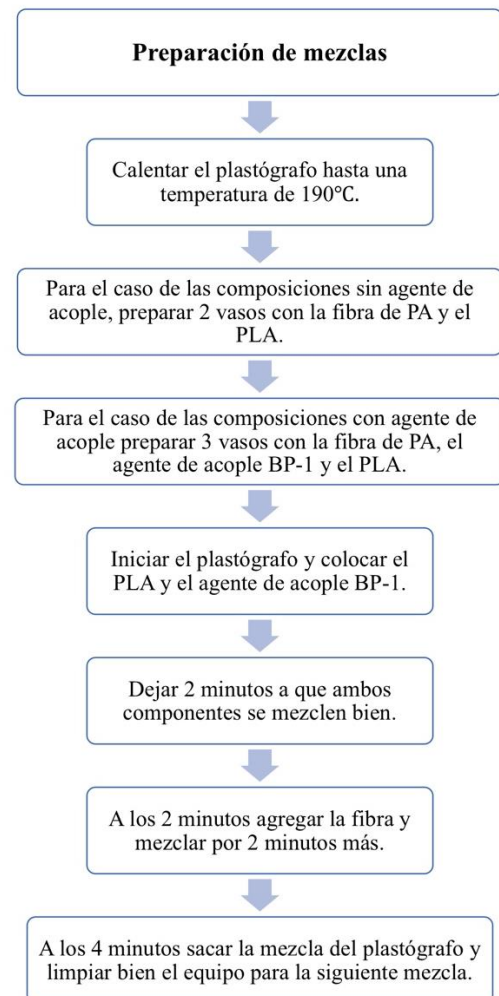
Con el fin de estudiar el efecto de la concentración de fibra de PA (*Phragmites australis*) y agente de acople (BP-1) en las propiedades mecánicas del bio compuesto, se optó por realizar 9 mezclas en total. Se realizaron 3 porcentajes de refuerzo correspondientes al 20, 30 y 40% v/v. Para cada porcentaje de refuerzo se realizaron 3 concentraciones de agente de acople correspondientes a 0, 0.5 y 1.5% v/v.

## 2.3. Obtención de las mezclas

Las mezclas de biopolímero se realizaron en el plastógrafo *Brabender Plastograph EC Plus*. La temperatura a la que se realizaron las mezclas fue de 190°C y a 40rpm.

### 2.3.1. Procedimiento de preparación de mezclas

A continuación la figura 2 muestra el procedimiento para la preparación de cada mezcla.



**Figura 2.** Diagrama de flujo del proceso de preparación de mezclas.

## 2.4. Obtención de las probetas

Las probetas utilizadas para los ensayos mecánicos fueron obtenidas mediante inyección. La inyectora utilizada para este propósito fue la *BOY 35E*. La temperatura de inyección fue de 190°C. Se realizaron 6 inyecciones (24 probetas) de cada una de las mezclas. Estas probetas fueron utilizadas para los ensayos mecánicos.

## 3. Materiales

El PLA utilizado fue el Luminy® PLA LX175 obtenido de la empresa TotalEnergies. El agente de acople utilizado es el COACE® BP-1 obtenido de la empresa "Coace Chemical Company Limited". Este agente es un poli (coetereftalato de butileneadipato) modificado con anhídrido injertado. Se lo puede utilizar como agente de acople entre matrices de PLA o PBAT y materiales de relleno como fibras naturales.

## 4. Resultados

#### 4.1. Índice de fluidez

Se realizaron 3 ensayos para determinar el índice de fluidez de cada una de las mezclas de material compuesto. La tabla 1 muestra el valor promedio del índice de fluidez, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 1. Índice de fluidez de cada mezcla.

Mezcla	Índice de fluidez (g/10min)	Desviación estándar	CV (%)
PLA	6.08	0.14	2.36
20%PA	2.16	0.99	45.86
20%PA + 0.5%BP-1	2.25	0.14	6.23
20%PA + 1.5%BP-1	3.21	0.48	14.81
30%PA	1.45	0.11	7.72
30%PA + 0.5%BP-1	3.32	0.06	1.74
30%PA + 1.5%BP-1	3.27	0.58	17.82
40%PA	0.43	0.01	3.05
40%PA + 0.5%BP-1	0.75	0.15	20.35
40%PA + 1.5%BP-1	0.74	0.08	10.28

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los datos del índice de fluidez de las diferentes mezclas, se realizaron 3 gráficos en los que se comparó el PLA con todas las composiciones con 20, 30 y 40% de fibra de PA. Las figuras 3, 4 y 5 muestran estos gráficos, respectivamente. En cada figura, la columna de la izquierda muestra el índice de fluidez del PLA, y las 3 columnas de la derecha corresponden con las mezclas sin agente de acople, con 0.5% v/v de agente de acople y por último con 1.5% v/v de agente de acople.

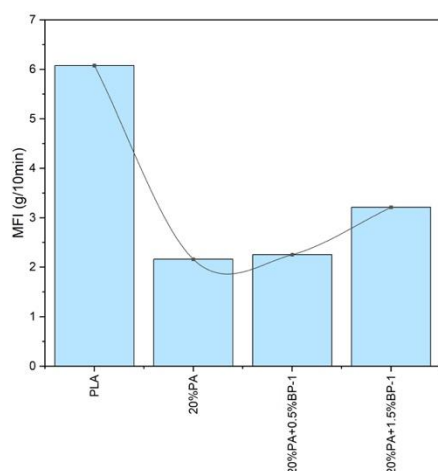


Figura 3. Índice de fluidez del PLA (g/10min) comparado con las mezclas con 20% de fibra de PA.

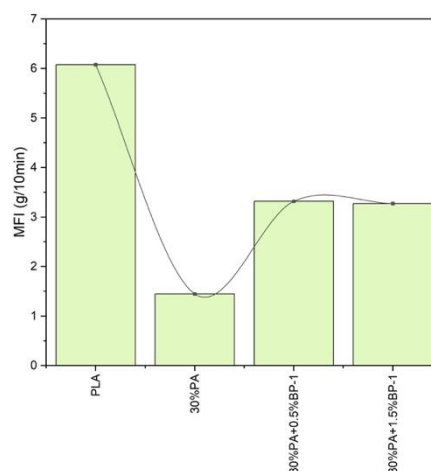


Figura 4. Índice de fluidez del PLA (g/10min) comparado con las mezclas con 30% de fibra de PA.

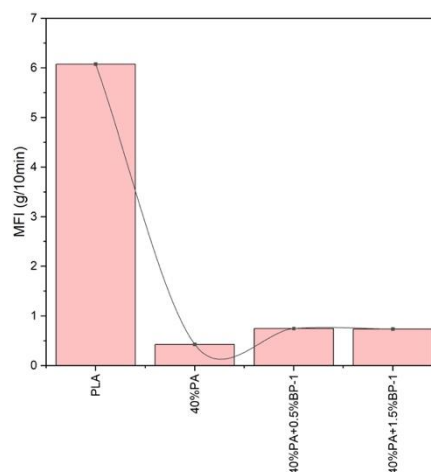


Figura 5. Índice de fluidez del PLA (g/10min) comparado con las mezclas con 40% de fibra de PA.

#### 4.2. Ensayo de tracción

Se realizaron 5 ensayos de tracción de cada una de las mezclas de material compuesto. La tabla 2 muestra el valor promedio de esfuerzo máximo, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

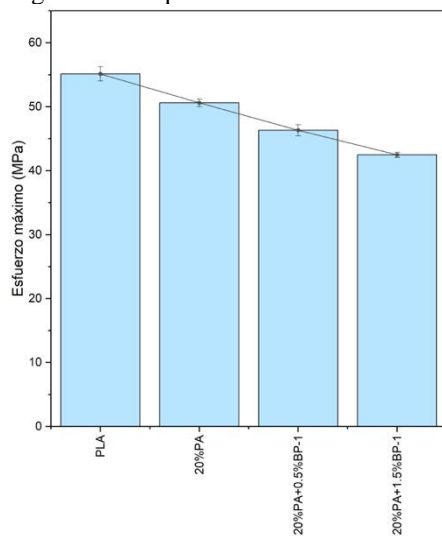
Tabla 2. Esfuerzo máximo de cada mezcla.

Mezcla	Esfuerzo máximo (MPa)	Desviación estándar	CV (%)
PLA	55.13	1.12	2.02
20%PA	50.60	0.58	1.14
20%PA + 0.5%BP-1	46.33	0.88	1.89

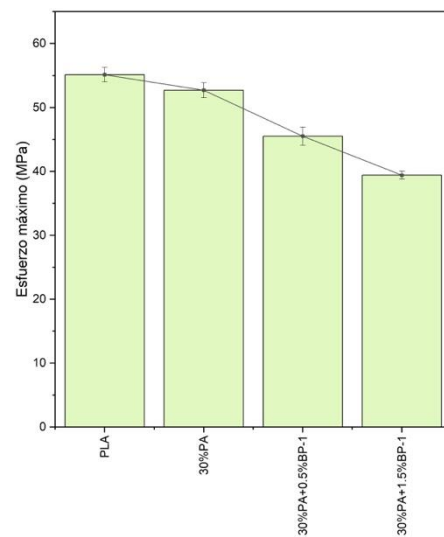
20% PA + 1.5% BP-1	42.49	0.40	0.95
30% PA	52.71	1.19	2.26
30% PA + 0.5% BP-1	45.51	1.44	3.17
30% PA + 1.5% BP-1	39.41	0.60	1.51
40% PA	48.11	4.28	8.90
40% PA + 0.5% BP-1	38.15	1.78	4.66
40% PA + 1.5% BP-1	31.84	1.79	5.63

Fuente: Elaboración propia.

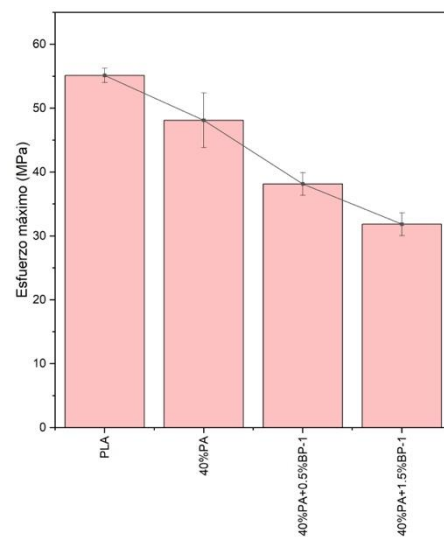
A partir de los datos de esfuerzos máximos obtenidos del ensayo de tracción, se realizaron 3 gráficos en los que se comparó el PLA con todas las composiciones con 20, 30 y 40% de fibra de PA. Las figuras 6, 7 y 8 muestran estos gráficos, respectivamente. En cada figura, la columna de la izquierda muestra el esfuerzo máximo del PLA, y las 3 columnas de la derecha corresponden con las mezclas sin agente de acople, con 0.5% v/v de agente de acople y por último con 1.5% v/v de agente de acople.



**Figura 6.** Esfuerzo máximo del PLA (MPa) comparado con las mezclas con 20% de fibra de PA.



**Figura 7.** Esfuerzo máximo del PLA (MPa) comparado con las mezclas con 30% de fibra de PA.



**Figura 8.** Esfuerzo máximo del PLA (MPa) comparado con las mezclas con 40% de fibra de PA.

#### 4.3. Ensayo de flexión

Se realizaron 5 ensayos de flexión de cada una de las mezclas de material compuesto. La tabla 3 muestra el valor promedio de esfuerzo máximo por flexión, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

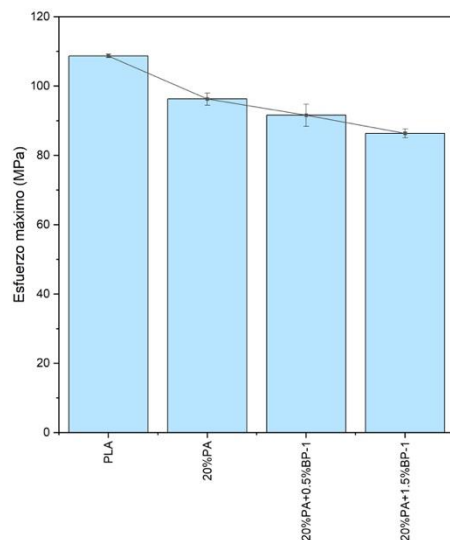
Tabla 3. Esfuerzo máximo por flexión de cada mezcla.

Mezcla	Esfuerzo máximo (MPa)	Desviación estándar	CV (%)
PLA	108.72	0.50	0.46
20% PA	96.29	1.75	1.82
20% PA + 0.5% BP-1	91.59	3.23	3.52

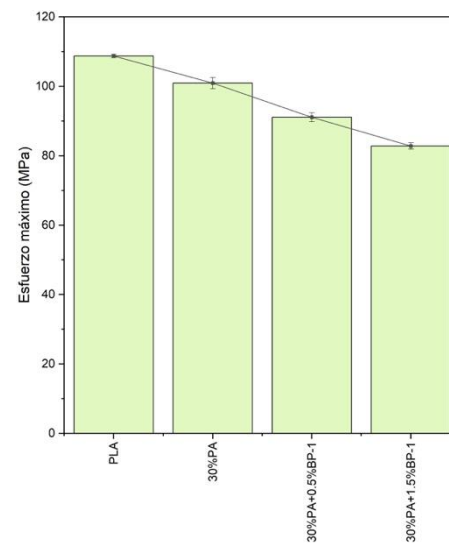
20%PA + 1.5%BP-1	86.37	1.27	1.47
30%PA	100.92	1.63	1.62
30%PA + 0.5%BP-1	91.08	1.32	1.45
30%PA + 1.5%BP-1	82.81	0.95	1.15
40%PA	100.45	1.95	1.95
40%PA + 0.5%BP-1	86.47	0.52	0.60
40%PA + 1.5%BP-1	75.58	0.98	1.30

Fuente: Elaboración propia.

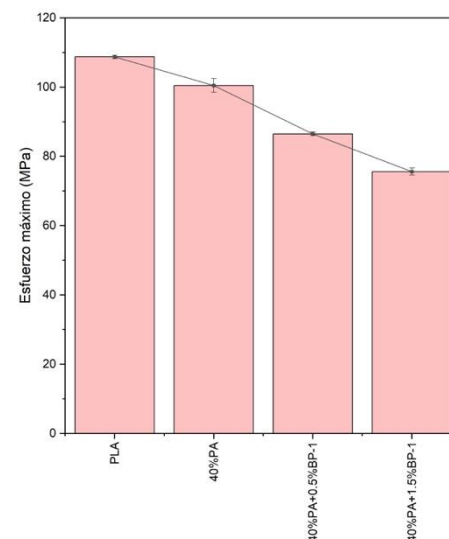
A partir de los datos de esfuerzos máximos por flexión, se realizaron 3 gráficos en los que se comparó el PLA con todas las composiciones con 20, 30 y 40% de fibra de PA. Las figuras 9, 10 y 11 muestran estos gráficos, respectivamente. En cada figura, la columna de la izquierda muestra el esfuerzo máximo por flexión del PLA, y las 3 columnas de la derecha corresponden con las mezclas sin agente de acople, con 0.5% v/v de agente de acople y por último con 1.5% v/v de agente de acople.



**Figura 9.** Esfuerzo máximo por flexión del PLA (MPa) comparado con las mezclas con 20% de fibra de PA.



**Figura 10.** Esfuerzo máximo por flexión del PLA (MPa) comparado con las mezclas con 30% de fibra de PA.



**Figura 11.** Esfuerzo máximo por flexión del PLA (MPa) comparado con las mezclas con 40% de fibra de PA.

#### 4.4. Ensayo de impacto

Se realizaron 5 ensayos de impacto para cada una de las mezclas de material compuesto. La tabla 4 muestra el valor promedio de la resistencia al impacto, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

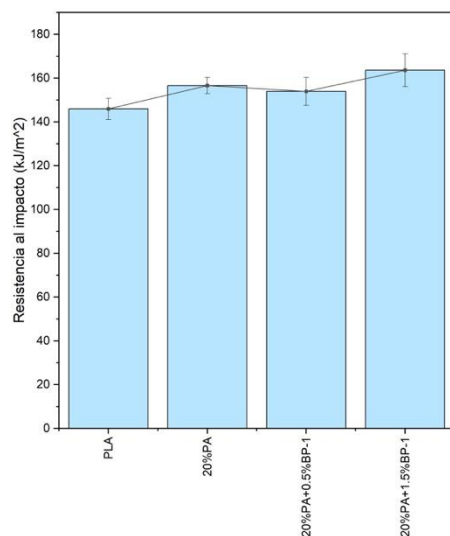
Tabla 4. Resistencia al impacto de cada mezcla.

Mezcla	Resistencia al impacto [kJ/m <sup>2</sup> ]	Desviación estándar	CV (%)
PLA	145.95	4.83	3.31
20%PA	156.63	3.69	2.35
20%PA + 0.5%BP-1	153.94	6.43	4.18

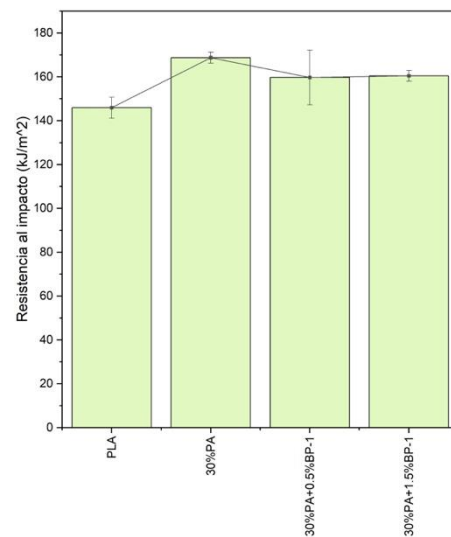
20% PA + 1.5% BP-1	163.63	7.50	4.58
30% PA	168.78	2.48	1.47
30% PA + 0.5% BP-1	159.76	12.48	7.81
30% PA + 1.5% BP-1	160.49	2.50	1.56
40% PA	169.38	1.88	1.11
40% PA + 0.5% BP-1	164.26	9.04	5.51
40% PA + 1.5% BP-1	175.79	5.23	2.98

Fuente: Elaboración propia.

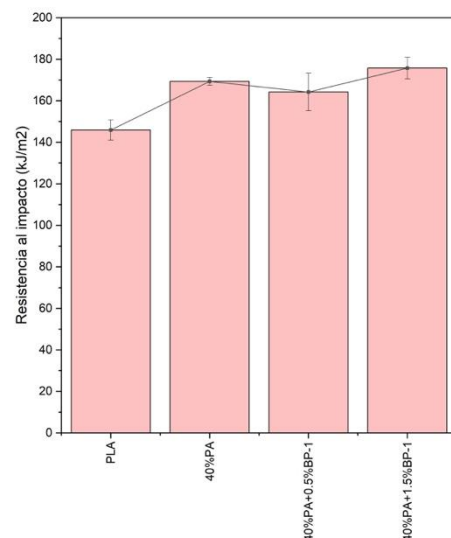
A partir de los datos de resistencia al impacto se realizaron 3 gráficos en los que se compara el PLA con las mezclas con 20, 30 y 40% de fibra de PA. Las figuras 12, 13 y 14 muestran estos gráficos, respectivamente. En cada figura, la columna de la izquierda muestra la resistencia al impacto del PLA, y las 3 columnas de la derecha corresponden con las mezclas sin agente de acople, con 0.5% v/v de agente de acople y por último con 1.5% v/v de agente de acople.



**Figura 12.** Resistencia al impacto del PLA (MPa) comparado con las mezclas con 20% de fibra de PA.



**Figura 13.** Resistencia al impacto del PLA (MPa) comparado con las mezclas con 30% de fibra de PA.



**Figura 14.** Resistencia al impacto del PLA (MPa) comparado con las mezclas con 40% de fibra de PA.

## 5. Discusión

### 5.1. Índice de fluidez

Analizando las figuras 3, 4 y 5, se puede observar que el índice de fluidez reduce a medida que aumenta el contenido de fibra del material compuesto. Se observa también que el agente de acople aumenta el índice de fluidez con respecto a las mezclas que contienen únicamente fibra.

El valor del índice de fluidez tiene una reducción del 64.46%, 214.40% y 390.60% para las mezclas con 20, 30 y 40% de fibra de PA, respectivamente. Cuando se agrega 0.5% de agente de acople, el índice de fluidez

aumenta en un 4.31%, 129.37% y 75.12% para las mezclas de 20, 30 y 40% de fibra de PA, respectivamente. Finalmente, cuando se agrega 1.5% de agente de acople, el índice de fluidez aumenta en un 48.70%, 126.19% y 73% para las mezclas de 20, 30 y 40% de fibra de PA, respectivamente

## 5.2. Ensayo de tracción

Los resultados de los ensayos de tracción muestran un comportamiento contrario al que se esperaba. Como se observa en las figuras 6, 7 y 8, el esfuerzo máximo del PLA reforzado con fibra de PA es menor al del PLA sin refuerzo, y reduce aún más con el uso de agente de acople.

Para las mezclas con 20% de fibra de PA, el esfuerzo máximo reduce en un 22.94% para la composición de 20%PA+1.5%BP-1, con respecto al PLA sin refuerzo. Para las mezclas con 30% de fibra de PA, el esfuerzo máximo reduce en un 28.51% para la composición de 30%PA+1.5%BP-1, con respecto al PLA sin refuerzo. Finalmente, para las mezclas con 40% de fibra de PA, el esfuerzo máximo reduce en un 42,24% para la composición de 40%PA+1.5%BP-1, con respecto al PLA sin refuerzo.

Por otro lado, la presencia de fibra en el PLA tiene el efecto de aumentar la rigidez del material, lo cual se observa por el aumento del módulo de Young (E) de las diferentes mezclas, con relación al PLA sin refuerzo. La composición con mayor rigidez es la de PLA+40%PA+0.5%BP-1, la cual presenta un aumento en el módulo de Young del 132.180%.

La resistencia del material compuesto está directamente vinculada a la fuerza de adhesión de la fibra y la matriz en la región de la interfase [9]. El uso de agentes de acople o compatibilizantes puede ser la solución ante la incompatibilidad que suelen tener las fibras vegetales con las matrices poliméricas [2], sin embargo, en este caso se observa claramente que el agente de acople, con el contenido formulado, no favoreció la transferencia de cargas desde la matriz hacia las fibras. Es necesario un estudio más detallado de la longitud crítica para el compuesto PLA+PA+ BP-1. Si la distribución de longitudes de fibra tiende a ser mayoritariamente subcrítica, el efecto reforzante sería mínimo o nulo [10].

## 5.3. Ensayo de flexión

Los resultados de los ensayos de flexión muestran una tendencia similar a lo observado en los ensayos de tracción. Observando las figuras 9, 10 y 11 se puede determinar que la fibra de PA y el aumento del contenido de agente de afectan inversamente la resistencia máxima a la flexión del material compuesto.

Para las mezclas con 20% de fibra de PA, la resistencia máxima a la flexión reduce en un 20.56% para la composición de 20%PA+1.5%BP-1, con respecto al PLA sin refuerzo. Para las mezclas con 30% de fibra de PA, la reducción es del 23.83% para la composición de 30%PA+1.5%BP-1, con respecto al PLA sin refuerzo. Y finalmente para las mezclas con 40% de fibra de PA, la reducción es del 30.48% para la composición de 40%PA+1.5%BP-1, con respecto al PLA sin refuerzo.

Las posibles razones por las cuales la fibra y el agente de acople tuvieron un efecto negativo en la resistencia a la flexión de los materiales compuestos son las mismas que se expusieron en el caso de los resultados de los ensayos de tracción.

## 5.4. Ensayo de impacto

Finalmente, en el ensayo de impacto, observando las figuras 12, 13 y 14 se puede determinar que para las composiciones con 20 y 40% de fibra de PA, la fibra y el agente de acople incrementan la resistencia al impacto con respecto al PLA sin refuerzo. En el caso de la composición con 30% de fibra de PA, la mezcla presenta un mejor resultado es aquella que tiene únicamente fibra.

Con base en estos resultados, se observa que existe una disminución de la resistencia a la tracción y flexión del compuesto, lo cual implica una limitación del material para aplicaciones estructurales en las que son necesarias buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, la adición del agente de acople tuvo el efecto de mejorar la resistencia al impacto, lo cual hace que el compuesto sea adecuado para aplicaciones en las que se requiera esta propiedad.

Otros autores han realizado estudios similares en los que refuerzan matrices de PLA con diferentes fibras naturales como bambú (BF), kenaf, sisal, cáñamo (hemp) y salvado de trigo (wheat-bran). A continuación, en las tablas 5, 6 y 7 se presentan la resistencia a la tracción, flexión e impacto de los compuestos desarrollados en esas investigaciones y se comparan con el compuesto desarrollado en el presente estudio. Se presentan los valores de incremento porcentual en las propiedades con respecto al valor nominal del Pla sin refuerzo empleado en cada estudio.

Tabla 5. Resistencia a la tracción de diferentes compuestos con matriz de PLA reforzados con fibras naturales y diferentes técnicas de acoplamiento.

Material	Resistencia a la tracción (MPa)		Porcentaje de cambio
	PLA	Compuesto	



BF-PLA-g-GMA [11]	50	60	20%
Kenaf+silanos-PLA [12]	50	57.85	15.7%
Hemp tratado ezimáticamente – PLA [13]	81	103	27.16%
Sisal+hemp – PLA [14]	34.88	46.25	32.60%
Salvado de trigo – PLA [15]	70	9	-677.78%
Phragmites australis - PLA	55.13	52.71 (PLA+30% PA)	-4.39%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Resistencia a la flexión de diferentes compuestos con matriz de PLA reforzados con fibras naturales y diferentes técnicas de acoplamiento.

Material	Resistencia a la flexión (MPa)		Porcentaje de cambio
	PLA	Compuesto	
Kenaf+silanos-PLA [12]	51	84.22	65.14%
Sisal+hemp – PLA [14]	81.15	94.83	16.86%
Kenaf-celulosa derivada – PLA [16]	63.4	98.8	55.84%
Salvado de trigo – PLA [15]	90	26	-71.11%
Phragmites australis - PLA	108.72	100.92 (PLA+30% PA)	-7.17%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Resistencia al impacto de diferentes compuestos con matriz de PLA reforzados con fibras naturales y diferentes técnicas de acoplamiento.

Material	Resistencia al impacto		Porcentaje de cambio
	PLA	Compuesto	
Sisal+hemp – PLA [14]	6.43 kJ/ m <sup>2</sup>	10.29 kJ/ m <sup>2</sup>	60.03%
Kenaf-derived cellulose – PLA [16]	29.9 J/m	35.3 J/m	18.06%
Wheat-bran – PLA [15]	12 J/m <sup>2</sup>	1 J/m <sup>2</sup>	-91.67%
Phragmites australis - PLA	145.95 kJ/ m <sup>2</sup>	175.79 kJ/m <sup>2</sup>	20.45%

		(PLA + 40% PA +1.5% BP-1)	
--	--	---------------------------	--

Fuente: Elaboración propia.

En la mayoría de los casos se puede observar que el uso de fibra natural con algún tratamiento superficial o en conjunto con un agente de acople incrementa la resistencia a la tracción, flexión e impacto del material. Sin embargo, en el caso del compuesto con salvado de trigo (wheat-bran) y PLA, se observa que la resistencia a la tracción, flexión e impacto del material redujo considerablemente. Por otro lado, la resistencia al impacto del compuesto desarrollado en esta investigación tiene un aumento del 20.45% con respecto al PLA sin refuerzo, valor similar al aumento reportado por Tawakkal et al. [16].

## 6. Conclusiones

Tras el estudio realizado, se logró obtener el biocompuesto de matriz de PLA reforzada con fibras cortas de Phragmites Australis (PA). Se determinaron las propiedades mecánicas de tracción, flexión e impacto del PLA y de las diferentes mezclas del material compuesto para compararlas entre sí y observar su efecto.

En cuanto al índice de fluidez (MFI), se observó que el aumento del contenido de fibra en el compuesto tiene el efecto de reducir considerablemente la fluidez del material. Sin embargo, el agente de acople tuvo un efecto lubricante, lo cual se evidencia mediante el ligero aumento del MFI. Para las mezclas de 20, 30 y 40% de fibra de PA y sin agente de acople, el MFI reduce un 64.46%, 214.40% y 390.60% respectivamente. Posteriormente, con la adición de 0.5% de BP-1, el MFI aumenta en un 4.31%, 129.37% y 75.12% para las composiciones con 20, 30 y 40% de PA, respectivamente. Finalmente, con la adición de 1.5% de BP-1, el MFI aumenta en un 48.70%, 126.19% y 73% para las mezclas de 20, 30 y 40% de fibra de PA, respectivamente.

Por otra parte, los resultados de los ensayos mecánicos muestran que la fibra de PA y el agente de acople BP-1, en el rango estudiado, tienen el efecto de reducir la resistencia a la tracción y flexión del material compuesto, requiriendo un estudio posterior con diferentes concentraciones de agente de acople y un análisis detallado de la distribución de longitudes de fibra que permitan entender el comportamiento y controlarlo.

Por el contrario, los resultados del ensayo de impacto muestran que la presencia de fibra y agente de acople incrementan esta propiedad. La composición que

presenta un mejor resultado es la de PLA+40%PA+1.5%BP-1, dando una resistencia al impacto de 175.785 kJ/m<sup>2</sup>.

Finalmente, en todas las composiciones, se observó que la adición de fibra incrementa la rigidez del material. La composición de PLA+40%PA+0.5%BP-1 presenta la mayor rigidez, con un valor del módulo de Young de 7.5293 GPa. Estos resultados posibilitan el uso del material en las composiciones propuestas en aplicaciones semiestructurales con la ventaja de ser biodegradables por la naturaleza de sus constituyentes.

## 7. Referencias

- [1] William Callister y David Rethwisch, *Materials Science and Engineering an Introduction*, 10ma ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [2] S. R. Mousavi *et al.*, «Mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polymer composites: a review of recent case studies», *J. Mater. Sci.*, vol. 57, n.º 5, pp. 3143-3167, feb. 2022, doi: 10.1007/s10853-021-06854-6.
- [3] A. K. Trivedi, M. K. Gupta, y H. Singh, «PLA based biocomposites for sustainable products: A review», *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 6, n.º 4, pp. 382-395, oct. 2023, doi: 10.1016/j.aiepr.2023.02.002.
- [4] S. Krishna Mohan *et al.*, «Evaluation of Mechanical Properties of Sisal and Bamboo Fibres Reinforced with Polymer Matrix Composites Prepared by Compression Moulding Process», *Hindawi*, p. 8, sep. 2021.
- [5] United Nations Conference on Trade and Development, *Plastic Pollution: The Pressing Case for Natural and Environmentally Friendly Substitutes to Plastics*. United Nations, 2023. doi: 10.18356/9789210027229.
- [6] K. Nirmal Kumar *et al.*, «Mechanical and Thermal Properties of Bamboo Fiber-Reinforced PLA Polymer Composites: A Critical Study», *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2022, pp. 1-15, dic. 2022, doi: 10.1155/2022/1332157.
- [7] M. Machaka, J. Khatib, S. Baydoun, A. Elkordi, y J. J. Assaad, «The Effect of Adding Phragmites australis Fibers on the Properties of Concrete», *Buildings*, vol. 12, n.º 3, p. 278, mar. 2022, doi: 10.3390/buildings12030278.
- [8] M. Honoré, S. Pimbert, y T. Lecompte, «Characterisation of plant flours for biocomposite applications focussing on Phragmites australis properties», *Biosyst. Eng.*, vol. 197, pp. 367-377, sep. 2020, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.07.016.
- [9] Md. Syduzzaman, S. Sultana Rumi, F. Faiza Fahmi, M. Akter, y R. Begum Dina, «Mapping the recent advancements in bast fiber reinforced biocomposites: A review on fiber modifications, mechanical properties, and their applications», *Results Mater.*, vol. 20, p. 100448, dic. 2023, doi: 10.1016/j.rinma.2023.100448.
- [10] Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, y Wendelin J. Wright, *The Science and Engineering of Materials*, 6ta ed. USA, 2011.
- [11] Y. Wang, Y. Weng, y L. Wang, «Characterization of interfacial compatibility of polylactic acid and bamboo flour (PLA/BF) in biocomposites», *Polym. Test.*, vol. 36, pp. 119-125, jun. 2014, doi: 10.1016/j.polymertesting.2014.04.001.
- [12] A. H. Jamadi, N. Razali, M. Petru, M. M. Taha, N. Muhammad, y R. A. Ilyas, «Effect of Chemically Treated Kenaf Fibre on Mechanical and Thermal Properties of PLA Composites Prepared through Fused Deposition Modeling (FDM)», *Polymers*, vol. 13, n.º 19, p. 3299, sep. 2021, doi: 10.3390/polym13193299.
- [13] A. Gallos, O. Lannoy, S. Bellayer, G. Fontaine, S. Bourbigot, y F. Allais, «Fire testing and mechanical properties of neat and elastomeric polylactic acid composites reinforced with raw and enzymatically treated hemp fibers», *Green Chem. Lett. Rev.*, vol. 16, n.º 1, p. 2164472, ene. 2023, doi: 10.1080/17518253.2022.2164472.
- [14] A. Pappu, K. L. Pickering, y V. K. Thakur, «Manufacturing and characterization of sustainable hybrid composites using sisal and hemp fibres as reinforcement of poly (lactic acid) via injection moulding», *Ind. Crops Prod.*, vol. 137, pp. 260-269, oct. 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.05.040.
- [15] A. Rahman, J. Fehrenbach, C. Ulven, S. Simsek, y K. Hossain, «Utilization of wheat-bran cellulosic fibers as reinforcement in bio-based polypropylene composite», *Ind. Crops Prod.*, vol. 172, p. 114028, nov. 2021, doi: 10.1016/j.indcrop.2021.114028.
- [16] I. S. M. A. Tawakkal, R. A. Talib, K. Abdan, y C. N. Ling, «MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF KENAF-DERIVED CELLULOSE (KDC)-FILLED POLYLACTIC ACID (PLA) COMPOSITES», *BioResources*, vol. 7, n.º 2, pp. 1643-1655, feb. 2012, doi: 10.15376/biores.7.2.1643-1655.