

**Desarrollo y caracterización física de
materiales biodegradables a base de bagazo
de yuca (*Manihot esculenta*) por inyección
termoplástica**

Bolivar Daniel Arias Peralta

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Honduras

Noviembre, 2019

ZAMORANO
CARRERA DE AGROINDUSTRIA ALIMENTARIA

Desarrollo y caracterización física de materiales biodegradables a base de bagazo de yuca (*Manihot esculenta*) por inyección termoplástica

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Agroindustria Alimentaria en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Bolivar Daniel Arias Peralta

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2019

Desarrollo y caracterización física de materiales biodegradables a base de bagazo de yuca (*Manihot esculenta*) por inyección termoplástica

Bolivar Daniel Arias Peralta

Resumen. El impacto ambiental causado por el incremento en el uso de plásticos ha despertado la necesidad de encontrar sustitutos que sean biodegradables. El objetivo de este trabajo fue desarrollar y caracterizar materiales biodegradables elaborados a partir de una composición de bagazo de yuca, glicerol y biopolímeros como lo son el Poli Butilen Adipato-co-Tereftalato (PBAT), Poli Ácido Láctico (PLA) y poli vinyl alcohol (PVA), mediante la técnica de inyección termoplástica. Para este estudio se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA). Primero se elaboraron tres formulaciones por cada biopolímero las cuales tuvieron una composición porcentual de 40:42:18, 30:49:21, 20:56:24 (Biopolímero/Bagazo/Glicerol), respectivamente. Posteriormente fueron llevadas a sus fases como pellets utilizando como referencia las temperaturas en el extrusor y mini inyectora. Se realizaron análisis físicos de color, densidad, pérdida de masa en agua y propiedades mecánicas de fuerza máxima (N), tensión máxima a ruptura (MPa), deformación específica (%) y módulo de elasticidad (MPa). La adición del bagazo de yuca demostró ser compatible con los bioplásticos PBAT y PLA, sin embargo, se encontró incompatibilidad con el PVA al momento de ser inyectado por su punto de fusión. Se encontraron diferencias significativas en cuanto a sus propiedades mecánicas y físicas. En pérdida de masa en agua y deformación específica. Los tratamientos PLA30 y PLA40 obtuvieron mejores resultados en la mayoría de los análisis realizados ($P < 0.05$). Se desarrollaron seis de los nueve termoplásticos, estableciendo así al tratamiento con poli ácido láctico al 30%.

Palabras clave: Bioplástico, biopolímeros, compatibilidad, propiedades físicas.

Abstract. The environmental impact caused by the increased use of plastics has awakened the need to find substitutes that are biodegradable. The objective of this work was to develop and characterize biodegradable materials made from a composition of cassava bagasse, glycerol and biopolymers such as Poly Butilen Adipato-co-Terephthalate (PBAT), Lactic Poly Acid (PLA) and poly vinyl alcohol (PVA), using the thermoplastic injection technique. A Completely Random Design (CRD) was used for this study. Three formulations were first produced for each biopolymer, which had a percentage composition of 40:42:18, 30:49:21, 20:56:24 (Biopolymer/Bagasse/Glycerol), respectively. They were then taken to their phases as pellets using as a reference the temperatures in the extruder and mini injector. Physical analyses of color, density, loss of water mass and mechanical properties of maximum force (N), maximum stress to rupture (MPa), specific deformation (%) were performed and elasticity module (MPa). The addition of cassava bagasse proved to be compatible with PBAT and PLA bioplastics, however, incompatibility with PVA was found when injected, due to its melting point. Significant differences were found in terms of their mechanical and physical properties. In water mass loss and specific deformation, PLA 30 and PLA 40 treatments performed better in most analyses ($P < 0.05$). Six of the nine thermoplastics were developed, thus establishing 30% of the treatment with lactic acid.

Keywords: Bioplastic, biopolymers, compatibility, physical properties.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	7
4. CONCLUSIONES.....	15
5. RECOMENDACIONES	16
6. LITERATURA CITADA.....	17
7. ANEXOS.....	20

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Equipo, marca y modelo utilizado para la realización del estudio.	3
2. Composición de las formulaciones en base a 1 kg.	4
3. Temperaturas utilizadas para cada mezcla según su ficha técnica.	5
4. Resultados del análisis de color entre tratamientos de Poli Butilén Adelpato Cotereftalato y Poliácido Láctico con bagazo de yuca y glicerol.	8
5. Resultados del análisis de densidad entre tratamientos de Poli Butilén Adelpato Cotereftalato y Poliácido Láctico con bagazo de yuca y glicerol.	9
6. Resultados del análisis de pérdida de masa en agua entre tratamientos con las mezclas poliméricas de Poli Butilén Adelpato Cotereftalato y Poliácido Láctico con bagazo de yuca y glicerol.	10
7. Resultados del análisis de fuerza máxima (N) y deformación específica (%) entre tratamientos con las mezclas poliméricas de Poli Butilén Adelpato Cotereftalato y Poliácido Láctico con bagazo de yuca y glicerol.	11
8. Resultados del análisis de Tensión (MPa) y Módulo de elasticidad (MPa) entre tratamientos de Poli Butilén Adelpato Cotereftalato y Poli Ácido Láctico con bagazo de yuca y glicerol.	12
9. Resumen de resultados más altos obtenidos en análisis físicos y mecánicos de los tratamientos con PoliÁcido Láctico al 30, 40% y PoliButilen Adelpato Cotereftalato al 20%.	12
Figuras	Página
1. Tratamientos con Poli Ácido Láctico y Polibutilen Adelpato Cotereftalato.	7
2. Comparación de medias de pérdida de masa en agua, módulo de elasticidad y fuerza máxima entre tratamientos con poliácido láctico al 30 y 40%.	13
3. Comparación de medias de deformación específica, tensión y densidad entre tratamientos con poli ácido láctico al 30 y 40%.	14

Anexos	Página
1. Extrusor horizontal monorroscas piloto modelo “EL-25” (BGM, Brasil).....	20
2. Mini-inyectora piloto modelo “AX16I” (AX-Plásticos, Brasil).....	20
3. Influencia de polímero en los análisis de color y elasticidad.	21
4. Influencia de las concentraciones en los análisis de densidad, fuerza máxima y tensión.....	21
5. Influencia entre las concentraciones y los polímeros de pérdida de masa en agua y deformación.	21
6. Comparación de medias entre tratamientos con poli ácido láctico al 30 y 40%.....	21
7. Comparación de costos de poli ácido láctico al 100, 30 y 40%.	22

1. INTRODUCCIÓN

El plástico, a pesar de su amplia utilidad es el principal responsable de la mayor producción de residuos sólidos en el mundo. Se estima que para el año 2020 existirá una producción 900% mayor en comparación con 1980 (Greenpeace 2017). Debido al uso excesivo de los productos plásticos, se han comenzado campañas para prohibir su uso, siendo Chile el primer país latinoamericano en establecer una ley que prohíbe a los comercios la entrega de bolsas plásticas (Teletrece 2018).

Desde el año 1960 en el cual se poseía un 1% de residuos sólidos municipales, aumentó hasta un 10% a mediados del 2005 en países de capacidades adquisitivas medias y altas (Geyer *et al.* 2017). Este residuo termina en los océanos, atentando contra la vida marina que, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, matan alrededor de un millón de aves marinas y 100,000 mamíferos marinos por año (Noticias ONU 2018). Como consecuencia al prolongado tiempo estimado para la degradación de los materiales sintéticos a base del petróleo, se ha pensado en alternativas como los empaques biodegradables o comestibles (Reyes 2013).

Los materiales biodegradables son capaces de descomponerse por acción de microorganismos como bacterias, hongos y algas a partir de factores medioambientales como calor, luz y humedad (Zanela 2016). Estos pueden ser naturales o sintéticos como el Poli Vinil Alcohol (PVA) y el Poli Butilen Adepato co-Tereftalato (PBAT); estos dos derivados del petróleo son considerados biodegradables debido a las modificaciones realizadas en las cadenas de carbono (Bordes *et al.* 2009). Las principales aplicaciones de estos materiales biodegradables están orientadas hacia la producción de empaques, suturas, mini-implantes bio-absorbibles, ingeniería de tejidos y liberación controlada de fármacos (Serna *et al.* 2003).

El Poli Ácido Láctico (PLA) es obtenido mediante al ácido láctico por fermentación de fuentes renovables. “La polimerización del ácido láctico se puede controlar para obtener diferentes pesos moleculares y diferentes grados de cristalinidad mediante una selección apropiada de los parámetros de reacción como temperatura, presión, tiempo de reacción y selección del catalizador” (Zuluaga 2013). No obstante, estos materiales biodegradables tienen un elevado costo en comparación a los plásticos convencionales y ciertas diferencias en características que deben ser mejoradas para ser competitivas (Bordes *et al.* 2009).

La yuca o mandioca es muy utilizada en la industria debido a que se extrae el almidón que posee, dejando un residuo llamado bagazo, afrecho o “typyraty”, el cual es destinado para la alimentación animal (Aristizábal y Sánchez 2007).

En los últimos años se ha encontrado potencial de este bagazo para la alimentación de ganado y producción de bio-polímeros, permitiendo así una reducción de polímeros derivados de petróleo (Terra 2013).

La inyección termoplástica se lleva a cabo mediante la aplicación de sistemas de presión al polímero en estado líquido dentro del molde; posteriormente es enfriado para endurecer el “stand” de plástico con las características de contorno modelo, dando la forma deseada a la pieza de trabajo (MORGEL 2016). Si se aumenta la temperatura de fusión, el material tiende a tornarse más líquido, por lo que no permitiría una expansión homogénea en el molde, causando falla en la elaboración del producto plástico (Medina 2016).

El proceso consta de etapas diferentes que abarcan importantes funciones. En primer lugar, el cierre del molde, para lo cual, no tienen que existir aberturas por donde el material se pueda filtrar, evitando pérdidas de este. Después se introduce el material por el cual va a pasar por tres zonas de calentamiento, la primera como está expuesta con el compartimiento no sube tanto como las otras dos, las cuales se encargan de fundir el material con la ayuda del tornillo sin fin. Posterior a eso se realiza una prueba de cómo el material se está fundiendo, para después conectarlo con el molde e inyectarlo, dejar el material en un tiempo de enfriado para finalizar con la separación del material con el molde (ASCAM 2003).

En este estudio se buscó la caracterización de las propiedades físicas de materiales biodegradables con diferentes niveles en sus formulaciones. Por lo tanto, se busca relacionarlas con propósitos aptos para la capacidad de estos, planteando los objetivos presentados a continuación:

- Desarrollar y caracterizar físicamente nueve termoplásticos biodegradables a base de bagazo de yuca.
- Determinar la mejor formulación de acuerdo con sus características físicas y mecánica

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio.

El estudio fue realizado en los meses de enero a abril en el laboratorio de tecnología (LDT) de la Universidad Estatal de Londrina, localizada en la ciudad de Londrina en el estado de Paraná, Brasil.

Descripción del estudio.

El estudio fue elaborado en dos fases, la primera fue la elaboración de los materiales, la segunda consistió en la caracterización de los cuerpos de prueba mediante los análisis de propiedades físicas y mecánicas.

Materia prima.

Los tipos de polímeros biodegradables como el Poli Ácido Láctico (PLA) “INGEO 3251D”, se adquirieron de “Zhejiang Hisun Biomaterials Co. (China)”, mientras que los materiales como Poli Vinil Alcohol (PVA) y Poli (Butilen Adipato-co-Tereftalato) (PBAT) “Ecoflex® F Blend C1200”, fueron obtenidos por otros proveedores. El glicerol, se obtuvo de “Dinâmica Ltda. (Brasil)” y el bagazo de yuca, fue proveído por “General Mills Brasil Alimentos Ltda.–Unidade Paranavaí/PR (Brasil)” el cual viene listo para usar.

En el cuadro 1 se pueden encontrar los equipos utilizados en el estudio, con sus respectivas modelos y marcas.

Cuadro 1. Equipo, marca y modelo utilizado para la realización del estudio.

Equipo	Marca/Modelo
Desecadora de vidrio de laboratorio	1648-21 (Pyrex, Brasil)
Balanza analítica	Mark M214A (BEL, Brasil)
Calibrador digital	Starret 799A-6/150 (Starret, Brasil)
Estufa con circulación y renovación de aire	TE-394/3 (Tecnal, Brasil)
Molino de rotor	MA-090 (Marconi, Brasil)
Extrusor horizontal mono-rosca piloto	EL-25 (BGM, Brasil)
Mini-inyectora	AX16I (AX-Plásticos, Brasil)
Máquina Universal de Ensayos	EMIC 2000 (Instron, Brasil)
Colorímetro	Minolta CR 400

Fase I. Elaboración de materiales.

Los procedimientos en las formulaciones son aproximados a la similitud, sin embargo, cuando se trabajó con PVA y PLA, estas tuvieron ciertos desvíos en lo que respecta a la homogenización y terminado de su preparación, la cual se explica de acuerdo con el polímero.

En el LDT (Laboratorio de Tecnología) de la Universidad Estatal de Londrina se prepararon las muestras manualmente, debido a que el agregado de cada material tiene un orden para ser mezclado. Primero, se pesó el glicerol, el cual se colocó en el fondo de la bandeja para crear una leve capa que entrará en contacto con el bio-polímero para que este absorba el plastificante. Por último, se colocó el bagazo de yuca. El mezclado se realizó de manera manual. El pesado de los materiales se detalla en el cuadro 2.

Cuadro 2. Composición de las formulaciones en base a 1 kg.

Tratamientos	Polímero (kg)	Bagazo (kg)	Glicerol(kg)
PBAT20 ¹	0.20	0.56	0.24
PBAT30 ¹	0.30	0.49	0.21
PBAT40 ¹	0.40	0.42	0.18
PLA20 ²	0.20	0.56	0.24
PLA30 ²	0.30	0.49	0.21
PLA40 ²	0.40	0.42	0.18
PVA20 ³	0.20	0.56	0.24
PVA30 ³	0.30	0.49	0.21
PVA40 ³	0.40	0.42	0.18

¹Poli Butilen Adipato-co-Tereftalato (PBAT). ²Poli Ácido Láctico (PLA). ³Poli vinil alcohol (PVA).

Estudios previos fueron utilizados para la manufactura de los materiales. Para las formulaciones con PBAT, se realizó el mezclado con el orden anteriormente mencionado y llevado al extrusor horizontal monorroscas piloto “EL-25” (BGM, Brasil). Para las formulaciones con PVA se realizó un secado a 85 °C por 2 horas en la estufa con circulación y renovación de aire “TE-394/3” (TECNAL, Brasil); previo a la extrusión del material debido a la higroscopicidad del polímero en sí, para que el glicerol pueda entrar en contacto con el material. El PLA debe llevar un proceso de secado a 60 °C por 1 hora previo a la inyección. La temperatura a la que sea sometido la mezcla dependió de la indicación de la ficha técnica de cada bio-plástico (Cuadro 3).

Cuadro 3. Temperaturas utilizadas para cada mezcla según su ficha técnica.

Polímeros	Temperatura de celdas (°C)			
	1	2	3	4
PBAT ¹ 20/30/40	90	120	120	120
PLA ² 20/30/40	90	165	175	165
PVA ³ 20/30/40	90	175	175	140

¹Poli (butilen adipato-co-tereftalato). ²Poli Ácido Láctico. ³Poli vinil alcohol.

Posterior a la extrusión y demás procesos necesarios para la obtención de cada material, se procedió a pelletizar cada mezcla. Después se continuó con la fase de inyección del material donde se realizaron pruebas preliminares con cada material para la calibración de la mini-inyectora.

Fase II. Análisis físicos y mecánicos.

Color. Se utilizó un colorímetro “Minolta CR 400” del cual se obtuvieron coordenadas de color CIELAB (L*, a*, y b*) (Konica Minolta 2013) utilizando como referencia el iluminante D65 con observador de 10° que proporcionó el dispositivo. Se realizaron 10 repeticiones por tratamiento. Dónde:

L*= 0 (negro) hasta 100 (blanco).

a*= -60 (verde) hasta +60 (rojo).

b*= -60 (azul) hasta +60 (amarillo).

Debido a la obtención de resultados negativos en las escalas de a* y b*, se realizó un ajuste aritmético para evitar la alta variación en el análisis estadístico. Pasando de -60 hasta +60 a una escala de 0 hasta 120 solamente usado para el análisis estadístico, para no afectar la lectura de color.

Densidad. Se realizó el análisis mediante la relación existente entre la masa y el volumen del cuerpo de prueba, expresada en g/cm³, (Oliveira 2007). Se realizaron 10 repeticiones por tratamiento. Cada cuerpo de prueba fue pesado en una balanza analítica “Mark M214A” (BEL, Brasil) y el volumen fue obtenido por las dimensiones (largo por ancho por grosor, L×A×G).

Pérdida de masa en agua. Las muestras de cada formulación fueron colocadas en un desecador con cloruro de calcio (CaCl_2) a 25 °C por un mínimo de días días previo al análisis. Se usaron 10 repeticiones por formulación. Posterior al desecado, las muestras fueron pesadas en una balanza analítica “Mark M214A” en gramos y se consideró como la masa inicial en base seca (M_{BS}); después fueron inmersas en agua destilada manteniendo la proporción de 30:1 (agua: muestra) a 25 °C por 48 horas. Las muestras fueron removidas y colocadas para secar en la estufa a 105 °C por 4 horas para determinar la masa del material después del tratamiento conocida como masa final en base seca (M_{FBS}) (Passos 2014). El análisis de pérdida de masa en agua (PMA) fue calculado de acuerdo a la ecuación 1.

$$\% \text{ PMA} = \frac{(M_{FBS} - M_{BS})}{M_{FBS}} \times 100 \quad [1]$$

Donde:

PMA: Pérdida De Masa En Agua

M_{FBS} : Masa Final De La Muestra Base Seca

M_{BS} : Masa Inicial De La Muestra Base Seca.

Propiedades mecánicas. Los análisis de las propiedades mecánicas se realizaron usando el equipo “EMIC” (Máquina Universal de Ensayos – Instron, Brasil) siguiendo la norma de ASTM D638-03 (Sociedad Americana Para Pruebas y Materiales) con algunas modificaciones. Se determinó fuerza máxima (N), deformación específica (%), tensión o resistencia máxima a tracción de ruptura (MPa), módulo de elasticidad (MPa), a través de tracción. Previo para dicho análisis, las muestras fueron sometidas a desecadores con humedad relativa del 53% a 25 °C por siete días. La carga de la célula fue de 50 kgf, con un distanciamiento inicial de las garras de 40 mm y una velocidad de tracción de 50 mm/min. Se realizaron 10 repeticiones por tratamiento.

Análisis estadístico.

Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA). Se realizó análisis de varianza ANDEVA con un nivel significancia de $P < 0.05$ con una separación de medias por la prueba Tukey, mediante el uso del programa “Statistical Analysis System” (SAS Versión 9.4®).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fase I. Elaboración de materiales.

Los tratamientos con PVA no fueron compatibles con el bagazo de yuca ni el glicerol. Por lo tanto, se omitieron estudios posteriores sobre este material, careciendo de cuadros de resultados sobre sus análisis.

El PVA sin la adición de plastificante posee un punto de fusión cercano a su temperatura de degradación (Rahman *et al.* 2010). Los tratamientos con PVA fueron incapaces de elaborarse debido a la baja concentración de glicerol usado. De acuerdo a (Zanela 2016) lo recomendado a utilizar de plastificante es una proporción igual o mayor a 35%. Este límite mínimo de concentración provee lubricación interna entre las cadenas del polímero para reducir la rigidez de este, afectando en la temperatura de fusión.

Fase II. Análisis físicos y mecánicos.

Color. La relación del uso que se le dé al producto dependerá del color, atributo importante en la determinación del propósito principal del material (Rocha 2009).

En el cuadro 4 se presenta la separación de medias ordenadas de acuerdo con el orden de la primera separación de medias a presentar, es decir con la escala L*.

De acuerdo con los datos observados en el cuadro 4, se puede observar una baja luminosidad en los tratamientos con una tendencia por poseer más características rojizas y amarillas (Figura 1).



Figura 1 Tratamientos con Poli Ácido Láctico y Polibutilen Adelpato Cotereftalato.

A). Tratamientos con PLA (poli ácido láctico).

B). Tratamientos con PBAT (polibutilen adelpato cotereftalato).

Cuadro 4. Resultados del análisis de color entre tratamientos de Poli Butilén Adelpato Cotereftalato y Poliácido Láctico con bagazo de yuca y glicerol.

TRT ^{&}	Luminosidad (L*) ± DE ¹	Rojo-Verde (a*) ± DE ¹	Amarillo-Azul (b*) ± DE ¹
PBAT20 ^x	42.22 ± 1.39 ^A	4.844 ± 0.21 ^A	8.01 ± 1.55 ^A
PBAT30 ^x	38.75 ± 0.73 ^B	4.387 ± 0.56 ^A	6.41 ± 0.56 ^B
PBAT40 ^x	35.77 ± 1.20 ^C	3.643 ± 0.37 ^B	4.08 ± 0.73 ^C
PLA20 ^y	31.87 ± 3.80 ^D	2.728 ± 0.92 ^C	1.98 ± 2.05 ^D
PLA30 ^y	29.99 ± 2.67 ^E	2.289 ± 0.43 ^C	0.82 ± 0.74 ^E
PLA40 ^y	28.50 ± 0.58 ^E	2.534 ± 0.53 ^C	0.89 ± 0.77 ^{DE}
CV ^T (%)	6.01	0.87	1.91
R ²	88.29	80.64	87.45

(A-E) Medias con letras mayúsculas diferentes en la misma columna indican diferencias entre tratamientos ($P < 0.05$). ^xPoli Butilén Adipato-co-Tereftalato (PBAT). ^yPoli Ácido Láctico (PLA). [&]Tratamientos. ^TCoefficiente de variación. ¹Desviación Estándar (DE).

Los rangos utilizados para L* son de 0 a 100, a diferencia a de a* y b* que utilizan un rango más amplio de -60 a +60 lo que ocasiona una mayor variación. Se realizó un ajuste matemático a escala de -60 a +60 a una escala de 0 a 120 para eliminar los números negativos de los resultados y que esto no afecte a la variación del análisis estadístico (Cereda M *et al.* 2001; Ford 2015).

Densidad. En el cuadro 5 se puede observar que los tratamientos con PLA no sufrieron amplios cambios en lo que respecta a sus densidades de acuerdo con sus fichas técnicas. Según la ficha técnica del PLA “INGEO 3251D” la densidad del PLA es de 1.25 g/cm³, mientras que la del PBAT “Ecoflex® F Blend C1200” tiene un rango de 0.8 a 1.4 g/cm³ (Ford 2015; BASF SE 2016).

Se entiende que, entre mayor densidad del polímero con el material orgánico, mejor es la compatibilidad entre ellos (Información proporcionada por Yamashita Fabio en conferencia en la Universidad Estatal de Londrina).

Cuadro 5. Resultados del análisis de densidad entre tratamientos de Poli Butilén Adelpato Cotereftalato y Poliácido Láctico con bagazo de yuca y glicerol

Tratamientos	Densidad (g/cm ³) ± DE ¹
PLA30 ^y	1.256 ± 0.02 ^A
PBAT20 ^x	1.254 ± 0.02 ^A
PLA40 ^y	1.246 ± 0.01 ^{AB}
PBAT30 ^x	1.243 ± 0.01 ^{AB}
PLA20 ^y	1.234 ± 0.02 ^B
PBAT40 ^x	1.193 ± 0.02 ^C
	CV^T (%)
	1.52
	R²
	65.63

^(A-C) Medias con letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre tratamientos ($P < 0.05$). ^xPoli Butilén Adipato-co-Tereftalato (PBAT). ^yPoli Ácido Láctico (PLA). ^TCoeficiente de variación. ¹Desviación Estándar (DE).

Pérdida de masa en agua. En el cuadro 6 se presentan los datos de los tratamientos expuestos al agua. En este se puede observar que los tratamientos con PLA poseen afinidad a perder mayor cantidad de masa cuando están expuestos a esta, mientras que los tratamientos que contienen PBAT (el cual es insoluble al agua) al ser mezclado con bagazo de yuca y glicerol, tuvo una reducción de agua menor que el PLA en masa. Se pudo observar que entre menor sea la concentración de polímero mayor será la pérdida de agua. Debido a que se pierde la compatibilidad del polímero (Passos 2014).

El almidón de yuca residual en el bagazo hace a los tratamientos propensos a una biodescomposición rápida debido a su porcentaje de solubilidad (Cereda M *et al.* 2001). Por otra parte, el tratamiento con PBAT al 30%, en comparación con PLA al 40%, presentó mayores valores a la pérdida de masa debido a que el grado de solubilidad con agua es menor de acuerdo con su ficha técnica (BASF SE 2016).

Cuadro 6. Resultados del análisis de pérdida de masa en agua entre tratamientos con las mezclas poliméricas de Poli Butilén Adelpato Cotereftalato y Poliácido Láctico con bagazo de yuca y glicerol

Tratamientos	Pérdida de Masa en Agua (%) \pm DE ¹
PLA30 ^y	95.34 \pm 42.50 ^A
PBAT20 ^x	58.97 \pm 24.34 ^B
PLA40 ^y	41.90 \pm 7.66 ^{BC}
PBAT30 ^x	33.68 \pm 7.50 ^C
PBAT40 ^x	25.98 \pm 0.68 ^C
CV^T (%)	41.86
R²	68.82

(A-D) Medias con letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre tratamientos ($P < 0.05$). ^xPoli Butilén Adipato-co-Tereftalato (PBAT). ^yPoli Ácido Láctico (PLA). ^TCoeficiente de variación. ¹Desviación Estándar (DE).

El material PLA20 no se pudo representar en el cuadro debido a su bajo contenido de polímero y alto contenido de bagazo, siendo el material con mayor afinidad a degradación natural. Se obtuvo un coeficiente de variación alto debido a la alta solubilidad de los tratamientos con menor cantidad de polímero en su composición. Se sabe que entre mayor contenido de PBAT y PLA poseen, los materiales serán más compactos y menos soluble en agua (Santos *et al.* 2004).

Propiedades mecánicas.

Los cuadros presentados a continuación, aquellos con más de una columna de resultados tendrán la separación de medias ordenadas de acuerdo al orden de la primera separación de medias a presentar.

Análisis de fuerza máxima y deformación específica. La fuerza máxima o de compresión es de importancia para un material el cual va a tener que soportar peso, como el concreto. Mientras que la deformación específica expresa la capacidad del material a sufrir alteraciones reversibles en su estructura sin quebrarse. Basado en el cuadro 7, los tratamientos con mayor contenido de polímero (PLA40, PLA30, PBAT30 y PBAT40), tendrán mayor resistencia a fuerza máxima, debido a las características de compactación que poseen. Los valores de fuerza máxima tienden a disminuir por la falta de fibras, debilitando así al material biodegradable (Oliveira de Moraes 2013).

Cuadro 7. Resultados del análisis de fuerza máxima (N) y deformación específica (%) entre tratamientos con las mezclas poliméricas de Poli Butilén Adelpato Cotereftalato y Poliácido Láctico con bagazo de yuca y glicerol

TRT ^{&}	Fuerza Máxima (N) ± DE ¹	TRT ^{&}	Deformación Específica (%) ± DE ¹
PLA40 ^y	79.86 ± 11.18 ^A	PLA40 ^y	6.18 ± 0.52 ^A
PLA30 ^y	74.42 ± 6.55 ^A	PLA30 ^y	6.47 ± 0.44 ^A
PBAT30 ^x	63.03 ± 4.23 ^B	PLA20 ^y	9.96 ± 1.50 ^B
PBAT40 ^x	62.29 ± 3.87 ^B	PBAT30 ^x	10.84 ± 0.76 ^C
PBAT20 ^x	61.38 ± 7.57 ^B	PBAT40 ^x	11.00 ± 0.37 ^{CD}
PLA20 ^y	46.81 ± 9.93 ^C	PBAT20 ^x	11.80 ± 1.37 ^D
CV^T (%)	13.15		10.00
R²	69.47		88.86

^(A-D) Medias con letras mayúsculas diferentes en la misma columna indican diferencias entre tratamientos ($P < 0.05$). ^xPoli Butilén Adipato-co-Tereftalato (PBAT). ^yPoli Ácido Láctico (PLA). [&]Tratamientos. ^TCoeficiente de variación. ¹Desviación Estándar (DE).

El cuadro 7 muestra la deformación específica de los tratamientos. Se expone que los tratamientos con PLA tienen una mayor afinidad a deformarse que el PBAT ($P < 0.05$), siendo estos últimos más resistentes a la deformación (Correa *et al.* 2016; Pinheiro *et al.* 2017). De acuerdo con la ficha técnica del PLA “INGEO 3251D” sus valores normales de deformación específica corresponden a 3.5%, lo cual permite llegar a la conclusión de que el bagazo y el glicerol afectan su composición aumentando de un 6.18 a un 9.96% su deformación (Ford 2015).

Análisis de tensión y elongación. Se puede observar en el cuadro 8 que los tratamientos con mayor cantidad de polímeros (PLA30, PLA40, PBAT40, PBAT30) son los que presentan mayor resistencia a tensión debido a su bajo contenido de bagazo de yuca y los polímeros. Estos datos son similares a los de Zanela (2016), donde el incremento de rigidez se debe al almidón y a los polímeros. Por otro lado, se puede observar que los tratamientos PBAT20 y PLA20 demostraron una menor resistencia a la tensión, dando como resultado que las características de tensión de los polímeros se pierden debajo del 30% de concentración (Hongdilokkul *et al.* 2015).

Cuadro 8. Resultados del análisis de Tensión (MPa) y Módulo de elasticidad (MPa) entre tratamientos de Poli Butilén Adelpato Cotereftalato y Poli Ácido Láctico con bagazo de yuca y glicerol

TRT ^{&}	Tensión (MPa) ± DE ¹	TRT ^{&}	Módulo de elasticidad (MPa) ± DE ¹
PLA30 ^y	3.33 ± 0.31 ^A	PLA30 ^y	82.75 ± 53.27 ^A
PLA40 ^y	3.24 ± 0.64 ^A	PLA40 ^y	82.37 ± 69.62 ^A
PBAT40 ^x	2.88 ± 0.16 ^B	PLA20 ^y	32.62 ± 20.99 ^B
PBAT30 ^x	2.63 ± 0.19 ^{BC}	PBAT40 ^x	27.09 ± 9.30 ^B
PBAT20 ^x	2.52 ± 0.26 ^C	PBAT20 ^x	23.02 ± 9.44 ^B
PLA20 ^y	1.87 ± 0.47 ^D	PBAT30 ^x	22.56 ± 7.35 ^B
CV ^T (%)	13.30		82.37
R ²	73.65		46.96

(A-D) Medias con letras mayúsculas diferentes en la misma columna indican diferencias entre tratamientos ($P < 0.05$). ^xPoli Butilén Adipato-co-Tereftalato (PBAT). ^yPoli Ácido Láctico (PLA). [&]Tratamientos. ^TCoefficiente de variación. ¹Desviación Estándar (DE).

Los resultados obtenidos en el cuadro 8 del módulo de elasticidad nos permiten determinar que los tratamientos con PLA presentan una afinidad a elongarse mayor a la de los tratamientos con PBAT. Los resultados obtenidos fueron similares a los de (Pinheiro *et al.* 2017), donde el tratamiento sin nano cristales presentó 55.7 MPa, siendo mayores a los tratamientos con bagazo de yuca (PBAT40, PBAT20 y PBAT30), de los cuales se obtuvieron valores menores a 30 MPa. Basándonos en esto se puede concluir que el bagazo de yuca reduce la elasticidad del material. De igual manera según (Rocha 2009), a mayor aumento de glicerol, causa una reducción del módulo de elasticidad.

En el cuadro 9 se puede observar un resumen de los resultados más altos obtenidos de todos los análisis con el motivo de realizar un conglomerado del mejor tratamiento en base a sus resultados.

Cuadro 9. Resumen de resultados más altos obtenidos en análisis físicos y mecánicos de los tratamientos con PoliÁcido Láctico al 30%, 40% y PoliButilén Adelpato Cotereftalato al 20%

Parámetros	TRT ^{&}	Medias
Pérdida de masa en agua (%)	PLA30 ^y	95.34 ± 42.50
Módulo de elasticidad (MPa)	PLA30 ^y	82.75 ± 53.27
Tensión (MPa)	PLA30 ^y	3.33 ± 0.31
Densidad (g/cm ³)	PLA30 ^y	1.25 ± 0.02
Deformación específica (%)	PBAT20 ^x	11.80 ± 1.37
Fuerza máxima (N)	PLA40 ^y	79.86 ± 11.18

[&]Tratamientos. ^xPoli Butilén Adipato-co-Tereftalato (PBAT). ^yPoli Ácido Láctico (PLA).

En la mayoría de los resultados se observó que los tratamientos con PLA obtuvieron diferentes y mejores resultados en comparación a los tratamientos con PBAT ($P < 0.05$). En su mayoría de resultados, el tratamiento PLA 30 fue aquel con mejor desempeño mostrado; Siendo este un material que debido a su alta densidad significa una mayor compatibilidad con el bagazo de yuca, pero con un costo elevado (Información proporcionada por Yamashita Fabio en conferencia en la Universidad Estatal de Londrina); adecuado para soportar cantidades de estrés altos en lo que respecta a tensión y módulo de elasticidad. En lo que respecta a su capacidad de perder masa en interacción con el agua, lo convierte en lo más apropiado para el término “biodegradable”. En lo que respecta a su uso, debido a su alta solubilidad en agua, se sugiere para el uso de utensilios desechables como vasos, cucharas, etc.

No obstante, el segundo mejor tratamiento PLA 40, ofrece una mayor viabilidad en cuanto a duración y costos. La Figura 1; se puede observar que el tratamiento con PLA 40 tiene una mayor resistencia a la pérdida de masa en agua, permitiendo así una un mayor tiempo de vida anaquel.

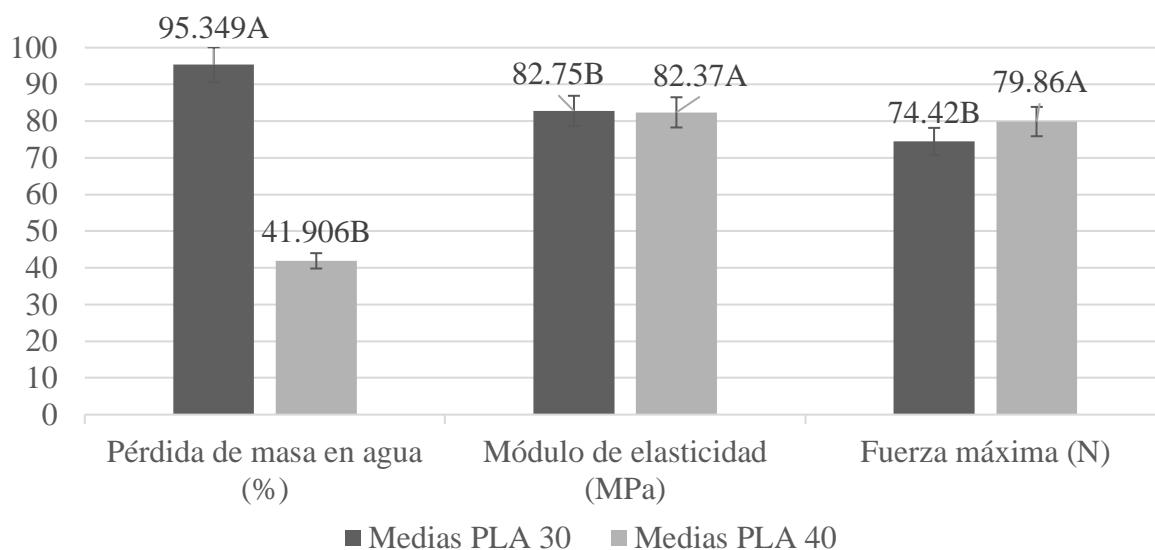


Figura 2. Comparación de medias de pérdida de masa en agua, módulo de elasticidad y fuerza máxima entre tratamientos con poliláctico al 30 y 40%.

^(A-B) Medias con letras mayúsculas diferentes en las diferentes columnas indican diferencias entre tratamientos ($P < 0.05$).

En lo que respecta a densidad, la figura 2 nos demuestra que en comparación con el tratamiento PLA 30, posee una menor densidad, lo que quiere decir que se necesitará menor cantidad de material para poder producirse.

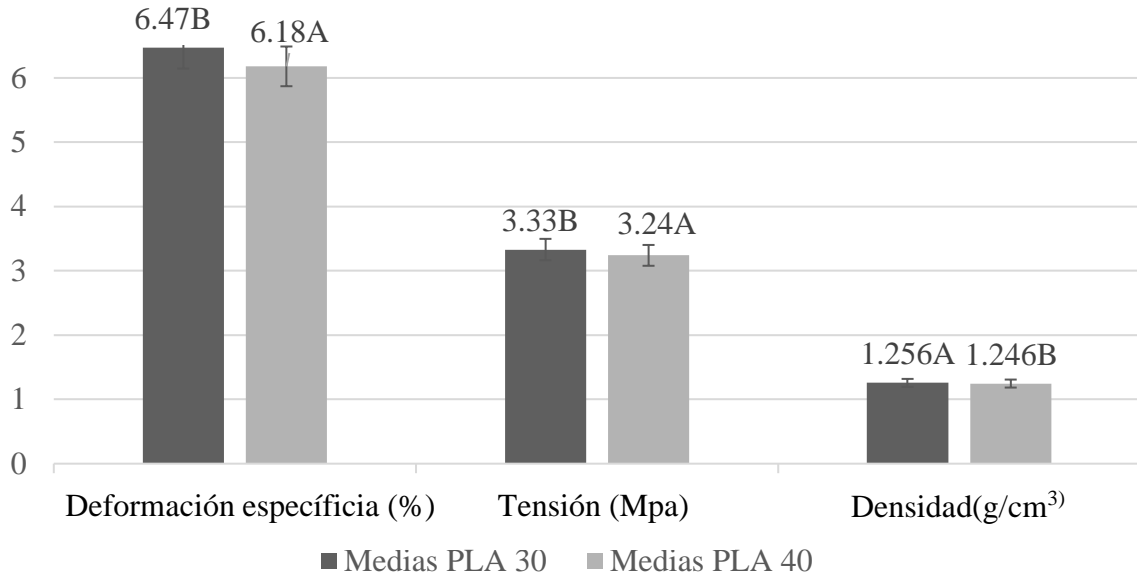


Figura 3. Comparación de medias de deformación específica, tensión y densidad entre tratamientos con poli ácido láctico al 30 y 40%.

^(A-B) Medias con letras mayúsculas diferentes en las diferentes columnas indican diferencias entre tratamientos ($P < 0.05$).

4. CONCLUSIONES

- Se desarrolló y caracterizó seis de los nueve termoplásticos estimados para este estudio a base de bagazo de yuca.
- Se estableció el tratamiento con poli ácido láctico al 30% de concentración como el mejor tratamiento. El tratamiento con poli ácido láctico al 40% se estableció como segundo mejor debido a la durabilidad que este posee en la pérdida de masa en agua en comparación con el tratamiento con poli ácido láctico al 30%.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar futuros estudios de tiempo de bio-degradación, realizar análisis químicos, sensoriales, y con moldes relacionados con los utensilios de acuerdo con sus propiedades físicas y mecánicas para un determinado uso.
- Considerar la temperatura y la humedad relativa del ambiente en futuros estudios. Así mismo, la velocidad de llenado y el porcentaje de intensidad de llenado.

6. LITERATURA CITADA

- Aristizábal J, Sánchez T. 2007. Guía Técnica Para Producción y Análisis de Almidón de Yuca. 1ª ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas; [consultado el 27 de feb. de 2019]. 153 p. <http://www.fao.org/3/a-a1028s.pdf>.
- ASCAM. 2003. La importancia de la refrigeración del molde en el proceso de inyección de material plástico | ASCAMM | Informador Técnico; [consultado el 2 de mar. de 2019]. http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/817/901.
- BASF SE. 2016. Ficha de Datos de Seguridad Ecoflex® F Blend C1200: BASF SE; [consultado el 16 de feb. de 2019]. https://www.google.com/search?q=ecoflex+basf+ficha+tecnica&rlz=1C1CHBD_esHN781HN781&oq=ecoflex+basf+ficha&aqs=chrome.1.69i57j33.6827j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8.
- Bordes P, Pollet E, Averous L. 2009. Nano-biocomposites: Biodegradable polyester/nanoclay systems. 34(2):125–155 p. doi:10.1016/j.progpolymsci.2008.10.002.
- Cereda M, Franco C, Daiuto E, Demiate I, Carvalho L, Leonel M, Sarmiento S. 2001. Propriedades gerais do amido. Universidade de São Paulo. 221 p. bdpi.usp.br.
- Correa J, Bacigalupe A, Maggi J, Eisenberg P. 2016. Biodegradable PLA/PBAT/Clay Nanocomposites: Morphological, Rheological and Thermomechanical Behavior. 4(4):258–265. doi:10.7569/JRM.2016.634117.
- Ford. 2015. Ingeo Biopolymer 3251D Technical Data Sheet; [consultado el 7 de ago. de 2019]. https://www.natureworksllc.com/~/_media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_3251D_injection-molding_pdf.pdf.
- Geyer R, Jambeck JR, Law KL. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv.* 3(7):e1700782. doi:10.1126/sciadv.1700782.
- Greenpeace. 2017. Datos sobre la producción de plásticos - ES | Greenpeace España: Principales productores de plástico. [sin lugar]: [sin editorial]; [consultado el 14 de abr. de 2019]. <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>.
- Hongdilokkul P, Keeratipinit K, Chawthai S, Hararak B, Seadan M, Suttiruengwong S. 2015. A study on properties of PLA/PBAT from blown film process. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 87:1-8 p. doi:10.1088/1757-899X/87/1/012112.

- Konica Minolta. 2013. Chroma Meter CR-400/410: Manual de Instrucciones; [consultado el 5 de abr. de 2019]. https://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction_manual/color/pdf/cr-400-410_instruction_spa.pdf. Medina. 2016. La Inyección Térmica De Plástico: Word Press; [consultado el 13 de feb. de 2019]. <https://inyecciondeplasticoblog.wordpress.com/2016/10/24/introduccion-a-la-inyeccion-termica/>.
- MORGEL. 2016. Inyección termoplástica: ¿Cómo funciona la inyección termoplástica? Brasil: Morgel Indústria de Plásticos Ltda; [consultado el 15 de mar. de 2019]. <http://www.morgel.com.br/injecao-termoplastica>.
- Noticias ONU. 2018. Salvar los océanos está en nuestras manos; [consultado el 26 de jun. de 2019]. <https://news.un.org/es/story/2018/06/1435461>.
- Oliveira C. 2007. Estudo Dos Processos De Transferência De Massa E Propriedades Mecânicas De Biofilmes De Amido De Mandioca Reforçados Com Fibras De Celulose [Tesis]. Londrina: Universidade Estadual de Londrina. 176 p; [consultado el 12 de abr. de 2019]. <http://www.bibliotecadigital.uel.br/document/?view=vtls000126500>.
- Oliveira de Moraes. 2013. Produção e caracterização de filmes de amido-glicerol-fibras de celulose elaborados por tape-casting. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. 177 p. por; [consultado el 11 de abr. de 2019]. <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/123456789/122905/1/322371.pdf>.
- Passos A. 2014. Desenvolvimento e caracterização de materiais biodegradáveis à base de farinha de aveia e poli (adipato co-tereftalato de butileno). Londrina: Universidade Estadual de Londrina. 113 p. <http://www.bibliotecadigital.uel.br/document/?view=vtls000190791>.
- Pinheiro I, Ferreira, F. V., Souza DHS, Gouveia, R. F., Lona LMF, Morales, A. R., Mei LHI. 2017. Mechanical, rheological and degradation properties of PBAT nanocomposites reinforced by functionalized cellulose nanocrystals. *European Polymer Journal*. 97:356–365. doi:10.1016/j.eurpolymj.2017.10.026.
- Rahman W, Tin Sin L, Rahmat AR, Samad AA. 2010. Thermal behaviour and interactions of cassava starch filled with glycerol plasticized polyvinyl alcohol blends. *Carbohydrate Polymers*. 81(4):805–810. doi:10.1016/j.carbpol.2010.03.052.
- Reyes G. 2013. Caracterización de dispersiones filmogénicas a base de almidón de maíz y ácido oleico en nanoemulsión con capacidad de formación de recubrimientos comestibles activos [Tesis]. México: Universidad Autónoma de Querétaro. 100 p; [consultado el 25 de jul. de 2019]. <http://ri.uaq.mx/xmlui/handle/123456789/2378?show=full&locale-attribute=en>.
- Rocha G. 2009. Obtencao e caracterizao de films biodegradáveis a partir de misturas de amido de amndioca e extrato protéico de soja. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro. 89 p; [consultado el 14 de ago. de 2019]. <https://tede.ufrj.br/jspui/bitstream/tede/412/1/2009%20-%20Geisa%20Oliveira%20Rocha.pdf>.

- Santos, Vicentini NM, Sobral, Paulo José do Amaral, Carvalho RA, Cereda MP. 2004. Influência do plastificante e umidade relativa nas propriedades mecânicas de filmes a base de fécula de mandioca. Brasil: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos. 100 p; [consultado el 13 de mar. de 2019]. <https://bdpi.usp.br/item/001417201>.
- Serna L, Rodríguez A, Albán A. 2003. Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. Colombia: Universidad del Valle. 9 p; [consultado el 12 de feb. de 2019]. <https://docplayer.es/18535783-Acido-polilactico-pla-propiedades-y-aplicaciones.html>.
- Teletrece. 2018. Prohibición de bolsas plásticas en Chile: ¿adiós al problema? Chile: Teletrece; [consultado el 4 de feb. de 2019]. <http://www.t13.cl/noticia/tendencias/medio-ambiente/prohibicion-bolsas-plasticas-chile-adios-al-problema>.
- Terra. 2013. Empresa brasileira cria plástico feito com mandioca. Brasil: Terra Brasil; [consultado el 4 de mar. de 2019]. <https://www.terra.com.br/noticias/ciencia/empresa-brasileira-cria-plastico-feito-com-mandioca,4a47433116492410VgnCLD2000000ec6eb0aRCRD.html>.
- Zanela J. 2016. Blendas Poliméricas De Amido E Poli (Vinil Álcool) – PVA: Efeitos Do Tipo De Pva, Amidos Modificados E Uso De Fibras No Desenvolvimento De Materiais Biodegradáveis. Londrina - PR: Universidade Estadual de Londrina. 206 p.
- Zuluaga F. 2013. Algunas aplicaciones del Ácido Poli-L-Láctico. Colombia: Universidad del Valle. 18 p; [consultado el 21 de jul. de 2019]. <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n142/v37n142a09.pdf>.

7. ANEXOS

Anexo 1. Extrusor horizontal monorroscas piloto modelo “EL-25” (BGM, Brasil).



Anexo 2. Mini-inyectora piloto modelo “AX16I” (AX-Plásticos, Brasil).



Anexo 3. Influencia de polímero en los análisis de color y elasticidad.

Parámetros evaluados	Probabilidad Pr > F			Módulo de Elasticidad
	L*	a*	b*	
Polímero	<0.0001 ²	<0.0001 ²	<0.0001 ²	0.0001 ²
Concentración ¹	0.0699	0.0192	0.0026	0.0526

¹Concentraciones de bagazo, glicerol y polímero juntos. ²Influencia significativa en el análisis.

Anexo 4. Influencia de las concentraciones en los análisis de densidad, fuerza máxima y tensión.

Parámetros evaluados	Probabilidad Pr > F		
	Densidad	Fuerza máxima	Tensión
Polímero	0.0029	0.0363	0.1664
Concentración ¹	<0.0001 ²	<0.0001 ²	<0.0001 ²

¹Concentraciones de bagazo, glicerol y polímero juntos. ²Influencia significativa en el análisis.

Anexo 5. Influencia entre las concentraciones y los polímeros de pérdida de masa en agua y deformación.

Parámetros evaluados	Probabilidad Pr>F	
	Pérdida de masa en agua	Deformación
Polímero	<0.0001 ²	<0.0001 ²
Concentración ¹	<0.0001 ²	<0.0001 ²

¹Concentraciones de bagazo, glicerol y polímero juntos. ² Influencia significativa en el análisis.

Anexo 6. Comparación de medias entre tratamientos con poli ácido láctico al 30 y 40%.

Parámetros	Medias PLA30 ¹ ± DE ^X	Medias PLA40 ¹ ± DE ^X
Pérdida de masa en agua (%)	95.349 ± 42.50 ^A	41.906 ± 7.66 ^B
Módulo de elasticidad (MPa)	82.750 ± 53.27 ^A	82.370 ± 69.62 ^A
Fuerza máxima (N)	74.420 ± 6.55 ^A	79.860 ± 11.18 ^A
Deformación específica (%)	6.470 ± 0.44 ^A	6.180 ± 0.52 ^B
Tensión (MPa)	3.330 ± 0.31 ^A	3.240 ± 0.64 ^A
Densidad (g/cm ³)	1.256 ± 0.02 ^A	1.246 ± 0.01 ^A

^(A-B) Medias con letras mayúsculas diferentes en la misma fila indican diferencias entre tratamientos (P < 0.05). ¹Poli Ácido Láctico (PLA). ^XDesviación Estándar.

Anexo 7. Comparación de costos de poli ácido láctico al 100, 30 y 40%.

Material	Cantidad (Kg)	Precio (USD) /Unidad	Total (USD)
PLA ^y	100.00	3.00	300.00
PLA ^y	40.00	3.00	120.00
Bagazo	42.00	0.75	31.50
Glicerol	18.00	1.54	27.72
			179.22
PLA ^y	30.00	3.00	90.00
Bagazo	49.00	0.75	36.75
Glicerol	21.00	1.54	32.34
			159.09

^yPoli Ácido Láctico (PLA).