



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

MATERIAL BIODEGRADABLE DE ARROZ QUEBRADO Y BAGAZO DE CAÑA PARA EMPAQUE

TESIS DE GRADO

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA



PRESENTA:

YUMARI DÍAZ HERRERA

Bajo la supervisión de: CARLOS ALBERTO VILLASEÑOR PEREA, DOCTOR

Chapingo, Texcoco, Estado de México, Noviembre de 2019.



**MATERIAL BIODEGRADABLE DE ARROZ QUEBRADO Y BAGAZO DE CAÑA
PARA EMPAQUE**

Tesis realizada por **YUMARI DÍAZ HERRERA** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



DR. CARLOS ALBERTO VILLASEÑOR PEREA

ASESOR:



DR. ARTEMIO PÉREZ LÓPEZ

ASESOR:

Arturo Mancera

DR. ARTURO MANCERA RICO

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	vi
INDICE DE FIGURAS	vii
DEDICATORIAS	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS	x
RESUMEN GENERAL	xi
GENERAL ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Literatura citada	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Biocompuestos y materiales reciclados	5
2.2 Biopolímeros	6
2.2.1 Basados en almidón	7
2.2.2 Basados en celulosa	7
2.2.3 Ácido poliláctico	8
2.2.4 Polihidroxicanoatos	8
2.3 Arroz	9
2.3.1 Importancia mundial y nacional	9
2.3.2 Morfología	9
2.3.3 Industrialización	10
2.3.4 Almidón	11

2.4 Caña de azúcar	13
2.4.1 Producción del cultivo de caña de azúcar	13
2.4.2 Bagazo de caña	13
2.4.3 Composición de fibras celulósicas	14
2.5 literatura citada	15
3. ARTÍCULO CIENTÍFICO	18
Resumen	18
Abstract	19
3.1 Introducción	19
3.2 Materiales y Métodos.....	21
3.2.1 Materiales.....	21
3.2.2 Lugar de experimentación.....	21
3.2.3 Diseño del experimento.....	21
3.2.4 Análisis estadístico	22
3.2.5 Preparación de la fibra	22
3.2.6 Preparación del arroz quebrado	22
3.2.7 Elaboración del biocompuesto	23
3.2.8 Pruebas mecánicas del biocompuesto	23
3.2.9 Contenido de humedad	24
3.2.10 Absorción de agua.....	24
3.2.11 Biodegradabilidad.....	24
3.2.12 Análisis de microestructura	25

3.3 Resultados y Discusión	25
3.3.1 Comportamiento mecánico del material	25
3.5.2 Propiedades de tracción	26
3.3.3 Propiedades de compresión	27
3.3.4 Propiedades de flexión	28
3.3.5 Contenido de humedad	28
3.3.6 Absorción de agua	28
3.3.7 Biodegradabilidad	29
3.3.8 Análisis de microestructura	30
3.4 Conclusiones	31
3.5 Literatura citada	32

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Comparación de medias de resistencia a la compresión (RC), resistencia a la tracción (RT), resistencia a la flexión (RF), módulo de Young (MY) y contenido de humedad (CH) de seis tipos de compuestos elaborados con bagazo de caña. (media $\pm$ desv. est., n=5)	26
Cuadro 2: Efectos principales del tratamiento y la longitud de la fibra sobre la resistencia a la compresión (RC), resistencia a la tracción (RT), resistencia a la flexión (RF) y módulo de young (MY) de seis tipos de compuestos elaborados con bagazo de caña.....	27

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Morfología grano de arroz. Fuente: Pinciroli, 2010.	10
Figura 2: Segmento de una molécula de amilosa. Fuente: Matzinos et al, 2000.	11
Figura 3: Segmento de una molécula de amilopectina. Fuente: Matzinos et al, 2000.....	12
Figura 4: Clasificación de fibras naturales. Fuente: John & Thomas, 2008.	14
Figura 5: Segmento de una molécula de celulosa. Fuente: Keller, 2019.	15
Figura 6: Absorción de agua (humedad, base seca) de compuestos con fibra sin tratamiento alcalino (STA) y con tratamiento alcalino (CTA), con tres longitudes de fibra (L1=1.00 mm, L2=0.50 mm y L3=0.25 mm).	29
Figura 7: Biodegradabilidad de compuestos con fibra con tratamiento alcalino (B) y sin tratamiento alcalino (A), con tres longitudes de fibra (1mm, 0.5mm y 0.25mm).....	30
Figura 8: Micrografías electrónicas de barrido: a) biocompuesto sin tratamiento alcalino y longitud de fibra de 1mm; b) biocompuesto sin tratamiento alcalino y longitud de fibra de 0.25 mm; c) biocompuesto con tratamiento alcalino y longitud de fibra de 0.25 mm.	31

DEDICATORIAS

*Al Alfa y la Omega, el principio y fin, el que es y que era y que ha de venir,
al Todopoderoso.*

- *Apocalipsis 1:8*

AGRADECIMIENTOS

A todos los mexicanos que con sus impuestos a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) han brindado el apoyo económico para mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente.

A los miembros de mi comité asesor por su tiempo, esfuerzo y paciencia para conmigo, por todo el apoyo brindado y la confianza.

A la Dra. Rosario Venegas Ordoñez por ayudarme y apoyarme durante mi investigación, por su tiempo y paciencia.

A las personas que me proporcionaron el material experimental y/o facilitaron su obtención, al Ingenio azucarero de Casasano “La abeja” y al Molino de Arroz “Buena Vista” en Cuautla Morelos.

A mi familia y amigos que siempre me apoyaron incondicionalmente y siempre vieron más de lo que yo alcanzaba a ver.

A mi viejita por enseñarme tanto aún después de no estar aquí.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Yumari Díaz Herrera

Fecha de nacimiento: 13 de mayo de 1995

Lugar de nacimiento: Cuautla, Morelos

CURP: DIHY950513MMSZRM08

Profesión: Ingeniero Mecánico Agrícola

Cédula profesional: 10919165

Desarrollo Académico

Bachillerato: Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo.

Licenciatura: Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

Material biodegradable de arroz quebrado y bagazo de caña para empaque

El uso de materiales biocompuestos de matrices poliméricas biodegradables reforzadas con fibras naturales es una propuesta ecológica para diversos sectores de aplicación. El objetivo de esta investigación fue elaborar un material biodegradable con potencial de aplicación en el sector de empaque al estudiar el efecto que produce la longitud de la fibra de bagazo de caña (1mm, 0.5mm y 0.25mm) y la aplicación de tratamiento alcalino a las fibras, en la resistencia mecánica del material. Se realizaron pruebas mecánicas de tracción, flexión y compresión, de absorción de agua y biodegradabilidad por medio del método de enterramiento en el suelo. La resistencia mecánica del biocompuesto con longitud de fibra de 0.25mm y con tratamiento alcalino resultó ser más resistente que los demás tratamientos. Los biocompuestos elaborados presentaron buena biodegradación, el porcentaje de peso perdido de todos los biocompuestos fue superior al 70% después de la cuarta semana. De forma general los factores de tratamiento alcalino de la fibra y tamaño de longitud de ésta, influyen significativamente en la resistencia mecánica del material. La resistencia mecánica del biocompuesto con longitud de fibra de 0.25mm y con tratamiento alcalino resultó superior a la de los plásticos expansibles de tal manera que dicho biocompuesto es una propuesta prometedora como material de empaque.

Palabras clave: material biocompuesto, tratamiento alcalino, tamaño de fibra, propiedades mecánicas.

Tesis de Maestría en Ingeniería, Universidad Autónoma Chapingo

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

Autor: Yumari Díaz Herrera

Director de Tesis: Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea

GENERAL ABSTRACT

Biodegradable material of broken rice and bagasse of cane for packing

In recent years, the use of composite materials of bio-based polymers reinforced with natural fibers has been an eco-friendly alternative to several application sectors. The objective of this paper was to study the effect of the bagasse of cane fiber length (1mm, 0.5mm and 0.25mm) and the alkali fiber pretreatment on the mechanical properties of the composite. Mechanical tests (tensile, compressive and flexural), water uptake study and soil burial degradation experiment were carried out. The Mechanical strength of short fiber length composites (0.25mm) with alkali fiber pretreatment were better than the other treatments. The composites showed good biodegradability, the weight loss of all composites was 70% higher after the fourth week. Overall, both alkali fiber pretreatment and fiber length significantly affect the mechanical strength of the material. The Mechanical strength of short fiber length composites (0.25mm) with alkali fiber pretreatment was better than expandable plastics, so the mentioned composite is a promising proposal as packaging material.

Keywords: composite material, alkali treatment, fiber length, mechanical properties.

Thesis, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Yumari Díaz Herrera

Advisor: Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea

1. INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental por los residuos sólidos urbanos, ha aumentado en los últimos años, en México se generan 102, 895 toneladas de residuos al día, de los cuales sólo el 9.63% se recicla (SEMARNAT, 2017). Avella, 2005 menciona que aproximadamente entre 15 y 25% de los residuos sólidos en Colombia proceden de empaques y embalajes y dicho porcentaje aumenta debido al incremento en el consumo de productos de un solo uso o duración corta.

Según menciona Martínez, 2017; del total de la producción mundial de plásticos más del 54% es destinada a la producción de empaques y envases, igualmente 40% de la producción de papel y cartón se destina para el mismo fin.

Los empaques cumplen su función principal al proteger, comercializar y preservar los productos, uno de los materiales principales para la fabricación de empaques son los plásticos de origen sintético ya que su fácil manipulación industrial, su resistencia a la corrosión, a la intemperie y a diversos factores biológicos y químicos los ha convertido en un material ampliamente utilizable en la industria del empaque, además de que son económicos (Ubaque y Fernando, 2018). Sin embargo, han resultado diversas dificultades en el manejo de los residuos sólidos, ya que representan cerca del 20% del volumen total (Salgado *et al*, 2010), además, el uso desmedido de los plásticos en la industria del empaque, aunado a que su incorporación al ciclo biológico es muy lenta (100 a 1000 años aproximadamente), ha despertado serias preocupaciones (Ubaque y Fernando, 2018).

Con el objetivo de mitigar esta situación, se ha incrementado el estudio en la generación de nuevos materiales, que sean biodegradables, elaborados con materias primas naturales y que compartan características similares a los materiales utilizados en la fabricación de empaques (Ibrahim *et al*, 2014).

Los biopolímeros, también conocidos como polímeros renovables, pueden ser clasificados en dos grupos fundamentales: los que provienen directamente de organismos vivos (polisacáridos, lípidos, proteínas) y los que requieren ser sintetizados, pero su origen es de recursos renovables (ácido poliláctico, polihidroxialcanoatos) (Cruz *et al*, 2013).

Los biopolímeros basados en almidón son los que más han llamado la atención de los investigadores y los que han sido más estudiados (Ibrahim *et al*, 2014), debido a que el almidón producido por diversas fuentes naturales, es un material renovable, completamente biodegradable, de bajo costo y de fácil obtención por su abundancia en el planeta (Wan *et al*, 2009). Sin embargo los materiales elaborados con matrices termoplásticas de almidón (maíz, casava, arroz, papa, trigo, entre otros) carecen de buenas propiedades mecánicas (Xie *et al*, 2018), es así como surgen los llamados materiales biocompuestos, los cuales están formados por una matriz polimérica biodegradable reforzada con fibras naturales, diversos autores han demostrado que el uso de fibras naturales mejora las propiedades mecánicas de los biopolímeros (Spiridon *et al*, 2015; Guleria *et al*, 2018; Wang *et al*, 2017).

Los materiales lignocelulósicos, principalmente los residuos y/o subproductos agroindustriales representan una fuente de materia prima para la elaboración de materiales biocompuestos, ya que son materiales abundantes, de bajo costo y de naturaleza biodegradable (Simbaña y Mera, 2010).

Debido a los problemas ambientales generados por el uso desmedido de empaques plásticos, y al aprovechamiento de recursos renovables provenientes de residuos agroindustriales, el presente trabajo tiene como objetivo la elaboración de un biocompuesto con fibra de bagazo de caña como refuerzo de

una matriz termoplástica de almidón de arroz quebrado como propuesta de material de empaque.

Para el cumplimiento de dicho objetivo se estudió el efecto que produce la longitud de fibra y la aplicación de tratamiento alcalino de la misma en la resistencia mecánica del biocompuesto. De igual forma se realizaron pruebas de absorción de agua y biodegradabilidad por el método de enterramiento en el suelo y se compararon sus propiedades con las de los plásticos comúnmente utilizados en la industria del empaque.

1.1 Literatura citada

Avella, O. (2005). Empaques, envases y embalajes: una propuesta normativa. En *Tecnogestión una mirada al ambiente*. Vol. 11. Num. 1. p. 41-50.

Cruz, R; Martínez, Y y López, A. 2013. "Biopolímeros y su integración con polímeros convencionales como alternativa de empaque de alimentos". En: *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 7-2: p. 42-52.

Guleria, G; Singh, A y Rana, R. (2018). Mechanical, Thermal, Morphological, and Biodegradable Studies of Okra Cellulosic Fiber Reinforced Starch-Based Biocomposites. *Advances in Polymer Technology*, Vol. 37, No. 1. Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adv.21646>

Ibrahim, H; Farag, M; Megahed, H y Mehanny, S. (2014). Characteristics of starch-based biodegradable composites reinforced with date palm and flax fibers. *Carbohydrate Polymers* 101 (2014) 11– 19. Doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.051>

Martínez, M. (2017). *La problemática de la cultura del empaque: del diseño centrado en el consumo, al diseño centrado en la función ambiental*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Salgado, R; Coria, L; García, E; Vargas, Z; Rubio, E y Crispín, I. (2010). Elaboración de materiales reforzados con carácter biodegradable a partir de polietileno de baja densidad y bagazo de caña modificado. En *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Vol.11 (7). p. 520-531. Recuperado de: <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/DIC10/salgado.pdf>

SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2017). Información sobre residuos sólidos urbanos. Recuperado de: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>

Simbaña, A y Mera, M. (2010). Fibras naturales y residuos agroindustriales. Fuente sostenible de materia prima. En *Revista Informativa de Docencia, Investigación y Proyección Social*. Vol. 1 num. 6. p. 15-16.

Spiridon, I; Anghel, N y Bele, A. (2015). Behavior of biodegradable composites based on starch reinforced with modified cellulosic fibers. *Polymers Advanced Technologies*. 26, 1189–1197. DOI: 10.1002/pat.3553

Ubaque, C y Fernando, I. (2018). Elaboración de bioempaques a partir de almidones nativos y aceites esenciales prolongando vida útil en fresas. En: *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*. Vol. 5(1). p. 71-86. doi:<http://dx.doi.org/10.23850/24220582.1354>

Wan, Y.Z; Luo, H; He, F; Liang, H; Huang, Y; Li, X.L. (2009). Mechanical, moisture absorption, and biodegradation behaviours of bacterial cellulose fibre-reinforced starch biocomposites. *Composites Science and Technology* vol. 69 p. 1212–1217. doi:10.1016/j.compscitech.2009.02.024

Wang, P; Chen, F; Zhang, H; Meng, W; Sun, Y y Liu, C. (2017). Large-scale preparation of jute-fiber-reinforced starch-based composites with high mechanical strength and optimized biodegradability. *Starch/Stärke*, 69, 1700052. Recuperado en 22 de Octubre de 2018 de: www.starch-journal.com

Xie, Q; Li, F; Li, J; Wang, L; Li, Y; Zhang, C; Xu, J y Chen, S. (2018). A new biodegradable sisal fiber–starch packing composite with nest structure. *Carbohydrate Polymers* 189 (2018) 56–64. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.063>

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Biocompuestos y materiales reciclados

Los materiales compuestos son interesantes ya que poseen propiedades combinadas de diversos materiales que no se encuentran de forma regular en la naturaleza, proporcionando características específicas según el campo de aplicación (Ponce, 2011).

Durante los últimos años, investigaciones relacionadas con la fabricación de compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales se han incrementado considerablemente, ya que son una alternativa competitiva a los compuestos reforzados con fibra de vidrio y en general a los materiales plásticos contaminantes (Valero *et al*, 2013).

Es así como surge un nuevo concepto según lo menciona Rodríguez, 2014; biocompuestos o compuestos verdes, los cuales están formados por la matriz polimérica y por los refuerzos. En los que tanto la matriz como los refuerzos son biodegradables.

La American Society for Testing and Materials (ASTM) en la norma ASTM D-5488-944 define la biodegradabilidad como a la capacidad que tiene un material para descomponerse en dióxido de carbono, agua, metano, biomasa o componentes orgánicos, siendo el mecanismo predominante la acción enzimática de microorganismos.

Las fibras naturales más comúnmente utilizadas como refuerzo son yute, cáñamo, sisal, plátano, algodón, lino, kenaf, abacá, coco, bambú, entre otras. De forma general las fibras naturales son utilizadas por tener ciertas ventajas frente

a las fibras sintéticas, como bajo costo, biodegradabilidad, baja densidad, aportan resistencia y dureza a la matriz polimérica y se reduce el uso de recursos no renovables (Álvarez *et al*, 2007; Simbaña y Mera 2010).

En términos de utilización Ponce, 2011; clasifica a las plantas de producción de fibras naturales en dos grupos, primarias y secundarias; las primarias son las plantas que se cultivan por el contenido de fibra que tienen, mientras que las secundarias son las plantas cultivadas para un fin diferente, sin embargo, las fibras son un subproducto de la utilización de las mismas.

Por otro lado los materiales reciclados suponen una solución al problema de contaminación, sin embargo, en compuestos que contienen fibra de carbono y fibra de vidrio ha sido complicado generar tácticas para reciclarlos, igualmente diversos tipos de plásticos utilizados para elaboración de empaques no pueden ser reciclados fácilmente ya que requieren de un lavado previo por estar contaminados con alimentos y tintas, lo cual resulta costoso (Ponce, 2011; Ruíz, 2006).

Los polímeros biodegradables, en cambio, sugieren una solución atacando el problema desde el origen, ya que mayormente provienen de recursos renovables y resultan tener una mejor incorporación al ciclo biológico lo que los convierte en materiales menos contaminantes.

Así los polímeros fabricados a base de recursos renovables o biodegradables se han convertido en una interesante propuesta para la industria de los plásticos, del empaquetamiento, de la sociedad en general y del sector agrícola por plantear una alternativa de comercialización a diferentes mercados (Valero *et al*, 2013).

2.2 Biopolímeros

Los biopolímeros, también conocidos como polímeros renovables, pueden ser clasificados en dos grupos fundamentales: los que provienen directamente de organismos vivos (polisacáridos, lípidos, proteínas) y los que requieren ser

sintetizados, pero su origen es de recursos renovables (ácido poliláctico, polihidroxialcanoatos) (Cruz *et al*, 2013). A continuación se describen algunos ejemplos de los biopolímeros más representativos:

2.2.1 Basados en almidón

Los biopolímeros basados en almidón son los que más se han investigado. Se conforman de dos polímeros, amilosa y amilopectina, la amilosa es una molécula lineal y la amilopectina una ramificada. Es común encontrar porcentajes de aproximadamente 25% y 75% respectivamente en varios almidones.

De forma general los polímeros a base de almidón tienen alto potencial en la fabricación de materiales biodegradables. Aproximadamente el 75% de este tipo de polímeros son utilizados para la fabricación de empaques y envases de los cuales 50% de ellos están hechos por mezclas de almidón y polímeros petroquímicos.

A pesar de su utilización en la industria tiene algunas desventajas que han limitado su completa inserción, como su baja resistencia a la humedad, baja procesabilidad y su incompatibilidad con ciertos polímeros, sin embargo, esto ha sido un impulso para la investigación de nuevas estrategias que aminoren o nulifiquen dichas desventajas, entre éstas se registra la modificación de la estructura del almidón, diversas mezclas con otros polímeros biodegradables, la utilización de elementos que vuelvan compatible el almidón con otros polímeros y el uso de fibras que funjan como refuerzo (Valero *et al*, 2013; Cruz *et al*, 2013)

2.2.2 Basados en celulosa

Estos polímeros se producen partir de modificaciones químicas de la celulosa natural. Como ejemplo principal se encuentra el acetato y éster de celulosa, el celofán, biocompuestos de celulosa y celulosa regenerada para fibras, por mencionar algunos. En el caso de éste último en combinación con otras fibras puede ser utilizada para fabricar ropa y materiales higiénicos desechables. Este

tipo de biopolímeros pueden ser procesados por extrusión y moldeo por compresión (Valero *et al*, 2013; Cruz *et al*, 2013)

2.2.3 Ácido poliláctico

El poli (ácido láctico) es un polímero termoplástico biodegradable, reciclable y compostable, se degrada fácilmente en agua y dióxido de carbono. Es obtenido del ácido láctico derivado en su totalidad de materias primas renovables con propiedades similares a las del tereftalato de polietileno (PET) (Valero *et al*, 2013; Cruz *et al*, 2013)

El ácido láctico es producido por fermentación anaerobia de sustratos que contengan carbono por medio de bacterias y hongos, éstos se denominan puros como los derivados de glucosa y lactosa o impuros como pueden ser de almidón y mezclas.

Además de tener excelentes propiedades de biodegradabilidad sus posibilidades de procesamiento son diversas: por moldeo por compresión, extrusión de película, inyección, moldeo por soplado, hilado de fibras, formación de película y termoformado (Valero *et al*, 2013; Cruz *et al*, 2013).

2.2.4 Polihidroxialcanoatos

Son biopolímeros sintetizados por bacterias que acumulan poliésteres como reservas de carbono y energía. Anteriormente eran utilizados como películas de empaques, sin embargo su uso se ha extendido en otras aplicaciones como productos de higiene femenina, utensilios, envases de shampoo y cosméticos.

Se han encontrado aplicaciones en la dosificación de medicamentos y agroquímicos además de ser usados en el campo de la medicina como materiales osteosintéticos y en reemplazos de vasos sanguíneos. Sin embargo, es un material que se ha visto limitado en su uso a pesar de sus amplias aplicaciones y ventajas frente a los materiales plásticos ya que su costo de producción es muy elevado (Valero *et al*, 2013).

2.3 Arroz

2.3.1 Importancia mundial y nacional

El arroz a nivel mundial es uno de los cereales más importantes para la alimentación humana, constituye la base de la alimentación de más del 60% de la población mundial (Martínez *et al*, 2017; Loubes y Tolaba, 2013), debido a su producción en todos los continentes y a que está compuesto por un alto porcentaje de carbohidratos, lo cual lo convierte en la principal fuente de carbohidratos de la dieta de la población mundial y representa dos tercios del aporte calórico diario en países en desarrollo (Tamayo *et al*, 2017).

La producción mundial de arroz en 2017 fue de 759.6 millones de toneladas, de las cuales 503.9 millones de toneladas corresponden a la producción de arroz blanco (FAO, 2018). En México la producción en 2018 fue de 283,753.37 ton y es el cereal que ocupa el segundo lugar en los gastos de las familias mexicanas (SIAP, 2018; SAGARPA, 2017).

2.3.2 Morfología

El grano de arroz recién cosechado, es decir, sin haber pasado por algún proceso tecnológico, se compone por el fruto llamado cariósipide o cariopse y un tejido celulósico – fibroso que envuelve y protege al grano, el cual es llamado comúnmente como cáscara o cascarilla, la cual se compone por la lema y la palea. Industrialmente al conjunto de cáscara y cariósipide se le conoce como arroz de cáscara (Figura 1) (Pincirolí, 2010).

El cariósipide está conformado por el embrión, el cual es de tamaño muy pequeño y se encuentra en la parte ventral del cariósipide, el endospermo, el cual se compone por gránulos de almidón, las capas de aleurona, las cuales son ricas en proteínas, el tegmen, y el pericarpio (Pincirolí, 2010).

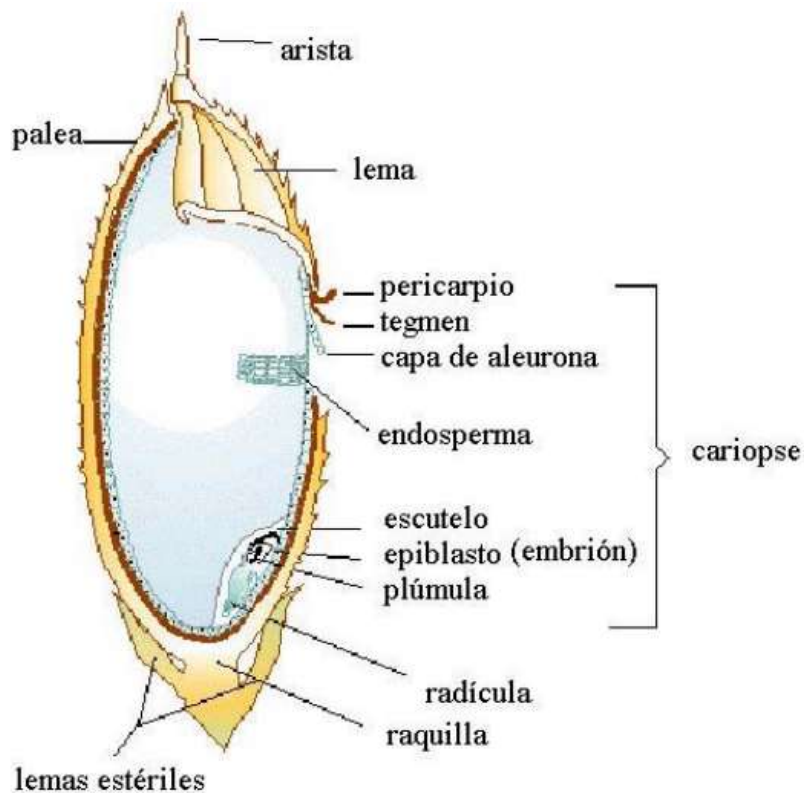


Figura 1: Morfología grano de arroz. Fuente: Pincirolí, 2010.

2.3.3 Industrialización

A diferencia de la molienda de trigo y de otros cereales, donde el objetivo es moler el grano para obtener harina, en la molienda del arroz se pretende obtener la mayor cantidad de granos enteros, según lo reportan algunos autores (Pincirolí, 2010 y Loubes y Tolaba, 2013) la eficiencia en el proceso de transformación del arroz cáscara en arroz blanco o pulido se mide a partir de la cantidad de granos enteros obtenidos en relación a la cantidad inicial de arroz cáscara.

El proceso de industrialización del arroz, o molienda del arroz, consiste en el descascarillado, separación del salvado (embrión, capas de aleurona, tegmen y pericarpio) y finalmente la clasificación de granos enteros y quebrados. Cuando al arroz se le quita la cáscara pero no el pericarpio y el germen se le llama arroz integral, el cual tiene una coloración marrón, que después del pulido se obtiene el arroz blanco (endospermo) (Loubes y Tolaba, 2013).

Durante la molienda, se obtienen diferentes productos, como la cáscara, que representa el 20% del total de arroz cosechado, el salvado (10%) y el grano de arroz (70%), ya sea entero o quebrado, sin embargo del total de la molienda de arroz, el arroz quebrado representa un 4 a 40%, dependiendo de la calidad del grano y la maquinaria empleada en el proceso (Loubes y Tolaba, 2013).

Por otro lado, el arroz pulido está compuesto aproximadamente de 7.3 a 8.3 % de proteína, 0.4 a 0.7 % de lípidos, 0.3 a 0.6 % de fibra cruda, 0.4 a 0.9 % de cenizas, 2.7% de fibra dietética y 90.2% de almidón (Pincirolí, 2010).

2.3.4 Almidón

El almidón es un carbohidrato que está formado por dos estructuras poliméricas diferentes, que son la amilosa y la amilopectina. La amilosa es un polisacárido compuesto de 200 a 20,000 moléculas de glucosa aproximadamente, las cuales están unidas a través de enlaces glicosídicos α -1,4, formando cadenas lineales (Figura 2). Por su parte, la amilopectina es un polisacárido con estructura química ramificada compuesto entre 10,000 a 20,000,000 unidades de glucosa, unidas por enlaces glicosídicos α -1,4 y α -1,6 (Figura 3) (Pardo *et al*, 2013, Agama *et al*, 2015).

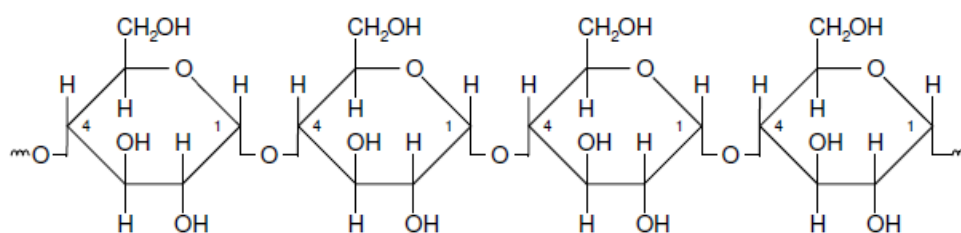


Figura 2: Segmento de una molécula de amilosa. Fuente: Matzinos *et al*, 2000.

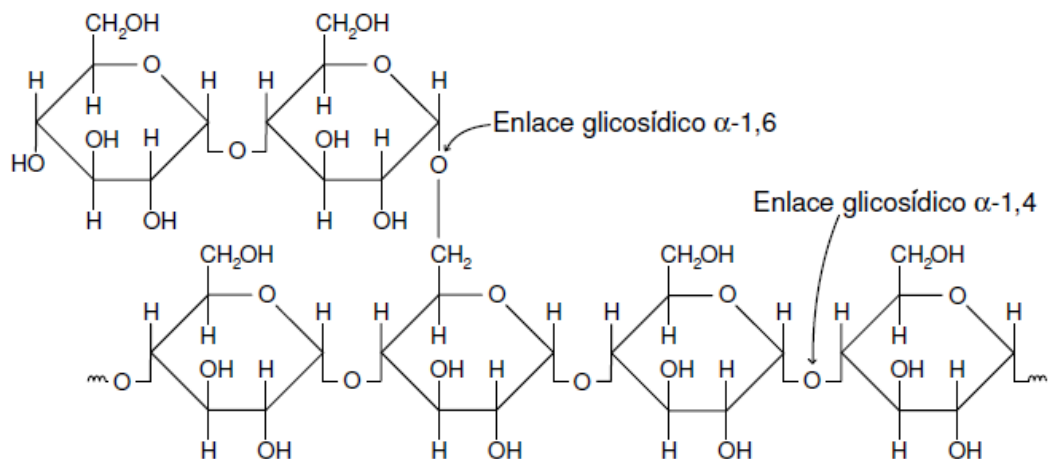


Figura 3: Segmento de una molécula de amilopectina. Fuente: Matzinos et al, 2000.

Los granos de almidón están formados por fracciones de amilosa y amilopectina que se orientan en capas concéntricas, la distribución y organización de ambos polisacáridos dentro del grano de almidón dependerá de la especie botánica y de la proporción de dichos componentes, generalmente la mayoría de los almidones está compuesto por un 20% de amilosa y 80% de amilopectina, dichos factores influyen en sus propiedades fisicoquímicas y definen sus diversas aplicaciones (Agama *et al*, 2015; Martínez, 2017).

La amilopectina es uno de los componentes principales que le otorga su estructura semicristalina al grano de almidón, el cual es insoluble en agua y en solventes orgánicos, sin embargo éstos se hinchan y pierden dicha estructura en presencia de calor y abundante agua; y a una temperatura crítica, se forma un gel, a lo cual se le conoce como proceso de gelatinización del almidón, sin embargo en dicho proceso la despolimerización es mínima e incluso nula. Únicamente se produce una despolimerización significativa cuando se alcanzan los 150°C y la cantidad de agua o plastificante es relativamente baja, de manera que los granos de almidón se transforman en una matriz homogénea de polímero amorfo (Ruíz, 2006).

2.4 Caña de azúcar

2.4.1 Producción del cultivo de caña de azúcar

El cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) constituye la principal actividad económica de 15 estados de la república donde se encuentran distribuidos 51 ingenios registrados (SIAP, 2018).

La producción nacional del cultivo de caña de azúcar en el 2018 fue de 56.4 millones de toneladas (SIAP, 2018). De acuerdo con Becerra *et al*, 2016, el bagazo de caña representa aproximadamente el 30% de la caña, por lo que en ese año del total de la producción 16.92 millones de toneladas son bagazo.

2.4.2 Bagazo de caña

El bagazo de caña de azúcar es el residuo derivado del proceso agroindustrial de obtención de azúcar, al extraer el jugo de los tallos de la caña la parte sólida llamada bagazo es utilizada tradicionalmente como material combustible en las calderas de los ingenios, como materia prima para la fabricación de papel y paneles aglomerados de fibras de partículas, como aditivos de alimentos y en el peor de los casos es considerado como un desecho agroindustrial (Aguilar 2011).

Está formado por agua (46-52 %), pequeñas cantidades de sólidos solubles (6 – 8 %) y sólidos particulados (40- 46 %) aproximadamente, éstos últimos están conformados por dos tipos de estructuras llamadas fibras y médula o meollo. Las fibras se encuentran en la corteza y en el interior de la caña mientras que la médula está en la parte central de la misma.

La fibra está compuesta de células cilíndricas y tejidos vasculares de paredes duras, es insoluble en agua y es la parte utilizada para la fabricación de papel y elementos aglomerados; la médula está compuesta por células parenquimatosas que poseen forma irregular y paredes finas poco resistentes, capaz de absorber hasta 20 veces su peso en agua (Aguilar 2011).

2.4.3 Composición de fibras celulósicas

Las fibras naturales son clasificadas de acuerdo a su origen (vegetal, animal o mineral), debido a sus características físicas, mecánicas y químicas son utilizadas para diversas aplicaciones desde tiempos antiguos hasta la actualidad. Por su parte, las fibras vegetales en la mayoría de las plantas conforman elementos estructurales que dan lugar a tejidos duros o blandos, tales como raíces, tallos, hojas, flores y frutos; de tal manera, que las fibras de origen vegetal se clasifican según la parte de la planta de las que son extraídas (Figura 4) (Velásquez *et al*, 2016; y Deaquiz y Moreno, 2016).

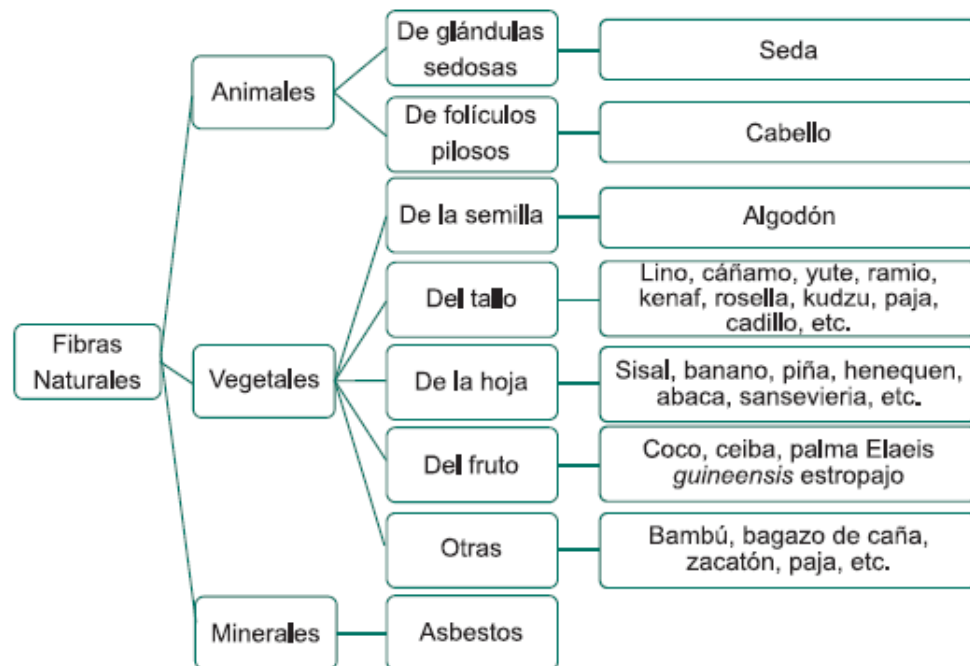


Figura 4: Clasificación de fibras naturales. Fuente: John & Thomas, 2008.

Las fibras vegetales son un recurso natural renovable altamente disponible y de gran importancia económica y social, ya que miles de toneladas se destinan para la fabricación de papel, textiles, combustible, entre otros (Simbaña y Mera 2010; Deaquiz y Moreno, 2016).

Las fibras vegetales están compuestas por diferentes porciones de celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina; de los cuales el componente estructural más

importante es la celulosa. La celulosa es un polímero compuesto únicamente por moléculas de glucosa unidas por enlaces glicosídicos β 1-4 (Figura 5). Las cadenas largas de celulosa forman estructuras cristalinas alineadas a lo largo de la longitud de la fibra, llamadas microfibrillas, las cuales están recubiertas de hemicelulosa, una estructura lineal ramificada conformada por polisacáridos de peso molecular bajo. La pectina proporciona flexibilidad a las fibras debido a su estructura ramificada, mientras que la lignina es un componente que brinda rigidez a la pared celular. (Deaquiz y Moreno, 2016, Velásquez *et al*, 2016).

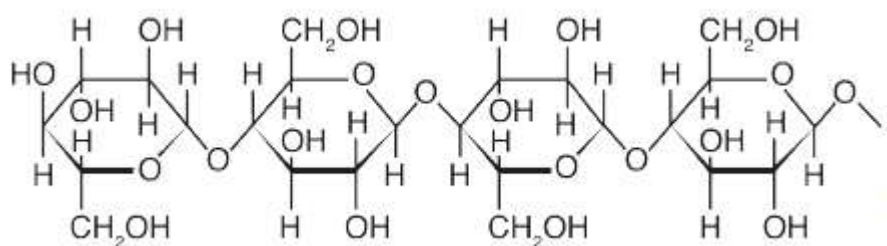


Figura 5: Segmento de una molécula de celulosa. Fuente: Keller, 2019.

El contenido de celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina varía según la especie botánica y a su vez influye en sus propiedades físico-mecánicas. En general la celulosa representa más del 50% de las fibras, mientras que la lignina y la hemicelulosa alrededor de 20% y 15% respectivamente (Velásquez *et al*, 2016 y Rodríguez, 2006).

2.5 literatura citada

Agama, E; Bello, L; Pacheco, G; Evangelista, S. (2015). Estructura interna de los gránulos de almidón de plátano mediante gelatinización química superficial: propiedades morfológicas, fisicoquímicas y moleculares. En *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 14, núm. 1, p. 73-80. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v14n1/v14n1a7.pdf>

Aguilar, N. (2011). Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel. En *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XII, núm. 2, pp. 189-197.

Alvarez, C; Gañan, P; Arboleda, C; Mejia, A. (2007). Desarrollo de materiales compuestos a partir de fibras de plátano modificadas con enzimas ligninolíticas.

En *Scientia et Technica*. Vol. 1. Num. 36. p. 725-730. Recuperado de: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5105>

American Society for Testing and Materials (ASTM). Compostabilidad industrial de materiales plásticos D-5488-944. (s, f).

Becerra, A. Buitrago, A. y Pinto, P. (2016). Sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. En *Ingeniería Solidaria*, vol. 12, n.º 20, pp. 133-149. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v12i20.1548>

Cruz, R; Martínez, Y y López, A. (2013). Biopolímeros y su integración con polímeros convencionales como alternativa de empaque de alimentos. En *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 7-2: p. 42-52.

Deaquiz, Y y Moreno, B. (2016). Producción y biosíntesis de fibras vegetales una revisión. En *Conexión Agropecuaria*. Vol. 6. Num. 1. p. 29-42. Recuperado de: <https://www.jdc.edu.co/index.php/conexagro/article/download>

FAO (Food and Agriculture Organization). (2018). Seguimiento del Mercado del Arroz. Recuperado de: <http://www.fao.org/economic/est/publicaciones/publicaciones-sobre-el-arroz/seguimiento-del-mercado-del-arroz-sma/es/>

John, M and Thomas, S. (2008). Biofibras and biocomposites. En *Carbohydrate polymers*. Vol. 71(3). p. 343-364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>.

Keller, S. (2019). Porque el papel prospera en un mundo digital. En *ChemMatters*. April/May. p. 5-8. Recuperado de: www.acs.org/chemmatters.

Loubes, M. Tolaba, M. (2013). “Arroz: rendimiento de molienda mediante análisis de imágenes”. En: *La alimentación Latinoamericana*. No. 308. p. 44-49. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/318429753>

Martínez, J; Hernández, J y Arias, A. (2017). Propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón de arroz (*Oryza sativa* L) blanco e integral. En *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*. Vol. 25 No. 41. p. 15-30. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/e4f4/f6a112225a24ef617f13efd8c081190f4f4d.pdf>

Matzinos, P; Bikiaris, D; Kokkou, S y Panayiotou, C. (2000). Processing and characterization of LDPE/starch products. En *Journal of Applied Polymer Science*. Vol. 79. Num. 14. p. 2548-2557. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20010401\)79:14<2548::AID-APP1064>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20010401)79:14<2548::AID-APP1064>3.0.CO;2-3)

Pardo, O; Castañeda, J; Ortiz, C. (2013). Caracterización estructural y térmica de almidones provenientes de diferentes variedades de papa. En *Acta Agronómica*. Vol. 62(4). p. 289-295. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v62n4/v62n4a01.pdf>

Pincirolí, M. (2010). Proteínas de arroz propiedades estructurales y funcionales. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de la Plata. Argentina.

Ponce, D. 2011. *Obtención de materiales compuestos de matriz polimérica biodegradable reforzada con fibra natural*. (Tesis de licenciatura). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Rodríguez, L. (2014). *Elaboración de un biocompuesto a partir de la fibra de plátano*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Rodríguez, I. (2006). *Caracterización química de fibras de plantas herbáceas utilizadas para la fabricación de pastas de papel de alta calidad*. (Tesis Doctoral). Universidad de Sevilla. España.

Ruiz, G. (2006). Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. En *Ingeniería y Ciencia*, vol. 2, núm. 4, pp. 5-28.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2017). Planeación agrícola nacional 2017-2030. Arroz Mexicano. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256423/B_sico-Arroz.pdf

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2018). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Producción nacional de arroz palay. Recuperado de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/?fbclid=IwAR2p1YUc80ukacHuVWNWejbY-DqdlMNZF2VmXhuW40QgrIH-7DgelEWacfo>

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2018). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Producción nacional de caña de azúcar. Recuperado de: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/?fbclid=IwAR2p1YUc80ukacHuVWNWejbY-DqdlMNZF2VmXhuW40QgrIH-7DgelEWacfo>

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2018). Artículos, la producción de caña de azúcar. Recuperado de: <https://www.gob.mx/siap/articulos/la-produccion-de-cana-de-azucar-supera-las-55-millones-de-toneladas-en-2018?idiom=es>

Simbaña, A y Mera, M. (2010). Fibras naturales y residuos agroindustriales. Fuente sostenible de materia prima. En *Revista Informativa de Docencia, Investigación y Proyección Social*. Vol. 1 num. 6. p. 15-16.

Tamayo, E. Sarasty, O y Mosquera, E. (2017). "Aprovechamiento de residuos ligno-celulósicos en la elaboración de empaques secundarios ecológicos". En: *Revista Industrial Data* 20(2): 37-42. DOI: <http://dx.doi.org/10.15381/idata.v20i2.13959>

Velásquez, S; Pelaéz, G y Giraldo, D. (2016). Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su

aplicación en el diseño de nuevos productos. En *Informador Técnico (Colombia)*. Vol. 80(1). p. 77-86. Recuperado de: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/324/345

Valero, M; Ortegón, Y y Uscategui, Y. (2013). Biopolímeros: avances y perspectivas. En *Dyna*, vol. 80, núm. 181, pp. 171-180. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/20642/45329>

3. ARTÍCULO CIENTÍFICO

MATERIAL BIODEGRADABLE DE ARROZ QUEBRADO Y BAGAZO DE CAÑA PARA EMPAQUE

BIODEGRADABLE MATERIAL MADE OF BROKEN RICE AND BAGASSE OF CANE FOR PACKAGING

Yumari **Díaz Herrera**¹ y Carlos Alberto **Villaseñor Perea**²

Resumen

El uso de materiales biocompuestos de matrices poliméricas biodegradables reforzadas con fibras naturales es una propuesta ecológica para diversos sectores de aplicación. El objetivo de esta investigación fue elaborar un material biodegradable con potencial de aplicación en el sector de empaque al estudiar el efecto que produce la longitud de la fibra de bagazo de caña (1mm, 0.5mm y 0.25mm) y la aplicación de tratamiento alcalino a las fibras, en la resistencia mecánica del material. Se realizaron pruebas mecánicas de tracción, flexión y compresión, de absorción de agua y biodegradabilidad por medio del método de enterramiento en el suelo. La resistencia mecánica del biocompuesto con longitud de fibra

de 0.25mm y con tratamiento alcalino resultó ser más resistente que los demás tratamientos. Los biocompuestos elaborados presentaron buena biodegradación, el porcentaje de peso perdido de todos los biocompuestos fue superior al 70% después de la cuarta semana. De forma general los factores de tratamiento alcalino de la fibra y tamaño de longitud de ésta, influyen significativamente en la resistencia mecánica del material. La resistencia mecánica del biocompuesto con longitud de fibra de 0.25mm y con tratamiento alcalino resultó superior a la de los plásticos expansibles de tal manera que dicho biocompuesto es una propuesta prometedora como material de empaque.

Palabras clave: material biocompuesto, tratamiento alcalino,

tamaño de fibra, propiedades mecánicas.

Abstract

In recent years, the use of composite materials of bio-based polymers reinforced with natural fibers has been an eco-friendly alternative to several application sectors. The objective of this paper was to study the effect of the bagasse of cane fiber length (1mm, 0.5mm and 0.25mm) and the alkali fiber pretreatment on the mechanical properties of the composite. Mechanical tests (tensile, compressive and flexural), water uptake study and soil burial degradation experiment were carried out. The Mechanical strength of short

fiber length composites (0.25mm) with alkali fiber pretreatment were better than the other treatments. The composites showed good biodegradability, the weight loss of all composites was 70% higher after the fourth week. Overall, both alkali fiber pretreatment and fiber length significantly affect the mechanical strength of the material. The Mechanical strength of short fiber length composites (0.25mm) with alkali fiber pretreatment was better than expandable plastics, so the mentioned composite is a promising proposal as packaging material.

Keywords: composite material, alkali treatment, fiber length, mechanical properties

1 Tesista

2 Director

3.1 Introducción

Los empaques cumplen su función principal en la protección, transporte y comercialización de los productos; sin embargo el crecimiento en la demanda de éstos ha desencadenado serios problemas ecológicos los cuales están directamente relacionados con la pérdida de los recursos naturales no renovables, la contaminación del agua, aire y suelo, y consecuentemente el calentamiento global (Cruz *et al*, 2013; Villada *et al*, 2007).

Los plásticos utilizados para empaques son populares por ser económicos, livianos, su fácil manipulación industrial, su alta resistencia a la descomposición bacteriana y en general a los agentes atmosféricos; sin embargo, dichos atributos vistos desde la perspectiva ambientalista son sus peores propiedades (Valero *et al*, 2013).

Por otro lado, los empaques de cartón no están muy lejos de la problemática anterior, si bien su resistencia a las condiciones atmosféricas es menor que la de los plásticos (Lozoya *et al*, 2007), son considerados materiales de lenta biodegradabilidad, por lo tanto es necesario minimizar su presencia en los rellenos sanitarios.

Dado lo anterior, se ha incrementado el desarrollo de materiales conocidos como biocompuestos los cuales presentan ventajas ecológicas cuando su vida útil tiene fin. El uso de fibras naturales utilizadas como refuerzo en la fabricación de compuestos poliméricos utilizados para diversos fines se ha intensificado en los últimos años (Wang *et al*, 2017; Ibrahim *et al*, 2014); uno de los sectores donde las fibras han cobrado fuerte importancia es la industria del empaque. A pesar de que la fabricación de biocompuestos sigue siendo costosa, el uso de fibras naturales en la creación de polímeros biodegradables es una excelente opción para lograr el equilibrio entre el costo y el impacto ambiental.

Un material alternativo para el refuerzo de biopolímeros es el bagazo de caña, éste es el residuo derivado del proceso agroindustrial de obtención de azúcar. Al extraer el jugo de los tallos de la caña, la parte sólida llamada bagazo es utilizada tradicionalmente como material combustible en las calderas de los ingenios, además, es utilizado como materia prima en la fabricación de papel y paneles aglomerados; sin embargo, a pesar de que tiene diversos usos en el sureste del país es considerado como una fuente de contaminación si no se maneja adecuadamente (Aguilar, 2011; Pérez *et al*, 2011).

Becerra *et al*, 2016, mencionan que el bagazo representa el 30% de la caña molida. En el año 2017 a nivel nacional se generaron 16.8 millones de toneladas de bagazo de caña (SIAP, 2017), por lo que se considera un material abundante y disponible en gran parte del país ya que constituye la principal actividad económica de 15 estados donde se encuentran distribuidos 51 ingenios registrados (SIAP, 2018).

A pesar de que se han realizado investigaciones con diferentes tipos de fibra utilizada como refuerzo de biopolímeros, como yute, sisal, palma datilera, lino, oca, incluso bagazo de caña, poco se conoce acerca del efecto que produce el tamaño de la fibra en la resistencia mecánica del material (Xie *et al*, 2018; Tamayo *et al*, 2017).

Por otro lado, los polímeros extraídos de biomasa, especialmente del almidón, han llamado mucho la atención de los investigadores debido a que son un material abundante, de bajo costo, renovable y completamente biodegradable (Guleria *et al*, 2018; Wang *et al*, 2017). En este estudio se utiliza el almidón contenido en el arroz quebrado, éste es un subproducto que constituye un 4 a 40% de la molienda del arroz, dependiendo de la calidad del grano y la maquinaria de molienda (Loubes y Tolaba, 2013), además su producción se extiende a todos los continentes (FAO, 2017), lo cual lo convierte en un recurso altamente disponible.

Debido a la creciente preocupación por la conservación de los recursos no renovables y al daño generado al medio ambiente por la utilización desmedida de empaques, el objetivo de esta investigación es elaborar un material biodegradable con aplicación potencial para empaque a base de arroz quebrado y fibra de bagazo de caña, considerando el efecto que produce la longitud de fibra y la aplicación del tratamiento alcalino en su resistencia mecánica.

3.2 Materiales y Métodos

3.2.1 Materiales.

Se utilizó bagazo de caña donado por el ingenio azucarero de Casasano “La abeja” y arroz quebrado adquirido en el molino de arroz “Buenavista”, ambos ubicados en Cuautla, Morelos, México. Se utilizó glicerina con 99.5% de pureza como plastificante, hidróxido de sodio (NaOH) con peso molecular de 40.00 para el tratamiento alcalino, ácido acético glacial con 99.7% de pureza para neutralizar la fibra después del tratamiento alcalino y ácido oléico utilizado como desmoldante del biocompuesto.

3.2.2 Lugar de experimentación.

El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio de Materiales Biológicos del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México.

El bagazo de caña y el arroz quebrado se almacenaron a una temperatura de 4 °C hasta su uso y todas las etapas del experimento se realizaron a temperatura ambiente, 22 ± 2 °C.

3.2.3 Diseño del experimento

Se utilizó un diseño experimental con asignación de tratamientos al azar con dos factores de estudio, tratamiento alcalino con dos niveles (con y sin) y longitud de fibra de bagazo de caña con tres niveles (1.00, 0.50 y 0.25 mm). Cada

tratamiento fue evaluado en cinco probetas para cada prueba mecánica y en cinco probetas para las pruebas de contenido de humedad y absorción de agua.

3.2.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se condujo de acuerdo con el diseño experimental. Se realizó un análisis de la varianza simple y multifactorial para identificar el efecto de los factores sobre las propiedades mecánicas. Se realizó una prueba de comparación de medias (Tukey, 0.05).

3.2.5 Preparación de la fibra

El desmedulado del bagazo de caña se realizó por el método de suspensión (Lois, 1982) utilizando un tamiz de malla de 4mm, colocando los haces fibrosos en un recipiente para su secado a temperatura ambiente hasta peso constante. Una vez seca, se separó la porción de fibras a las que se les aplicó el tratamiento alcalino, éstas fueron sumergidas en una solución acuosa de NaOH al 5% a 90 °C por 3 horas (Ibrahim *et al*, 2014) para al final ser enjuagadas repetidas veces hasta que alcanzó un pH de 7. Previo a los últimos enjuagues, se sumergieron en ácido acético al 5% para retirar cualquier residuo de NaOH de la superficie de las fibras, finalmente la fibra tratada se secó a temperatura ambiente hasta peso constante.

Posteriormente la fibra con tratamiento alcalino (CTA) y sin tratamiento alcalino (STA) se trituraron con un molino para café KRUPS F203 y se colocaron sobre un tamiz vibratorio RETSCH AS 200 a una frecuencia de 70 Hz durante 10 min para obtener las diferentes longitudes de fibra.

3.2.6 Preparación del arroz quebrado

El arroz fue molido en un molino de muestras Tecator Cyclotec 1093 y posteriormente se colocó en un tamiz vibratorio RETSCH AS 200 a una frecuencia de 70 Hz durante 10 min para obtener un tamaño de partícula de 250 µm.

3.2.7 Elaboración del biocompuesto

Se mezclaron agua (50 ml) y glicerina (2 ml) en un agitador magnético con calentamiento Cimarec+ SP88857100 a 150 °C y 300 RPM, se agregó a la mezcla el polvo de arroz (36 g) y una vez que ésta alcanzó el punto de gel se añadió 5 g de fibra de bagazo de caña, se mezcló hasta que se integró completamente. Se colocó la mezcla en moldes previamente recubiertos con ácido oleico para facilitar el desmolde, y se introdujo en un horno de aire caliente Riossa H-33 a 100°C durante 60 minutos. Posteriormente, se aplicó sobre los moldes una presión de 30 kPa a temperatura ambiente ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) durante 24 horas para compactar la probeta. Finalmente se colocaron los moldes en el horno a una temperatura de 100°C durante 40 minutos y se enfriaron a temperatura ambiente. Se realizó el mismo procedimiento para los seis tratamientos.

3.2.8 Pruebas mecánicas del biocompuesto

Resistencia a la Tracción

Se realizaron pruebas de tracción de acuerdo a la norma ASTM D3039 en una máquina universal de ensayos mecánicos INSTRON modelo 3382 a una velocidad de $4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, con probetas de dimensiones de 250 x 25 x 4 mm. Las probetas se sujetaron entre las mordazas de la máquina cubriendo 75 mm en cada extremo de la probeta, la carga de tracción se aplicó hasta la ruptura en un tramo de 50 mm.

Resistencia a la flexión

Utilizando probetas de dimensiones de 100 x 13 x 4 mm y una distancia entre soportes de 75 mm, de acuerdo con la norma ASTM D7264, se realizaron pruebas de flexión a tres puntos. En una máquina universal de ensayos mecánicos INSTRON modelo 3382 a una velocidad de $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ se aplicó carga hasta la ruptura.

Resistencia a la compresión

Se utilizaron probetas de 25 x 25 x 4 mm para realizar pruebas de compresión según la norma ASTM D3410. La probeta se colocó entre los platos de compresión de la máquina universal INSTRON aplicando una carga compresiva hasta la ruptura sobre un tramo de 25 mm a una velocidad de 3 mm*min⁻¹.

3.2.9 Contenido de humedad

Se secaron probetas de dimensiones de 100 x 13 x 4 mm a 105 °C hasta peso constante, se registró el peso antes (M1) y después (M2) del secado para calcular el contenido de humedad con la Ecuación 1 (Jumaidin *et al*, 2017).

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{M1 - M2}{M2} * 100 \dots (1)$$

3.2.10 Absorción de agua

La absorción de agua del biocompuesto se determinó al sumergir probetas previamente secadas a 90 °C hasta peso constante (P1) en 60 ml de agua a temperatura ambiente, según lo reporta la literatura (Guleria *et al*, 2018), durante intervalos de tiempo de 1 hora. Al retirarlas del agua se limpiaron con un paño de algodón y se registró nuevamente el peso (P2). El porcentaje de absorción de agua se calculó mediante la Ecuación 2.

$$\% \text{ de absorción de agua} = \frac{P1 - P2}{P1} * 100 \dots (2)$$

3.2.11 Biodegradabilidad

El porcentaje de biodegradabilidad del biocompuesto se determinó a partir del método de enterramiento en el suelo (Franco *et al*, 2004). Se enterraron probetas de 100 x 13 x 4 mm en un suelo con un pH de 6 y 40 % de materia orgánica (base peso seco) a una profundidad de 8 cm. La temperatura se mantuvo a 22 ± 2 °C y el contenido de humedad en el suelo se mantuvo en un rango de 30 a 40% al agregar 500 ml de agua por cada 1500 g de suelo cada 3 días (Guleria *et al*, 2018; Wang *et al*, 2017; Ibrahim *et al*, 2014). Antes de enterrar las probetas se secaron en un horno Riossa H-33 a 90 °C hasta peso constante y se anotaron

los pesos iniciales (P_i), después de intervalos de tiempo de 1 semana las probetas se limpiaron con agua y posteriormente se secaron a 90 °C hasta peso constante, finalmente se registró el peso final (P_f) para poder obtener el porcentaje de biodegradabilidad (Ecuación 3).

$$\% \text{ de biodegradabilidad} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \dots (3)$$

3.2.12 Análisis de microestructura

Las superficies de fractura por tensión de los biocompuestos se observaron con un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6390 a una aceleración de voltaje de 10 kV. Todas las muestras se cubrieron con oro-paladio en proporción 80-20 respectivamente, para inducir la conductividad.

3.3 Resultados y Discusión

3.3.1 Comportamiento mecánico del material

La resistencia mecánica de los biocompuestos es la principal característica que afecta la aplicación e inserción de un material a la industria del empaque debido a que los materiales elaborados con matrices termoplásticas de almidón carecen de buenas propiedades mecánicas (Xie *et al*, 2018), sin embargo, la resistencia mecánica a la tracción del compuesto B3 (cuadro 1) resultó estar ligeramente por debajo de algunos plásticos comúnmente utilizados en el sector de empaque, tales como el polietileno de baja densidad (5 a 13 MPa), polietileno lineal de baja densidad (13 a 27 MPa), compuesto flexible de policloruro de vinilo (8 a 24 MPa) y considerablemente superior a los plásticos expansibles tales como poliestireno expansible (0.134 MPa), polipropileno expansible (0.363 MPa) y polietileno expansible (0.275 MPa) (IMPI, 2000), de tal manera que dicho biocompuesto es una propuesta prometedora como material de empaque.

De forma general, los factores de tratamiento alcalino de la fibra y longitud de ésta, influyen significativamente en la resistencia mecánica del material, ocasionando diferencias estadísticas en las probetas evaluadas (Cuadro 1). Los

compuestos con longitud de fibra corta y con la aplicación de tratamiento alcalino mostraron una mayor resistencia mecánica, lo que se atribuye a una mejor transferencia de esfuerzos.

Cuadro 1: Comparación de medias de resistencia a la compresión (RC), resistencia a la tracción (RT), resistencia a la flexión (RF), módulo de Young (MY) y contenido de humedad (CH) de seis tipos de compuestos elaborados con bagazo de caña. (media $\pm$ desv. est., n=5)

Tratamiento alcalino	Longitud de fibra (mm)	RC, MPa	RT, MPa	RF, MPa	MY, MPa	CH, %
STA	1.00	2.63 $\pm$ 0.21 d	2.06 $\pm$ 0.13 c	6.88 $\pm$ 0.63 b	33.98 $\pm$ 6.86 c	8.47 $\pm$ 1.30 a
	0.5	3.41 $\pm$ 0.16 d	2.84 $\pm$ 0.16 b	7.44 $\pm$ 0.78 ba	44.59 $\pm$ 8.49 c	8.33 $\pm$ 1.11 a
	0.25	5.18 $\pm$ 0.39 c	2.31 $\pm$ 0.13 c	7.52 $\pm$ 0.78 ba	65.85 $\pm$ 4.78 cb	7.89 $\pm$ 0.00 a
CTA	1.00	8.02 $\pm$ 0.64 b	2.31 $\pm$ 0.20 c	4.66 $\pm$ 0.62 c	91.83 $\pm$ 13.21 b	8.38 $\pm$ 0.11 a
	0.5	7.00 $\pm$ 0.70 b	3.46 $\pm$ 0.35 a	6.90 $\pm$ 1.17 b	87.07 $\pm$ 27.10 b	8.81 $\pm$ 1.45 a
	0.25	10.94 $\pm$ 1.37 a	3.88 $\pm$ 0.32 a	8.68 $\pm$ 0.48 a	165.96 $\pm$ 32.07 a	8.39 $\pm$ 2.25 a

STA = sin tratamiento alcalino, CTA = con tratamiento alcalino, n = tamaño de muestra. Medias con la misma letra dentro de cada columna, no difieren significativamente (Tukey, 0.05).

3.5.2 Propiedades de tracción

Se observó que la resistencia a la tracción y el módulo de Young aumentan en los biocompuestos que tienen fibra con tratamiento alcalino (CTA, Cuadro 2), esto es debido a que al remover parte de la lignina de las fibras, se modifica químicamente su superficie y aumenta la irregularidad de la misma, ocasionando una mejora en el enlace interfacial fibra-matriz (Saba *et al*, 2015). De igual forma, Wang *et al*, 2017 sugieren que una buena adhesión fibra-matriz resultará en un incremento en el esfuerzo de tracción, debido a la similitud química en la estructura de ambos polisacáridos (celulosa y almidón), ya que dichos polímeros interactúan a través de puentes de hidrógeno formando una red rígida que incrementa el esfuerzo de tensión.

Por otro lado, hay una tendencia en el incremento de la resistencia a la tracción en compuestos con menor tamaño de partícula (Cuadro 1).

La mejora en el esfuerzo de tracción en compuestos con tratamiento alcalino de la fibra y con menor longitud de ésta, concuerda con lo reportado en la literatura

(Saba *et al*, 2015; Wang *et al*, 2017; Guleria *et al*, 2018; Prachayawarakorn *et al*, 2010) y se atribuye a una mejor transferencia de esfuerzos de la matriz hacia la fibra.

Cuadro 2: Efectos principales del tratamiento y la longitud de la fibra sobre la resistencia a la compresión (RC), resistencia a la tracción (RT), resistencia a la flexión (RF) y módulo de young (MY) de seis tipos de compuestos elaborados con bagazo de caña.

Factor	RC (MPa)	RT (MPa)	RF (MPa)	MY (MPa)
Tratamiento alcalino (TA)				
STA	3.74 b	2.40 b	7.28 a	48.14 b
CTA	8.65 a	3.22 a	6.75 a	114.96 a
Longitud de fibra (LF)				
L1	5.32 b	2.18 b	5.77 c	62.97 b
L2	5.20 b	3.15 a	7.17 b	65.83 b
L3	8.06 a	3.09 a	8.10 a	115.91 a
TA * LF	**	***	***	*

Niveles factor: STA = sin tratamiento alcalino, CTA = contratamiento alcalino. la misma letra dentro de cada columna no difieren significativamente (Tukey, 0.05). Niveles de significancia estadísticos (* = $P \leq 0.1$, ** = $P \leq 0.05$, *** = $P \leq 0.01$).

3.3.3 Propiedades de compresión

Los compuestos reforzados con fibra CTA, mostraron una mayor resistencia a la compresión que aquellos STA, siguiendo la misma dirección que en la prueba a la tracción, por lo que el comportamiento obtenido puede explicarse de manera similar. De igual manera, se observa que existen diferencias significativas entre los biocompuestos con diferente longitud de fibra, donde la longitud de fibra de 0.25 mm ocasionó una mayor resistencia a compresión que las longitudes de 0.50 y 1.00 mm (Cuadro 2). La menor resistencia a compresión en bicompuestos reforzados con fibra de mayor longitud se atribuye a que en éstos se tiene una mayor porosidad que en aquellos con menor longitud de fibra, y en diversas investigaciones se reportó que el incremento en la porosidad resulta en una disminución de la resistencia mecánica en diferentes biocompuestos reforzados con fibras naturales de okra, algodón, lino y palma datilera (Ibrahim *et al*, 2014, Guleria *et al*, 2018; Prachayawarakorn *et al*, 2010).

3.3.4 Propiedades de flexión

Los resultados del ensayo de flexión muestran diferencias significativas entre los tres tamaños de longitud de fibra; para este caso, la resistencia mecánica del biocompuesto está fuertemente determinada por la longitud de la fibra, siendo más resistente con fibra de longitud más corta (0.25 mm) (Cuadro 2).

Contrario a los resultados obtenidos en la prueba de tracción y compresión, en la prueba de flexión no se encontraron diferencias significativas en la aplicación del tratamiento alcalino de las fibras.

Sin embargo, a pesar de no existir diferencias significativas en la aplicación del tratamiento alcalino, el compuesto con tratamiento alcalino y menor longitud de fibra resultó ser el más resistente de todos (Cuadro 1), lo que concuerda con los resultados de compresión y tracción. La resistencia flexión fue superior a la de tracción, lo que concuerda con lo obtenido por otros autores como Guleria *et al* (2018) y Morgan (2005).

3.3.5 Contenido de humedad

El contenido de humedad de los biocompuestos se muestra en el Cuadro 1, a pesar de que se observan ligeras variaciones entre tratamientos, no hubo diferencias significativas entre ninguno de ellos.

3.3.6 Absorción de agua

Se observa que el compuesto sin tratamiento alcalino y con longitud de fibra de 0.25mm absorbió menos agua, mientras que el compuesto sin tratamiento alcalino y con longitud de fibra de 1.00 mm absorbió más agua (Figura 1), lo que sugiere que en compuestos con fibra STA, mientras más corta sea la longitud de ésta, menos agua absorbe. Los compuestos con fibra CTA manifestaron una absorción de agua más lenta; los materiales elaborados con fibra STA absorbieron más del 60% de agua en las primeras horas, mientras que los compuestos con fibra CTA se mantuvieron por debajo de esta cifra

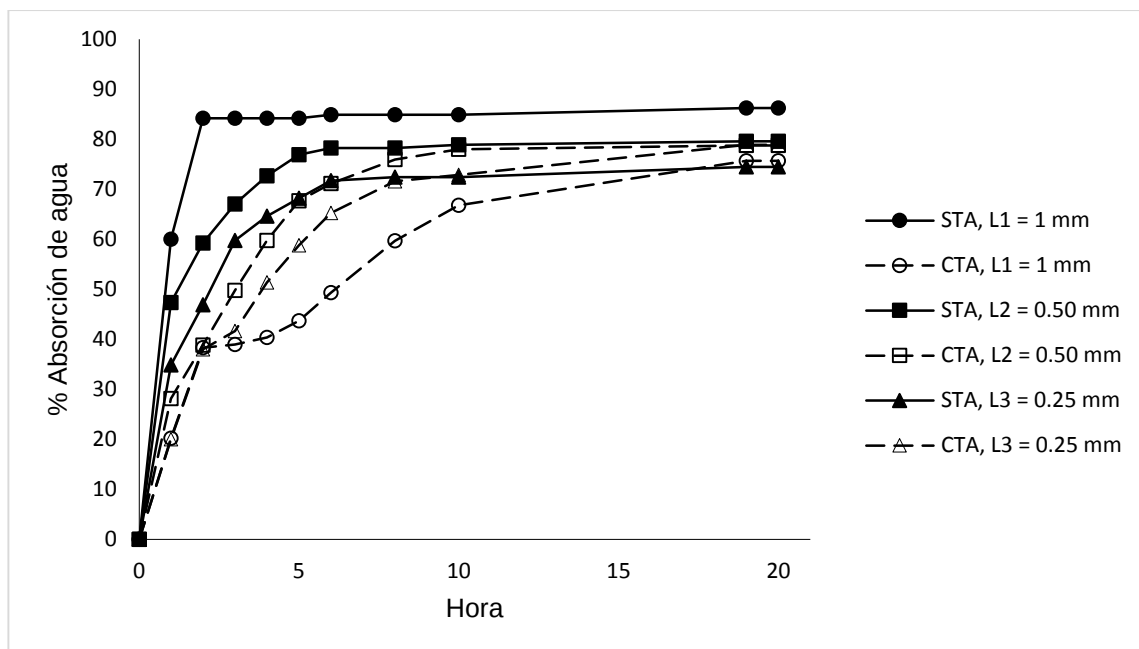


Figura 6: Absorción de agua (humedad, base seca) de compuestos con fibra sin tratamiento alcalino (STA) y con tratamiento alcalino (CTA), con tres longitudes de fibra (L1=1.00 mm, L2=0.50 mm y L3=0.25 mm).

3.3.7 Biodegradabilidad

Se observa que la diferencia en el porcentaje de biodegradabilidad en los compuestos STA es mínima, sin embargo, es claro que los compuestos CTA presentan un porcentaje de biodegradabilidad menor a los compuestos STA (Figura 2), este fenómeno puede ser atribuido a que el tratamiento alcalino mejora el enlazamiento interfacial fibra-matriz, produciendo una red fuerte que reduce el acceso de agua y microflora del suelo, resultando en una mayor resistencia a la degradación (Guleria *et al*, 2018; Franco *et al*, 2004).

Por otro lado, los compuestos elaborados con fibra de longitud corta (0.25 mm) tanto en los compuestos CTA y STA, presentaron un menor porcentaje de biodegradabilidad.

La Figura 2 muestra que la tasa de degradación de todas las muestras es mayor en la primera semana, dicho comportamiento puede ser atribuido a que al degradarse primero el almidón se pierde la integridad estructural del biocompuesto (Ibrahim *et al*, 2014; Wan *et al*, 2009), formando agujeros o canales que favorecen la entrada de microorganismos presentes en el suelo, ocasionando que la tasa de degradación aumente rápidamente en los primeros días (Franco *et al*, 2004).

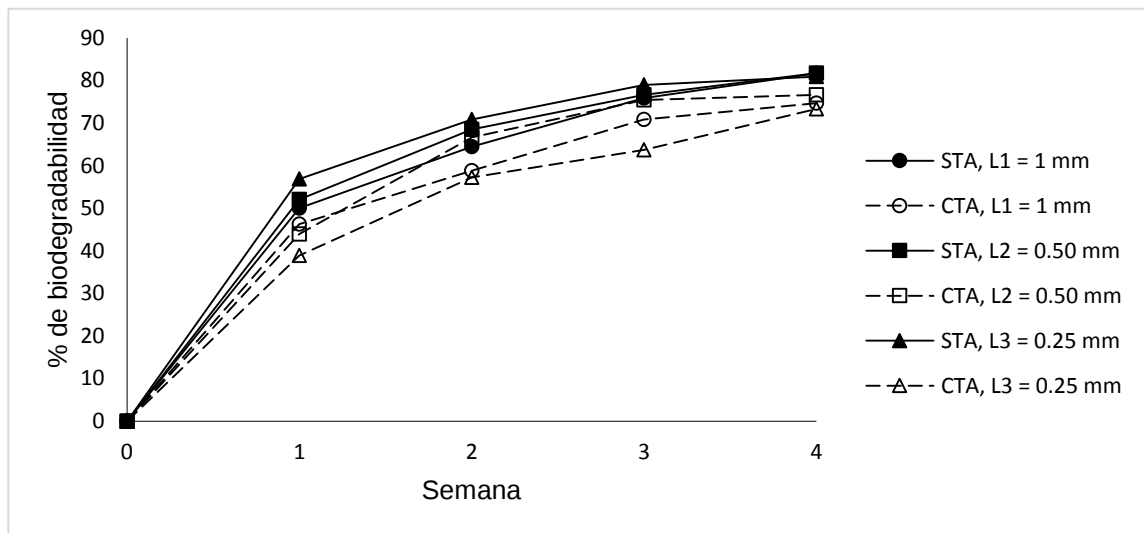


Figura 7: Biodegradabilidad de compuestos con fibra con tratamiento alcalino (B) y sin tratamiento alcalino (A), con tres longitudes de fibra (1mm, 0.5mm y 0.25mm).

3.3.8 Análisis de microestructura

El análisis de microestructura muestra la morfología de la superficie de fractura de los compuestos sin tratamiento alcalino y 1.00 mm de longitud de fibra (Figura 3a), sin tratamiento alcalino y 0.25 mm de longitud de fibra (Figura 3b) y con tratamiento alcalino y 0.25 mm de longitud de fibra (Figura 3c), en los cuales se presentan diferentes mecanismos de falla, de la matriz, de la interfaz fibra matriz y de las fibras (Ibrahim *et al*, 2017). En todos los compuestos se observa la

fractura de fibras, lo cual sugiere una buena transferencia de esfuerzos de la matriz a las fibras (Jumaidin et al, 2017).

Sin embargo, en la Figura 3 (a,b) se observan fallas en la interfaz fibra matriz, debido a una pobre adherencia interfacial, por otro lado en la Figura 3c se observa una buena adhesión entre fibra-matriz, lo cual sugiere que en compuestos con fibra CTA hay una mejor adherencia entre fibra-matriz, lo cual concuerda con resultados obtenidos en otras investigaciones (Wang et al, 2017; Ibrahim et al, 2014; Xie et al, 2018).

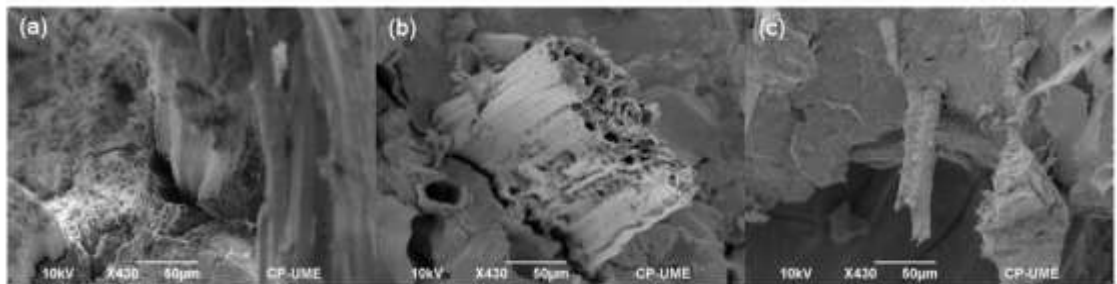


Figura 8: Micrográficas electrónicas de barrido: a) biocompuesto sin tratamiento alcalino y longitud de fibra de 1mm; b) biocompuesto sin tratamiento alcalino y longitud de fibra de 0.25 mm; c) biocompuesto con tratamiento alcalino y longitud de fibra de 0.25 mm.

3.4 Conclusiones

Se elaboraron exitosamente los biocompuestos formados con arroz quebrado y fibra de bagazo de caña, de los cuales el biocompuesto con tratamiento alcalino y longitud de fibra de 0.25 mm resultó ser el más resistente de todos los tratamientos, igualmente presentó propiedades mecánicas superiores a las de los plásticos expansibles utilizados en la industria del empaque, por lo que el material elaborado es una propuesta sustentable para dicho sector.

Los biocompuestos elaborados presentaron buena biodegradación. El porcentaje de peso perdido del biocompuesto con tratamiento alcalino y longitud de fibra de 0.25 mm fue de 73.33% después de cuatro semanas. Las pruebas mecánicas

muestran que el tamaño de longitud de la fibra es un factor que influye significativamente en la resistencia mecánica del material, siendo más resistente con una longitud menor. De igual forma las propiedades mecánicas de los biocompuestos elaborados con fibra con tratamiento alcalino resultaron ser más resistentes que aquellos elaborados con fibra sin tratamiento alcalino. En general, los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas indican que hay una mejor transferencia de esfuerzos entre fibra – matriz en aquellos compuestos elaborados con fibra con tratamiento alcalino y con menor tamaño de partícula de ésta.

3.5 Literatura citada

Aguilar, N. (2011). Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel. En *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XII, núm. 2, pp. 189- 197. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v12n2/v12n2a8.pdf>

Becerra, A. Buitrago, A. Pinto, P. (2016). Sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. En *Ingeniería Solidaria*, vol. 12, n.º 20, pp. 133-149, oct. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v12i20.1548>

Cruz, R; Martínez, Y; López, A. (2013). “Biopolímeros y su integración con polímeros convencionales como alternativa de empaque de alimentos”. En: *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 7-2: p. 42-52. Recuperado de: <http://web.udlap.mx/tsia/files/2014/12/TSIA-72-Cruz-Morfin-et-al-2013.pdf>

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2017). Bases de datos estadísticos. FAOSTAT. Recuperado de: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>

Franco,C; Cyras, V; Busalmen, J; Ruseckaite, R; Vázquez, A. (2004). Degradation of polycaprolactone/starch blends and composites with sisal fibre. En *Polymer Degradation and Stability* 86. p. 95- 103. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.02.009>

Guleria, G; Singh, A; Rana, R. (2018). Mechanical, Thermal, Morphological, and Biodegradable Studies of Okra Cellulosic Fiber Reinforced Starch-Based Biocomposites. *Advances in Polymer Technology*, Vol. 37, No. 1. Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adv.21646>

Ibrahim, H; Farag, M; Megahed, H; Mehanny, S. (2014). Characteristics of starch-based biodegradable composites reinforced with date palm and flax fibers. *Carbohydrate Polymers* 101 (2014) 11– 19. Doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.051>

Instituto Mexicano del Plástico Industrial (IMPI). (2000). Enciclopedia del plástico, Tomo I. México: Autor.

Jumaidin, R; Sapuan, S.M; Jawaid, M; Ishak, M.R; Sahari, J. (2017). Thermal, mechanical, and physical properties of seaweed/sugar palm fibre reinforced thermoplastic sugar palm Starch/Agar hybrid composites. *International Journal of Biological Macromolecules* vol. 97 p. 606–615. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.079>

Lois, J. (1982). Sistemas y equipos de desmedulado en la industria del bagazo de la caña de azúcar. La Habana, Cuba: Editorial Científico-Técnica.

Loubes, M. Tolaba, M. (2013). “Arroz: rendimiento de molienda mediante análisis de imágenes”. En: La alimentación Latinoamericana. No. 308. p. 44-49. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/318429753>

Morgan, P. (2005). *Carbon fibers and their composites*. USA: Taylor and Francis Group.

Lozoya, L; Vélez, C; Turcott, D; Cuevas, G. (2007). Diagnóstico, evaluación y propuesta de gestión al sistema de manejo de los residuos sólidos generados dentro de un área natural protegida. En: *Encuentro de expertos en residuos sólidos en México*. p. 79-90. ISBN 970-735-075-X.

Pérez, M; Sánchez, R; Palma, D; Salgado, S. (2011). Caracterización química del compostaje de residuos de caña de azúcar en el sureste de México. En *Interciencia* vol. 36 nº 1. Recuperado de: <https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2018/01/045-c-1%C2%BA-SANCHEZ-HERNANDEZ-8.pdf>

Prachayawarakorn, J; Sangnithidej, P; Boonpasith P. (2010). Properties of thermoplastic rice starch composites reinforced by cotton fiber or low-density polyethylene. *Carbohydrate Polymers* vol. 81 p. 425–433. doi:10.1016/j.carbpol.2010.02.041

Ramírez, M.G; Satyanarayana, K; Iwakiri, S; Muniz, G; Tanobe, V; Flores, T.H. (2011). Study of the properties of biocomposites. Part I. Cassavastarch-green coir fibers from Brazil. *Carbohydrate Polymers*. Vol. 86 p. 1712-1722. doi: 10.1016/j.carbpol.2011.07.002

Saba, N; Pariadah, M.T; Jawaid, M. (2015). Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review. *Construction and Building Materials*. Vol. 76 p. 87–96. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.043>

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2017). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Producción nacional de caña de azúcar. Recuperado de: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2018). Artículos, la producción de caña de azúcar. Recuperado de:

<https://www.gob.mx/siap/articulos/la-produccion-de-cana-de-azucar-supera-las-55-millones-de-toneladas-en-2018?idiom=es>

Tamayo, E. Sarasty, O; Mosquera, E. (2017). "Aprovechamiento de residuos ligno-celulósicos en la elaboración de empaques secundarios ecológicos". En: Revista Industrial Data 20(2): 37-42. DOI: <http://dx.doi.org/10.15381/idata.v20i2.13959>

Valero, M; Ortégón, Y; Uscategui, Y. (2013). "Biopolímeros: avances y perspectivas". En: Dyna, vol. 80, núm. 181, pp. 171-180. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/20642/45329>

Villada, H; Acosta, H; Velasco, R. (2007). "Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables". En: Temas agrarios, Vol. 12: (2), p. 5-13. Recuperado de: <https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/652>

Wan, Y.Z; Luo, H; He, F; Liang, H; Huang, Y; Li, X.L. (2009). Mechanical, moisture absorption, and biodegradation behaviours of bacterial cellulose fibre-reinforced starch biocomposites. *Composites Science and Technology* vol. 69 p. 1212–1217. doi:10.1016/j.compscitech.2009.02.024

Wang, P; Chen, F; Zhang, H; Meng, W; Sun, Y; Liu, C. (2017). Large-scale preparation of jute-fiber-reinforced starch-based composites with high mechanical strength and optimized biodegradability. *Starch/Stärke*, 69, 1700052. Recuperado en 22 de Octubre de 2018 de: www.starch-journal.com

Xie, Q; Li, F; Li, J; Wang, L; Li, Y; Zhang, C; Xu, J; Chen, S. (2018). A new biodegradable sisal fiber–starch packing composite with nest structure. *Carbohydrate Polymers* 189 56–64. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.063>