

 Universidad Pontificia Bolivariana	PRESENTACIÓN INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	VICERRECTORIA ACADÉMICA FO-IP-007
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------	------------------------------------------

INFORMACION GENERAL

Título del proyecto	Desarrollo de un material compuesto a partir de la cascarilla de arroz (<i>Oryza sativa</i>) y harina de yuca (<i>Manihot esculenta</i>) como alternativa de aprovechamiento del subproducto arrocero.
Estudiantes de Trabajo de Grado	Luis Alfonso Tenorio Quintero Yesit Abel Martínez Fuentes
Director(es)	PhD. Carmen Elena Pérez Cervera
Unidad académica	
Institución donde realizará el proyecto	Universidad Pontificia Bolivariana
Fecha de inicio	15 de junio de 2018
Fecha de finalización	7 de abril de 2019
Costo total del proyecto (incluyendo descargas – pago de personal -).	\$16.817.848,27
Montos de contrapartida (Entidad o dependencia que cofinancia).	\$0
Línea de trabajo o área del conocimiento en la cual se inscribe el proyecto.	Investigación y desarrollo de nuevos materiales.

DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO A PARTIR DE LA CASCARILLA DE ARROZ (*ORYZA SATIVA*) Y HARINA DE YUCA (*MANIHOT ESCULENTA*) COMO ALTERNATIVA DE APROVECHAMIENTO DEL SUBPRODUCTO ARROCERO.

LUIS ALFONSO TENORIO QUINTERO
YESIT ABEL MARTÍNEZ FUENTES

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
AGROINDUSTRIAL

DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN

PhD. CARMEN ELENA PÉREZ CERVERA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
MONTERÍA – CÓRDOBA

2019

DEDICATORIAS/ AGRADECIMIENTOS

"El futuro depende de lo que decidas hacer hoy". Gandhi

Esta investigación se la dedico primeramente a Dios que ha permitido que cumpla el sueño de ser un ingeniero agroindustrial y así contribuir con el avance de nuestra sociedad.

En segundo lugar y no menos importante, esta obra se la dedico a mis padres, mis hermanos, mi pareja, compañeros de facultad y a nuestra directora de tesis, Carmen Elena Pérez, quienes han apoyado y motivado incansablemente para que se hiciese realidad.

Así como también, agradezco la colaboración de la ingeniera Arlet Franco y del ingeniero Luis Espitia, sin olvidar a las ingenieras Nayra Alvarino e Ibeth Cepeda, que juntos han aportado a este trabajo sus consejos, enseñanzas y demás conocimientos.

Luis Alfonso Tenorio Quintero

Primero que todo darle las gracias a Dios que me dio muchas oportunidades de vida para ser un siervo de su rebaño, quien me colmó de fe y me guió durante todo este camino que hoy culmina, a mis padres quienes fueron mi motivación y admiración para lograr éste y muchos logros más, a mis abuelas a quienes les debo su apoyo y colaboración incondicional en cada momento de mi vida con su amor.

Agradezco especialmente a la ingeniera Carmen E. Pérez por este proyecto, del cual aprendí con buenos principios a materializarlo, por contribuir a mi formación como ingeniero agroindustrial y, sobre todo, como persona conocedora de Dios. Sin duda alguna, destaco la contribución de las ingenieras Ibeth Cepeda, Nayra Alvarino y Arleth Franco por estos años de enseñanza, las cuales les agradezco, además por las correcciones que aportaron a mi educación y a mi crecimiento como ingeniero. Agradezco a mis amistades las cuales hicieron un valioso aporte para que este sueño se materializara.

Gracias del amigo de todos... **Yesit Martínez Fuentes.**

CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT.....	10
Introducción.....	11
1. MARCO TEÓRICO/ESTADO DEL ARTE	13
1.1. Polímeros como material de empackado	14
1.1.1. Polímeros biodegradables	14
1.2. Métodos de fabricación de materiales de empaque.....	15
1.2.1. Extrusión.	15
1.2.2. Moldeo por inyección.....	16
1.2.3. Moldeo por compresión.....	17
1.2.4. Termoformado.....	17
1.3. Propiedades mecánicas en los materiales de empaque.....	19
1.4. Tendencias de los materiales de empaque.....	20
1.5. Aditivos.	21
1.5.1. Plastificantes.	22
1.6. Patentes de los biomateriales	22
1.7. Uso de fibras en materiales de empackado	23
1.7.1. Cascarilla de arroz.....	24
1.8. Materiales basados en harinas	25
2. METODOLOGÍA	27
2.1. Materiales.....	27
2.1.1. Adecuación de la materia prima.	27
2.1.2. Obtención de harina de yuca.....	28
2.1.3. Aditivos y Plastificantes	28
2.2. Ensayos exploratorios.....	29
2.2.1. Ensayos exploratorios 1.	30
2.2.2. Ensayos exploratorios 2.	30
2.2.3. Ensayos exploratorios 3.	31
2.2.4. Ensayos exploratorios 4.	32

2.3. Determinación de los niveles y región experimental para la obtención de los materiales compuestos a partir de la cascarilla de arroz y harina de yuca	33
2.4. Ensayo de tensión.....	34
2.5. Determinación de la absorción de agua del material compuesto	37
2.6. Análisis Estadístico.....	37
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
3.1. Ensayos exploratorios	38
3.1.1. Ensayos exploratorios 1.	38
3.1.2. Ensayos exploratorios 2.	39
3.1.3. Ensayos exploratorios 3.	41
3.1.4. Ensayos exploratorios 4.	43
3.2. Ensayo de tensión.....	44
3.3. Determinación de la absorción de agua del material compuesto	45
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
4.1. Conclusiones.....	48
4.2. Recomendaciones.....	48
5. BIBLIOGRAFÍA	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Patentes de biomateriales para empaque. 23
Tabla 2. Formulaciones de pre- ensayos para definir compactación y viabilidad.. 32
Tabla 3. Corridas experimentales..... 33
Tabla 4. Dimensiones en mm (in) de la probeta de tipo IV (ASTM D638-14)..... 36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema básico de extrusión de polímeros.....	16
Figura 2. Vista lateral de molde de inyección.....	16
Figura 3. Esquema básico del moldeo por compresión.....	17
Figura 4. Vista lateral de molde de termoformado mecánico.	18
Figura 5. Esquema básico del termoformado al vacío.	18
Figura 6. Vista lateral del termoformado a presión.....	19
Figura 7. A: lavado con hipoclorito de sodio 1%; B: secado al sol; C: molienda; D: caracterización por tamaño de partícula; E: tamizado mecánico.	27
Figura 8. A: lavado con hipoclorito de sodio; B: secado a 60° C en horno; C: yuca troceada y seco; D: molienda de la yuca seca	28
Figura 9. Temperatura de la sandwichera previo al termoformado.	29
Figura 10. Moldeo previo al termoformado, empleando molde circular de 57mm de diámetro.	30
Figura 11. Moldeo previo al termoformado, con molde de 20 cm X 20 cm.	31
Figura 12. Obtención del material; A: ingredientes principales; B: mezcla seca; C: ingredientes de la mezcla líquida; D: mezclado final (seca + húmeda); E: termoformado y F: placa de material terminado.	34
Figura 13. Ensayo de tracción: A: máquina universal de ensayos MTS EXCEED modelo E45; B: probeta tipo IV, ASTM D638-14; C y D: ruptura por tensión en la probeta.	35
Figura 14. Dimensiones de probeta de tipo IV (ASTM D638-14)	36
Figura 15. Prueba absorción de humedad: A: muestras de 1 pulgada cuadrada; B y C: vista superior y vista lateral de las muestras; D: pesaje.	37
Figura 16. Material a base de almidón de yuca (50%) y cascarilla de arroz (50%): A: con 2.5% glicerol y B: con 5% glicerol.	38
Figura 17. Material a base de harina de yuca (50%) y cascarilla de arroz (50%) con 5% glicerol.....	39
Figura 18. Material compuesto con 20 minutos de termoformado.....	40
Figura 19. Material de la malla 40 con daño por hongos.....	40
Figura 20. Ensayos con irregularidades: A: cascarilla molida; B: malla 30; C: malla 50; D: malla 60.	42
Figura 21. Pre- ensayos (mezcla de los tamaños de partícula), A: 80% cascarilla de arroz, 20% Harina de yuca; B: 20% cascarilla de arroz, 80% harina de yuca ..	43
Figura 22. Materiales con cascarilla de malla 20, variando únicamente los aditivos glicerol, Tween 80 y aceite vegetal.	44
Figura 23. Esfuerzo de ruptura de los materiales compuestos y el poliestireno expandido (patrón).	45
Figura 24. Absorción de agua de los materiales compuestos en 6 horas.	46

RESUMEN

Se desarrolló un material compuesto a partir de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) como refuerzo fibroso, harina de yuca (*Manihot esculenta*) como aglutinante y glicerol como plastificante, mediante termoformado empleando una sandwichera doméstica. Antes de la delimitación experimental, se realizaron varios pre- ensayos exploratorios, inicialmente se evaluó la concentración de glicerol (2,5 y 5% con relación a la masa total) al emplear almidón nativo de yuca como material aglutinante. En otros ensayos se evaluó la harina de yuca, en sustitución del almidón, el efecto de diferentes tamaños de partículas para la cascarilla de arroz y el tiempo necesario para el termoformado. Luego de la delimitación experimental, a los materiales obtenidos se les determinó el esfuerzo de ruptura por tensión y la capacidad de absorción de agua. Los resultados mostraron que al emplear almidón y glicerol a 2,5 %, éste no alcanzaba a ser plastificado, lo que provocó migración del almidón a la superficie del material. Al realizar las pruebas con la harina de yuca y empleando 5% de glicerol, los materiales mostraron buena adhesión, sin migración de aglutinante, por lo que ésta fue seleccionada como material aglutinante para el resto del estudio. Se encontró que para lograr un material termoformado con el menor contenido de humedad libre se debía aplicar una temperatura de 190 °C por 50 min, para una masa de 400 g. Los mayores valores de esfuerzo a la ruptura lo alcanzaron los materiales elaborados con cascarilla de arroz molido con tamaños de partícula malla 20 o bien malla 40, a concentraciones de cascarilla de 50 y 60 %. Los materiales de estructura más compacta al tacto presentaron menor absorción de agua y mayor esfuerzo a la ruptura. Se espera que esta investigación contribuya al estudio del aprovechamiento de la cascarilla de arroz y la harina de yuca para la elaboración de materiales de envase, capaces de sustituir o minimizar el uso de materiales sintéticos.

Palabras clave: material compuesto, cascarilla de arroz, harina de yuca, ensayo de tensión y absorción de humedad.

ABSTRACT

A composite material was developed from the rice husk (*Oryza sativa*) as a fibrous reinforcement, cassava flour (*Manihot esculenta*) as a binder and glycerol as a plasticizer, by thermoforming using a domestic sandwich maker. Before the experimental delimitation, several exploratory tests were carried out, initially the concentration of glycerol (2.5 and 5% in relation to the total mass) was evaluated when using native starch from cassava agglutinating cassava. In other trials, cassava flour was evaluated, replacing starch, the effect of different particle sizes for rice husks and the time needed for thermoforming. After the experimental delimitation, the tensile stress and the water absorption capacity were determined to the materials obtained. The results showed that when starch and glycerol were used at 2.5%, it did not reach to be plasticized, which caused migration of the starch to the surface of the material. When testing cassava flour and using 5% glycerol, the materials showed good adhesion, without migration of binder, so it was selected as a binder material for the rest of the study. It was found that to achieve a thermoformed material with the lowest free moisture content, a temperature of 190 ° C should be applied for 50 min, for a mass of 400 g. The highest values of breaking stress were reached by materials made from ground rice husks with particle sizes of 20 mesh or 40 mesh, at concentrations of 50 and 60% husk. The materials of more compact structure to the touch presented lower absorption of water and greater effort to the rupture. It is hoped that this research will contribute to the study of the use of rice husk and cassava flour to produce packaging materials, capable of replacing or minimizing the use of synthetic materials.

Key words: composite material, rice husk, cassava flour, tension test and moisture absorption.

INTRODUCCIÓN

El estilo de vida y los hábitos de la sociedad moderna han incrementado el uso de recipientes plásticos desechables como vasos, platos y cubiertos, lo cual ha afectado en forma negativa el medio ambiente debido a la acumulación de estos residuos sólidos no biodegradables en los ecosistemas (Gómez, 2016). Asuntos como la producción y el consumo de plástico son preocupantes en el mundo moderno, se estima que, cada año 6,4 millones de toneladas de residuos sólidos contaminan el agua de los mares y de éstos entre el 60 y 80% son plásticos (Perilla, 2017).

En la actualidad se desarrollan materiales compuestos para disminuir el daño ambiental, éstos se están obteniendo a partir de fuentes renovables y de origen biológico, los cuales han demostrado ofrecer buenas propiedades mecánicas, degradándose fácilmente luego de ser usados bajo condiciones adecuadas de temperatura, humedad y oxígeno sin dejar residuos tóxicos ni dañinos, convirtiéndose así en una alternativa ecológica frente al uso de materiales tradicionales como el metal, vidrio, papel, plástico, entre otros (Majid, 2018). Cabe destacar que, la degradación se facilita por la acción de bacterias, levaduras y hongos (Sorrentino et al., 2007), produciendo al final: humus o fertilizantes orgánicos (Siracusa et al., 2008).

Por ende, con los materiales compuestos se han venido desarrollando diversos tipos envases y/o empaques, con funcionalidades comparables a los empaques plásticos no biodegradables, logrando aplicaciones comerciales exitosas, tales como, empaques de alimentos destacando el uso de la celulosa en la elaboración de empaques para huevos, bandejas de alimentos, bolsas para disposición de residuos, entre otros (Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Rosa, M., 2008). Algunos se han basado en el uso de fibras naturales de coco, banano, fique, lino, ramio, eucaliptus urograndis, hoja de piña, yute, sisal, palma aceitera etc. (Luna, Villada y Velasco., 2009). Dichas fibras han servido como refuerzo de matrices poliméricas basadas en almidón o harina de tubérculos, especialmente de yuca (*Manihot Esculenta*) el cual cumple la función de aglutinante y glicerol, sorbitol etc., como plastificantes, siendo estos los más empleados. (González, Salamanca, Vargas, 2018).

Otra de las fibras que podrían emplearse para la obtención de materiales compuestos es, la cascarilla de arroz, uno de los principales subproductos de la industria arrocera, la cual contiene una alta proporción de celulosa y sílice por lo que es aprovechada como combustible o para extraer la sílice para diversas aplicaciones industriales (Valverde, Sarria, Monteagudo. 2007). También es empleada como sustrato en hidroponía, camas para cría de aves y ganado en

general, obtención de compost y abonos, pero una gran cantidad deja de ser aprovechada por desconocimiento de los usos que se le puede dar (Aguilar, 2009). A pesar de todas las aplicaciones que ha tenido este subproducto, no se registran estudios de su uso en la elaboración de materiales compuestos. Por otra parte, En Colombia la producción de arroz paddy mecanizado, para el año 2018 alcanzó una producción de 1.020.738 ton (ENAM 2018), de las cuales aproximadamente el 20 % corresponde en mayor medida a la cascarilla del grano (Bouzón, 2015). Donde la cascarilla de arroz casi no se le da valor agregado, y solo de le dan los usos citados anteriormente.

En esta investigación se busca desarrollar un material compuesto a partir de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) como refuerzo fibroso y harina de yuca (*Manihot esculenta*) como material aglutinante; evaluando el esfuerzo de ruptura por tensión y capacidad de absorción de agua. Esta investigación se presenta como alternativa de agregación de valor para el aprovechamiento del subproducto de la industria arrocera, incentivando de esta forma la profundización en el estudio del uso de la cascarilla de arroz como materia prima principal para el desarrollo de materiales compuestos que, puedan sustituir o minimizar el uso de materiales sintéticos, tales como el poliestireno expandido, entre otros.

1. MARCO TEÓRICO/ESTADO DEL ARTE

Los procesos complejos de transporte, almacenamiento y distribución hacen necesario contar con un sistema de envase, empaque y embalaje eficaz para la protección del producto frente a los riesgos que se puedan presentar. Cada uno de estos sistemas cumple una función distinta. Así por ejemplo, los envases están destinados a contener productos para su posterior uso. Al mismo tiempo que, se encargan de individualizar, dosificar, conservar, presentar y describir a los productos, sin olvidar que éstos pueden estar elaborados con uno o más materiales distintos a la vez (López, 2013).

Otro concepto señala que el envase es un sistema de protección fundamental de los bienes o productos, que facilita su distribución, uso o consumo, asimismo hace posible su venta. Por lo tanto, se puede decir que “el envase protege lo que vende y vende lo que protege”, se caracteriza entonces por ser el “vendedor silencioso”, por ende, el envase es un mensaje directo que el producto envía al consumidor (López, 2013).

Por otra parte, el empaque tiene una concepción un poco distinta a la hora de emplearse como material para conservar, mostrar y vender productos alimenticios al consumidor. Se conoce al empaque por proteger el producto u otro envase, otorgándoles a ambos mayor presentación. Además, se le denomina envase secundario y se elaboran a partir de cualquier material que se adapte a las necesidades del mercado. Está diseñado para el transporte, almacenamiento y entrega al consumidor; también es útil para promocionar, diferenciar el producto o su marca, comunicar la información de la etiqueta al cliente (León, 2013).

En la actualidad, el material de empaque está orientado hacia el marketing, pues es la función gráfica del empaque la que toma especial importancia a la hora de comprar el producto, “esta función se establece con el fin de aumentar la venta del producto, distinguirlo junto a otros en un anaquel, consolidar una marca a la que pertenece y desarrollar una personalidad propia para el tipo de producto que busca vender” (Pérez, 2012).

Mientras que si se desea facilitar el transporte (vehículos terrestres, aéreos y marítimos) y almacenamiento en bodegas de un conjunto mayor a dos unidades, el embalaje como empaque terciario, es el indicado para mantener todo junto y protegido. Un embalaje cumple la función de envase o recipiente grande, en el que se introducen productos envasados, envueltos o productos sueltos (a granel), para su embarque y distribución. Se caracteriza por formar grupos grandes de productos empacados los cuales, la mayoría de las veces necesitan estibas y montacargas para ser transportados (Jolianis y García, 2010).

Uno de los materiales empleados ampliamente para la elaboración de envases, empaque y embalajes, es el plástico, el cual confiere las características necesarias para la función de cada uno de estos sistemas. Este es un polímero con excelentes propiedades mecánicas y de conservación; fácil de obtener, sobre todo los derivados petrolíferos (Jolianis y García, 2010).

1.1. Polímeros como material de envasado

Los polímeros son macromoléculas, conformados por eslabones orgánicos llamados monómeros, unidos mediante enlaces covalentes. Dichos monómeros están constituidos principalmente, por carbono y pueden poseer grupos laterales o radicales con uno o más átomos diversos (Hermida, 2011); se producen a partir de la polimerización, la cual es la reacción química donde se presenta la unión de miles de monómeros que pasan a formar parte de una larga cadena macromolecular (Hermida, 2011).

A nivel mundial, los polímeros en la industria tienen diferente participación, así, el plástico representa el 50% de los materiales de empaque, seguido del aluminio con el 30%, el vidrio con 15 % y papel con 5 % de participación. Donde el 99% del total de plástico se produce a partir de combustibles fósiles, lo que conlleva a una excesiva presión sobre las limitadas fuentes de energía no renovables. De modo que el impacto medioambiental que genera el plástico motiva a que se desarrollen nuevas tecnologías que aminoren la contaminación, como tecnologías para envases verdes (biodegradables) (Ballesteros, 2014).

1.1.1. Polímeros biodegradables

Son polímeros que se desintegran a raíz de un proceso de despolimerización accionada por factores medioambientales, tales como el contacto con el agua, la luz, microorganismos, enzimas y demás. A simple vista, todos los plásticos son biodegradables, sin embargo, la mayoría necesita las condiciones adecuadas y largos periodos de tiempo para desintegrarse (Ballesteros, 2014).

Por ende, cuando se habla de biodegradabilidad en la actualidad, se requieren polímeros que puedan degradarse en rellenos sanitarios y en tiempos no mayores de 12 semanas. En ese orden de ideas, los polímeros biodegradables pueden ser del tipo: fotodegradables, semi- biodegradables, biodegradables sintéticos y completamente biodegradables naturales (Ballesteros, 2014).

En ese sentido, la cascarilla de arroz pese a contener polímeros como la alfa celulosa (19,736%) y lignina (6,270%) (Vargas, Alvarado, Vega-Baudrit y Porras, 2013), en lo concerniente a degradación natural, algunos estudios indican que la biodegradación de la cascarilla de arroz se ve afectada en cierta medida al alto contenido de silicio (cerca del 17 %), elemento que la convierte en un subproducto de menor degradabilidad en comparación a otras fibras naturales (Prada y Cortés, 2010).

No obstante, en algunos trabajos se demostró que algunos organismos vivos se nutren de esta. Por tanto, su degradación es más lenta, de tal manera que si no se maneja adecuadamente puede llegar acumularse en el ambiente (Prada y Cortés, 2010). De lo anterior se resalta que, la degradación de la cascarilla puede parecer lenta, pero con los microorganismos y las condiciones adecuadas de compostaje, es más que suficiente para ser utilizada como material ecológico de envases, empaques y embalajes (Prada y Cortés, 2010).

Los materiales de envasado, empaquetado o embalado pueden requerir de una o varias técnicas de fabricación, en función de la aplicación final del material a utilizar, en el siguiente apartado se presentan los métodos más utilizados, haciendo énfasis en el termoformado para esta investigación.

1.2. Métodos de fabricación de materiales de empaque

Existen diferentes métodos para la elaboración de empaques, donde se destacan la extrusión, moldeo por inyección, moldeo por compresión, termoformado entre otros.

1.2.1. Extrusión.

La extrusión como técnica de moldeo aplica calor y presión continua a un polímero, fundiéndolo mientras que lo comprime y lo dosifica. La máquina extrusora lo moldea con la ayuda de una boquilla (dado) que le otorga el tamaño y la forma deseada. El empuje se genera por la acción giratoria de un husillo (tornillo sinfín) que gira concéntricamente en una cámara a temperaturas controladas denominada cañón (Figura 1) (AIMPLAS, 2011).

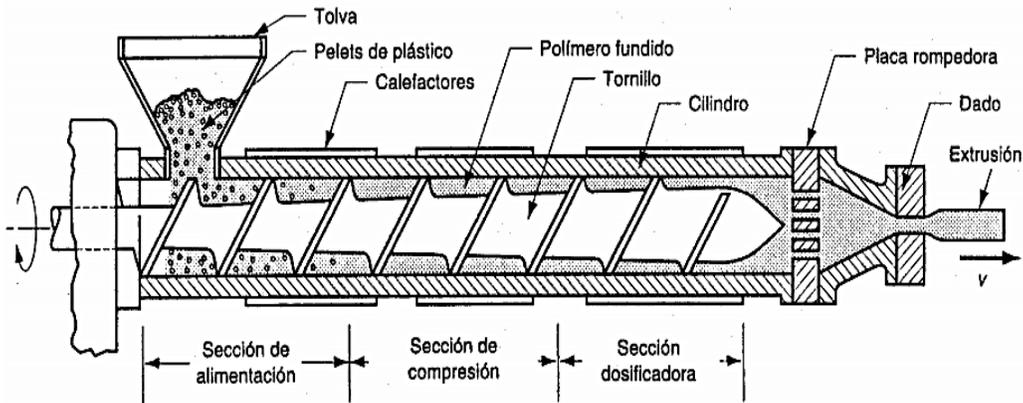


Figura 1. Esquema básico de extrusión de polímeros.

Fuente: (UP, 2018).

1.2.2. Moldeo por inyección.

Se estima que el 33% de las piezas de plástico se fabrican, mediante moldeo por inyección; este es un proceso industrial semicontinuo que se basa en inyectar un polímero, un metal o un material cerámico fundido, en un molde cerrado a presión (Prada y Acosta-Prado, 2017). Así, el molde al enfriarse solidifica el material en su interior obteniéndose la pieza con las dimensiones deseadas. Es normal que se haga uso de canales por donde el material fundido fluye hacia la cavidad del molde, por lo que se pueden encontrar rebarras y restos de material solidificado en mazarotas. (Figura 2) (Prada & Acosta-Prado, 2017).

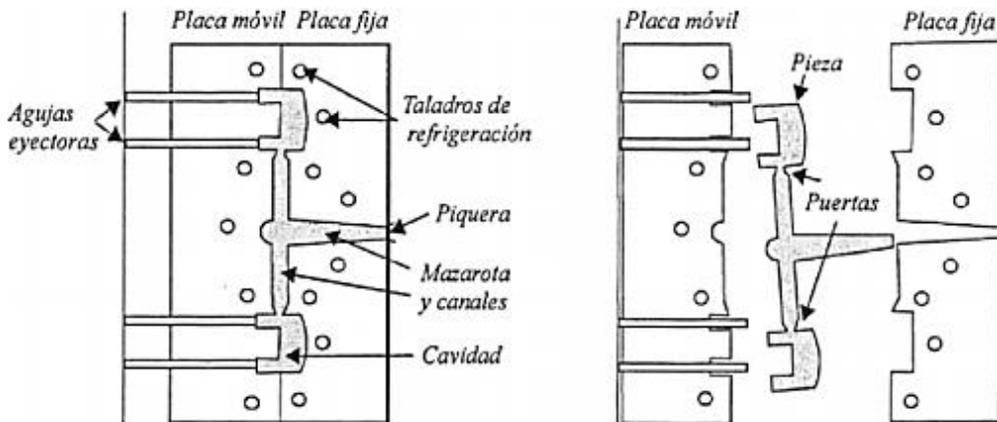


Figura 2. Vista lateral de molde de inyección.

Fuente Prada & Acosta-Prado (2017).

1.2.3. Moldeo por compresión.

Es el método de fabricación de piezas plásticas más antiguo y a la vez, el más sencillo a simple vista, consta de un lado con cavidad (molde hembra de una o más cavidades) y el otro que es lo opuesto, con protuberancias que le dan la forma a la pieza (PLENCO, 2009). Cuando el material está cargado en la cavidad o cavidades, el molde es cerrado teniendo en cuenta la fuerza de cierre dictada por el tamaño y número de piezas moldeadas. El molde se mantiene cerrado lo suficiente como para curar las piezas (Figura 3). Por lo general, la duración del proceso viene determinada por la sección transversal más gruesa en la pieza, la temperatura del material cargado en la cavidad y la temperatura del molde.

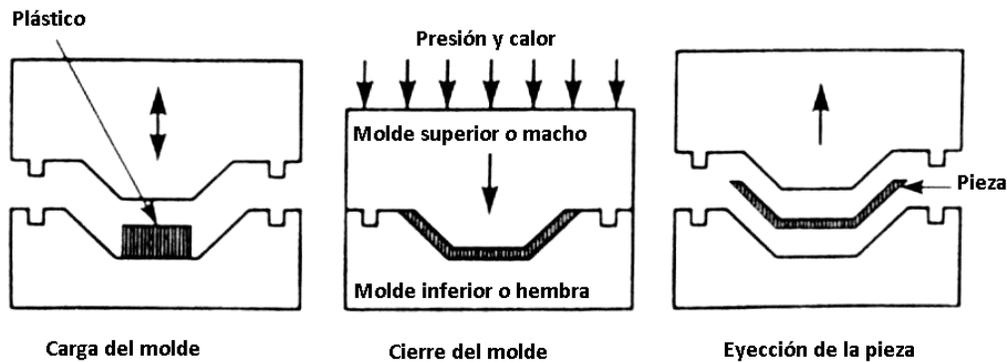


Figura 3. Esquema básico del moldeo por compresión.

Fuente; imagen recuperada de

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/moldeo-por-compresion.html>

1.2.4. Termoformado.

Según Díaz (2012), el termoformado es un proceso secundario, que se emplea para dar forma a una lámina de un termoplástico. Básicamente, consiste en solo dos pasos: calentamiento y formado. Para el calentamiento se emplean calentadores eléctricos en ambos lados de la lámina y posteriormente se le da la forma con un molde. A continuación, tres categorías de termoformado:

- Termoformado mecánico (Figura 4): que emplea dos moldes (positivo y negativo) que dan la forma final.

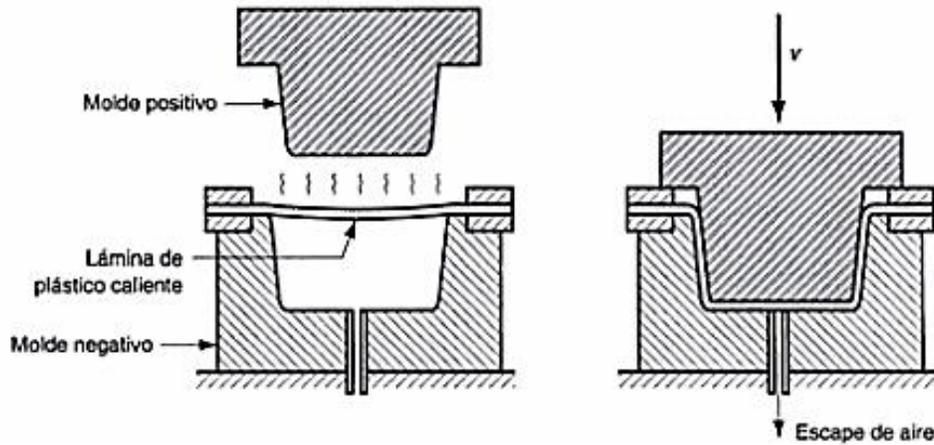


Figura 4. Vista lateral de molde de termoformado mecánico.

Fuente: Diaz (2012)

- Termoformado al vacío (Figura 5): se moldea el termoplástico por medio de presión de vacío que permite la adherencia de la lámina precalentada a la cavidad del molde, luego se endurece al contacto con la superficie fría del molde.

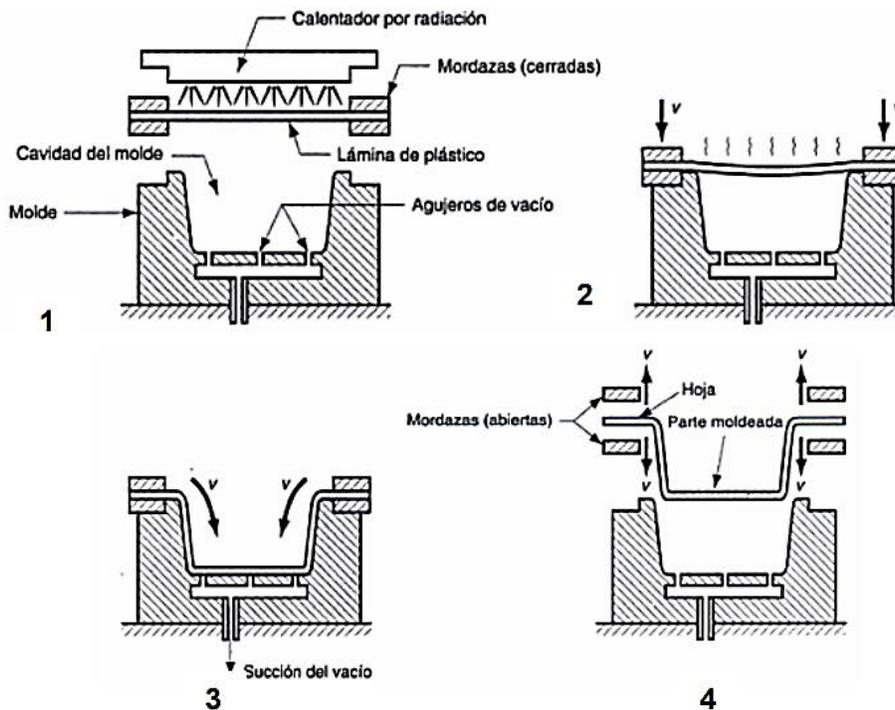


Figura 5. Esquema básico del termoformado al vacío.

Fuente: Diaz (2012)

- Termoformado a presión (Figura 6): es común encontrar que este método utilice tanto el vacío como presión de aire positiva para forzar a la lámina precalentada dentro del molde. El proceso es similar al moldeo por soplado, pero haciendo uso de las presiones positivas y negativas de aire en éste.

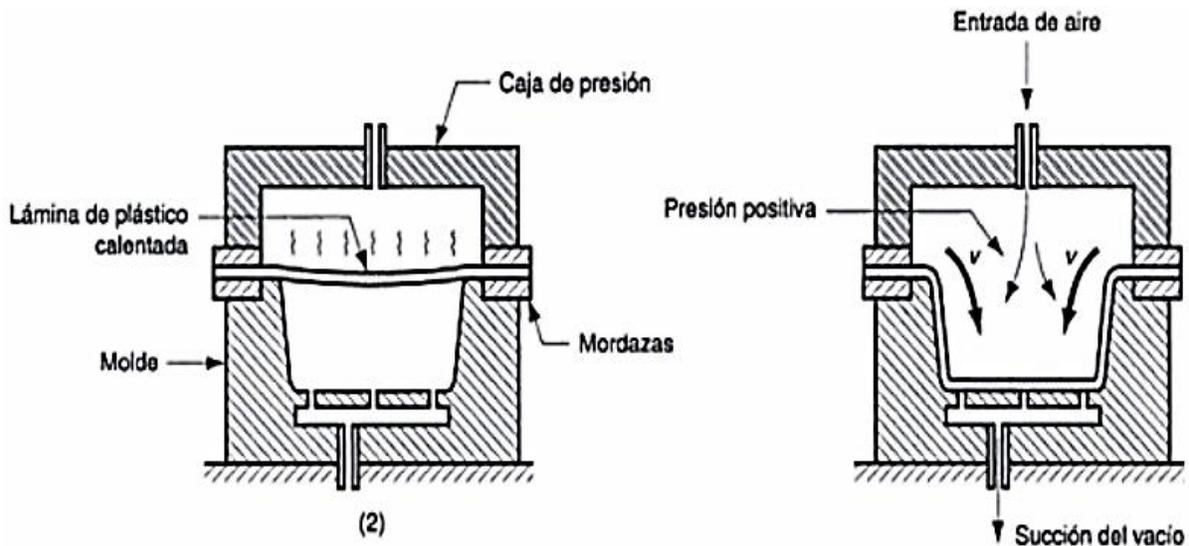


Figura 6. Vista lateral del termoformado a presión.

Fuente: Diaz (2012)

1.3. Propiedades mecánicas en los materiales de empaque

Las propiedades mecánicas de los envases, empaques o embalajes juegan un papel importante en la industria, pues son los recipientes mediante los cuales se encuentran contenidos todo tipo de productos, por ende, deben cumplir con ciertas características que le permitan ejercer sus funciones básicas: protección, funcionalidad y motivar al consumidor a comprarlos (Sierra, Plazas, Guillén y Rodríguez, 2010).

Por tanto, con la finalidad de garantizar la correcta funcionalidad de los envases, éstos usualmente son sometidos a distintos tipos de ensayos, adaptados en cada caso a los múltiples formatos de envasado, empackado o embalado (botellas, bolsas, cajas, estibas, films, bandejas, etc.) que se emplean para los distintos tipos productos (Gil, 2014).

Dichos ensayos y controles de propiedades mecánicas serán los encargados de avalar que los materiales sean capaces de resistir los distintos esfuerzos mecánicos durante su vida útil, a partir de la fabricación del envase mismo, pasando por el envasado del producto, embalaje de las unidades de distribución, transporte y almacenamiento; hasta su uso o consumo final (Gil, 2014).

En resumen, las propiedades mecánicas de un material de empaque describen la manera en que éste reacciona a la aplicación de una fuerza o carga. Como dato curioso, únicamente se pueden ejercer tres tipos de fuerzas mecánicas que afecten a los materiales: la primera es la compresión, en segundo lugar, está la tensión y por último la cizalla (Urrutia, Bustillo y Salinas, 2010).

Por lo que los ensayos de pruebas mecánicas hacen uso de dichas fuerzas o combinaciones de éstas, para evaluar un material de forma específica. La organización autónoma con el nombre de “American Society for Testing and Materials (ASTM)”, se encarga de fijar las normativas que permitan la evaluación mediante pruebas mecánicas de los distintos materiales en la industria (Urrutia, Bustillo y Salinas, 2010).

En relación con las propiedades de los materiales de empaquetado y las exigencias de los mercados emergentes, la sociedad moderna está fijando tendencias o estándares mínimos que estos materiales deberían de poseer para los años venideros, por eso, el siguiente tema aborda las tendencias más sobresalientes hasta el momento.

1.4. Tendencias de los materiales de empaque

Lizarazo, Gamboa y López (2015) afirman que: “En la época actual de globalización, de alta competitividad de productos bienes y servicios es importante estar actualizado ante las exigencias y expectativas del mercado” (p. 11). De tal manera que, los envases, empaques y embalajes no sólo son simples objetos que facilitan la conservación y transporte de un producto, sino que garantizan la venta de este, a la vez que deben ser amigables con el medio ambiente.

La revista española de packing, Hispack (2012) sostiene que, los materiales de empaque en la actualidad estarán enfocados a cumplir por lo menos con los siguientes aspectos:

- **Respetar al medioambiente en todas las fases de la producción.** Los expertos en la industria afirman que el producto “ecofriendly” es la principal la tendencia que asumen los materiales de empaquetado. Como

lo son las nuevas tecnologías de plásticos biodegradables, a partir de fuentes renovables.

- **El “packaging” como herramienta básica de marketing.** La publicidad tradicional se está quedando obsoleta a raíz del auge de las redes sociales y demás herramientas de comunicación online que llevan más allá el papel de visual que juega el material de empaçado.
- **Envases inteligentes y activos.** Envases que alargan la vida del producto y entregan más información al consumidor. Como ejemplo: envases que cambiarán de color si el producto se deteriorando o caducando; o que emplean partículas para conservar mejor, frutas frescas.
- **Optimización: más eficiencia, menos coste.** El consumidor siempre busca precios más bajos, lo que se motiva la optimización de procesos y la disminución de costos. Además, se evidencia que el consumidor se dirige hacia una cultura de consumo más reflexiva, por ende, las empresas tendrán que asegurarse de fijar precios razonables, bajo la premisa de menos, es más (fácil, simple y claro).
- **Adaptación al e-commerce.** En el auge del e-commerce en los últimos años repercutirán en gran medida a la industria del empaquetado, por tanto, se harán uso de nuevos envases especiales, bajo la logística de envíos personalizados con bajo costo). En este sentido, en los próximos años, el sector, las tiendas online y el consumidor tendrán que hacer un esfuerzo de adaptación.

En relación con los materiales de empaquetado ecológicos, el uso de aditivos también deberá adaptarse a las exigencias con el fin de lograr mejores propiedades de envasado o empaquetado.

1.5. Aditivos.

Los aditivos son aquellos materiales que van dispersos en la matriz con el objetivo de obtener cierto beneficio, como las mejoras a las propiedades mecánicas, hidrofobicidad, capacidad para combatir hongos, combatir el fuego, entre otros; sin que eso afecte su estructura molecular (Beltrán y Marcilla, 2012). Algunos ejemplos claros de aditivos empleados en materiales poliméricos son los plastificantes como glicerol, sorbitol y xilitol (Oropeza, Montes y Padrón, 2016)

1.5.1. Plastificantes.

De acuerdo con Beltrán y Marcilla (2012), el plastificante es “una sustancia que se incorpora en un material plástico o elastómero para aumentar su flexibilidad y facilitar su transformación. Un plastificante puede reducir la viscosidad del fundido, rebajar la temperatura de transición vítrea o disminuir el módulo elástico del fundido” (p. 65).

Lo anterior indica que un plastificante puede ayudar a desarrollar un mejor fundido la hora de fabricar un material plástico y otras características físico-mecánicas importantes en un material de envasado. Y en cierta medida, ayudar a reducir temperaturas de fundido, tiempo y gastos energéticos inherentes al proceso de elaboración (Beltrán y Marcilla, 2012).

En otro orden de ideas, para conseguir materiales compuestos con elementos lo más naturalmente posibles, desde la matriz polimérica, el refuerzo fibroso y los aditivos tienen que ser ecológicos.

1.6. Patentes de materiales compuestos

Desde 1994 se han venido patentado en Norte América y Europa polímeros biodegradables que van desde materiales compuestos a partir de termoplásticos sintéticos mezclados con termoplásticos naturales, hasta plásticos biodegradables a base polímeros de origen natural. En los Estados Unidos, entidades como Novamont S.p.A. han patentado polímeros biodegradables a partir de almidón de maíz, arroz y trigo mediante extrusión (Navia, 2011).

La oficina de patentes y marcas USPTO, registró una cantidad significativa de patentes, basadas en el desarrollo de materiales poliméricos reforzados y no reforzados para bio-empaques, haciendo uso de almidón de maíz o de trigo (ver tabla 1). En su momento no existían patentes registradas para harina de yuca (Navia, 2011).

Tabla 1. Patentes de biomateriales para empaque.

Título de patente	Inventor(es)	Empresa o entidad
Reinforced biodegradable polymer	van Tomka	Bio-Tec Biologische Naturverpackungen GmbH
Compositions for manufacturing fiber-reinforced, starch-bound articles having a foamed cellular matrix	Per Just Andersen, Simon Hodson	E. Khashoggi Industries, LLC
Biodegradable packing material and method	Kent Miller	International Grain y Milling Company
Starch-based, biodegradable packing filler and method of preparing same	Paul Neumann, Paul Seib	Kansas State University Research Foundation
Biodegradable moldable products and films comprising blends of starch esters and polyesters	Steven Bloembergen, Narayan Ramani	Evercorn, Inc
Bio-degradable foamed products	John Errington, Anya Hornsey, Timothy Chapman, Philip Quinn, Maria Wake.	Novamont S.p.A.
Polysaccharide based biodegradable thermoplastic materials	Edward Merrill, Ambuj Sagar.	Massachusetts Institute of Technology
Method of making biodegradable packaging material	Harry Bussey, Buddy Bussey.	-

Fuente: Navia (2011).

1.7. Uso de fibras en materiales compuestos

Los materiales reforzados con fibras obtienen la máxima resistencia y módulo de elasticidad cuando las fibras se alinean en una sola dirección denominada: dirección de carga. Mientras que, algunos materiales pueden presentar las fibras colocadas en todas las direcciones al azar lo cual, puede otorgarle propiedades

intermedias en comparación con los compuestos con fibras unidireccionales anteriormente descritos (Moya, 2011).

Comúnmente, las fibras pueden incorporarse en las matrices poliméricas en muchas configuraciones. En ese sentido, las fibras pueden tejerse entre sí para producir tejidos que al mismo tiempo pueden ser utilizados como refuerzo en los materiales compuestos. Con respecto a eso, los materiales reforzados con fibras no suelen ir en forma continua, de tal forma que a estos materiales se les denomina compuestos reforzados con fibras discontinuas (Moya, 2011).

Las fibras pueden clasificarse según su procedencia, en primer lugar, están las fibras naturales que se caracterizan por ser además de origen vegetal, animal o mineral. En segundo lugar, existen las fibras sintéticas que provienen en su mayoría de derivados del petróleo y de intervenciones netamente humanas (Moya, 2011).

De modo que, dentro de las denominadas fibras naturales se podría resaltar la cascarilla de arroz, la cual presenta compuestos lignocelulósicos y minerales como la sílice, (Valverde, et al., 2007), cuyas propiedades podrían ser útiles para la obtención de materiales compuestos, junto a sus posibles aplicaciones se estudian en este trabajo

1.7.1. Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz tiene un alto potencial para el desarrollo de materiales compuestos, debido a su contenido en fibras tales como la celulosa, hemicelulosa y lignina (Bisht y Gope, 2018). Otro factor importante es su alta disponibilidad especialmente en países tropicales, donde se acumula en grandes volúmenes (Petchwattana y Covavisaruch, 2013). Con una producción mundial de 769,9 millones de toneladas de arroz (FAO, 2018); teniendo en cuenta que la cascarilla de arroz representa el 20% de la producción total (Bouzón 2015), se generan aproximadamente 153,98 millones de toneladas de cascarilla de arroz a nivel mundial.

En Colombia la producción de arroz paddy mecanizado, para el año 2018 alcanzó una producción de 1.020.738 ton (ENAM 2018), lo cual pudo haber generado 204.147,6 ton de cascarilla de arroz, aproximadamente. Por lo que se hace necesario generar alternativas para el aprovechamiento de este subproducto. Como se sabe, la cascarilla de arroz es uno de los subproductos importantes después de la producción de arroz. Ésta, es muy pobre respecto a su contenido nutricional, por lo que su implementación para alimentación animal es casi nula y también por su alto contenido en sílice (SiO_2) (Mafla, 2009). Como abono orgánico,

resulta más difícil de biodegradar y su aporte a este tipo de fertilizantes es igualmente pobre.

Por lo general, por su baja densidad (100 kg/m³) la cascarilla de arroz suele ocupar grandes espacios con poca cantidad másica y sus aplicaciones más comunes se limitan a ser usadas para camas para ganado, camas para aves de corral y en el peor de los casos, para incinerarla en la generación de energía térmica (Ruiz, 2017). Debido a su constitución fisicoquímica, en este trabajo se abordan las posibles aplicaciones, donde la cascarilla actúa como refuerzo en el material compuesto. Así mismo, la aplicación de harina con alto contenido de almidón que cumpla la función de matriz polimérica en los mismos.

1.8. Materiales basados en harinas

De los materiales compuestos a base de harinas, Navia (2011) desarrolló un material bioplástico semirrígido a partir de cuatro variedades harina nativa de yuca y fibra de fique, procesado por la técnica de moldeo por compresión, durante tres minutos a 200°C. Las muestras, moldeadas por compresión, obtenidas en este trabajo son tecnológicamente factibles, y se presentan como una alternativa al uso del poliestireno expandido aplicado en empaques alimentarios.

Fueron evaluadas diferentes concentraciones de fibra, harina y plastificante con el fin de obtener características mecánicas, térmicas y de adsorción de humedad adecuadas. Las proporciones de los componentes de la mezcla con los cuales se obtuvo la más alta resistencia mecánica y un adecuado comportamiento de adsorción de agua fueron: harina de yuca 60%, fibra de fique 25%, glicerol 7.5%, y aceite vegetal 7.5%.

La variedad de yuca apropiada para el uso de la harina en el desarrollo del material fue MPER 183, con resultados de resistencia máxima al esfuerzo de tensión y flexión de $1.8 \pm 0,20$ MPa y $3.5 \pm 0,20$ MPa, respectivamente y resistencia al impacto de $21.2 \pm 0,10$ J/m, igualmente, las muestras elaboradas con harina de yuca de la variedad MPER 183 presentaron la menor higroscopicidad en un rango de 0.12 a 0.63 aw, al igual que las elaboradas con harina de yuca variedad MBRA 383 entre 0.86 y 0.98 de aw.

En otra investigación, Castañeda, Villada y Mosquera (2008) evaluaron las propiedades mecánicas de materiales termoformados a partir de nueve mezclas distintas de harina de amaranto (*amaranthus caudatus*) y polvillo de fique. Las cuales se calentaron en baño María hasta 75° C para alcanzar las condiciones de gelatinización del almidón, posteriormente fueron moldeadas y secadas. Los investigadores reportaron diferencia significativa en las propiedades mecánicas de

los materiales obtenidos, donde la tensión de 5,81 kN/m², elongación de 1,14% y rasgado de 145 gf resultaron ser los mejores valores para la obtención de un material de empaque termorrígido, de acuerdo a la finalidad de estudio.

En dicha investigación concluyen que, la harina de amaranto es un excelente material en el desarrollo de matrices rígidas. Sin olvidar que, mezclar esta materia prima con polvillo de fique mejora las propiedades mecánicas. Afirman que, el glicerol no aportó de manera significativa al objetivo del trabajo puesto que, los materiales compuestos modificados con ese plastificante fueron frágiles a diferencia de lo que se obtuvieron del polvillo de fique y la harina de amaranto que mejoraron la rigidez de la estructura termoplástica

En definitiva, existen muchos más estudios a nivel mundial que están optando por una alternativa para minimizar el uso de polímeros sintéticos, empleando materiales económicos, renovables y biodegradables. Por lo que, las harinas de cereales, raíces y tubérculos se han convertido en una excelente opción para el desarrollo de materiales compuestos biodegradables. Hasta la fecha, se han utilizado las harinas de trigo, soya y yuca en la preparación de termoformados (Tserki, Matzinos, Kokkou y Panayiotou, 2005).

A diferencia de los materiales sintéticos, cabe mencionar que, los materiales compuestos a base de harinas presentan características y/o comportamientos irregulares en las propiedades mecánicas y de barrera (Avérous, Fringant y Moro, 2001) siendo eso un inconveniente a tener cuenta en la elaboración de empaques, lo que motiva a investigar nuevos materiales naturales que puedan reducir los efectos negativos en las propiedades mecánicas y de barrera (Avanza, Puppo y Añon, 2005).

2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales

2.1.1. Adecuación de la materia prima.

La cascarilla de arroz fue suministrada por la arrocera INCOARROZ de Montería, Córdoba. Antes del procesamiento se sometió a lavado y pretratamiento de desinfección con una solución de hipoclorito al 1% durante 20 minutos, posteriormente fue secada al sol. Una vez seca, se redujo el tamaño de partícula por molienda con un molino manual de carne y granos (Corona, Colombia). Luego se realizó la clasificación por tamaño, a través de tamices (PINZUAR, ASTM E-11, Colombia). La adecuación de la materia prima puede observarse en la figura 7.

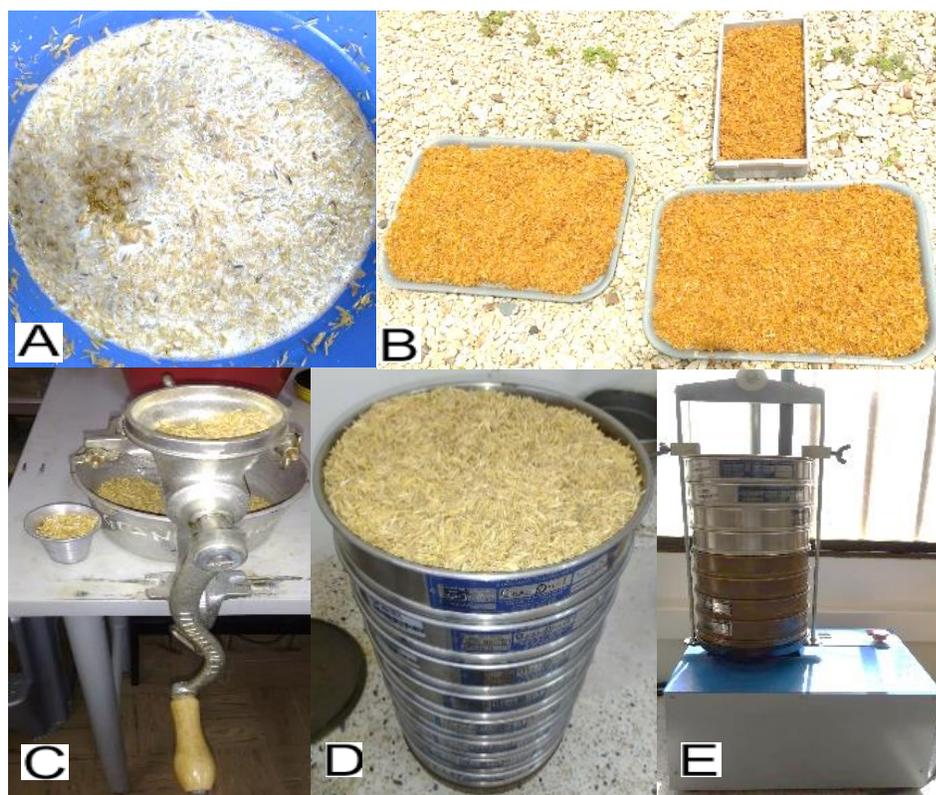


Figura 7. A: lavado con hipoclorito de sodio 1%; B: secado al sol; C: molienda; D: caracterización por tamaño de partícula; E: tamizado mecánico.

2.1.2. Obtención de harina de yuca.

Para la obtención de la harina de yuca se adquirió yuca dulce del mercado local de Montería – Córdoba. La yuca fue lavada con agua corriente, se desinfectó con una solución de hipoclorito de sodio a 50 ppm durante 10 minutos, posteriormente se secó con una toalla absorbente y se rebanó en trozos delgados de tres (3) mm de espesor aproximadamente, las cuales se sometieron a secado en un horno (UN 55 Plus, Memmert, Alemania) a 60°C hasta peso constante, para luego ser molida hasta obtener una harina, como lo muestra la figura 8.

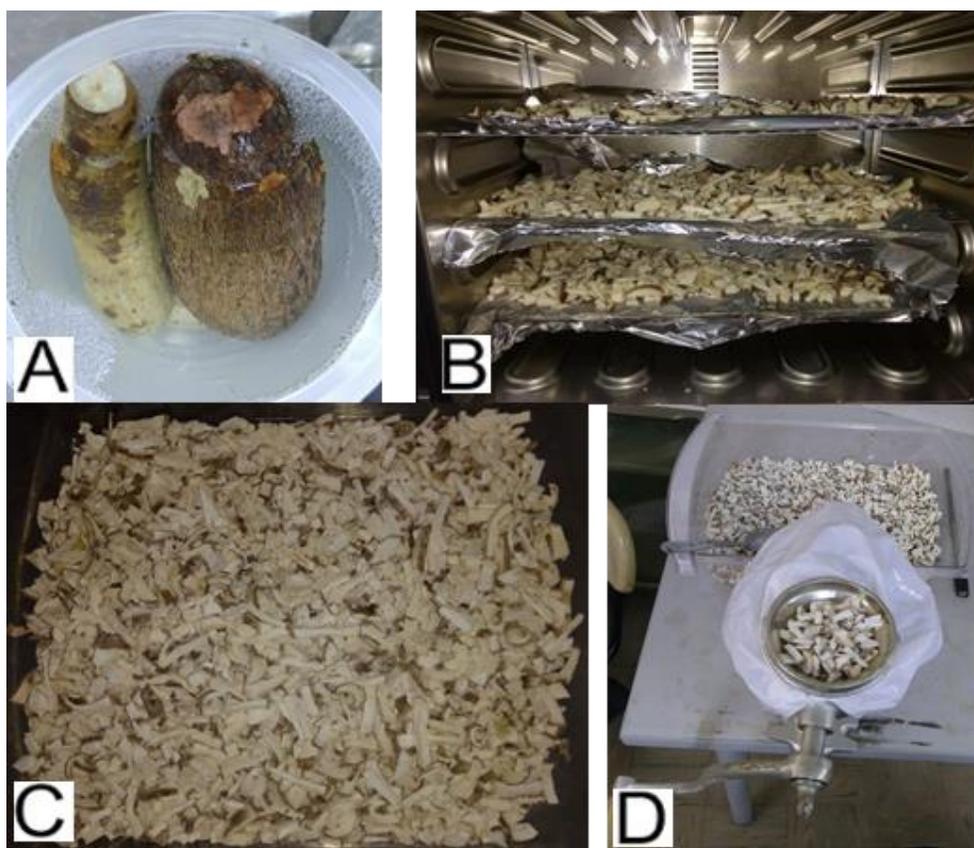


Figura 8. A: lavado con hipoclorito de sodio; B: secado a 60° C en horno; C: yuca troceada y seco; D: molienda de la yuca seca

2.1.3. Aditivos y Plastificantes

Durante la investigación se hizo uso de un plastificante y diferentes aditivos, como el glicerol al 85 % (Sigma-Aldrich), que actuó como plastificante; aceite vegetal de palma, como agente hidrofóbico y Tween 80 (Sigma-Aldrich), como emulsificante.

2.2. Ensayos exploratorios

Para la determinación de la región experimental fue necesario realizar ensayos exploratorios, donde se evaluaron dos materiales aglutinantes como lo son el almidón de yuca y la harina de yuca, como también, el efecto de la concentración del plastificante y demás aditivos. Fue necesario descartar por criterios sensoriales (visualmente y por el tacto) proporciones de mezcla de materiales usados, tamaños de partícula de la cascarilla de arroz y el uso de algunos aditivos; optando por los materiales compuestos que presentaron mejores características, referente a resistencia al tacto, porosidad y humedad luego del termoformado.

Estos pre- ensayos se realizaron por triplicado empleando una sandwichera (Oster, CG120W UL LISTED, China), la cual al ser cerrada sólo aplicaba la fuerza en base al peso de su tapa sobre el material a termoformar, en un rango de temperaturas de entre 190 a 200 °C (Figura 9). Cabe resaltar que, para evitar la adhesión del material a termoformar en las tapas de la sandwichera, se empleó papel aluminio. Por lo tanto, en cada etapa de los pre- ensayos se abarcan distintas condiciones de masas a termoformar, diferentes espesores, tiempos de termoformado, entre otras. El resultado obtenido en un pre-ensayo fue tomado como base para el desarrollo del siguiente pre-ensayo hasta la delimitación de la región experimental.



Figura 9. Temperatura de la sandwichera previo al termoformado.

2.2.1. Ensayos exploratorios 1: efecto del glicerol y el almidón nativo de yuca en los materiales compuestos.

En el primer pre- ensayo se evaluó el efecto de almidón nativo de yuca y la concentración del plastificante (2,5 y 5% de glicerol) en los materiales compuestos, empleando cascarilla de arroz molida como material de refuerzo y almidón nativo de yuca como aglutinante, en partes iguales; esta mezcla de sólidos correspondió al 38% de la mezcla total, ajustando el agua para completar el 100% de la masa. Inicialmente, se empleó una cantidad aproximada de 26.3 g de mezcla a termoformar, la cual se depositó en un material circular plástico con diámetro de 57 mm, el cual se usó para dar forma regular al material, siendo retirado previo al proceso de termoformado. Con este molde se obtuvieron materiales compuestos con diámetro de 57 mm aproximadamente y espesor de 6 mm, en un tiempo de 10 min de termoformado (Figura 10).



Figura 10. Moldeo previo al termoformado, empleando molde circular de 57mm de diámetro.

2.2.2. Ensayos exploratorios 2: efecto de la harina de yuca en los materiales compuestos.

En un segundo ensayo, se estudió el uso de la harina de yuca como aglutinante, con una concentración fija de glicerol en 5 % con relación a la mezcla total y se conservó la proporción del 38 % de sólidos, en partes iguales de cascarilla de arroz y de harina de yuca en la mezcla. En esta etapa se determinó el tiempo

necesario para obtener el termoformado del material compuesto, evaluando el tiempo de termoformado de 20 y 50 minutos, empleando una masa de mezcla a termoformar de 400 g. La cantidad de muestra tuvo que ser modificada, con el fin de obtener áreas más grandes del material termoformado. Para poder tratar esta cantidad de muestra, dar forma definida al material y obtener espesores cercanos a 8 y 10 mm, se empleó un molde metálico de 20 cm x 20 cm, el cual era retirado previo al termoformado (Figura 11).



Figura 11. Moldeo previo al termoformado, con molde de 20 cm X 20 cm.

2.2.3. Ensayos exploratorios 3: efecto de las concentraciones y tamaños de partícula de la cascarilla de arroz en el material compuesto.

Se realizaron nuevos ensayos exploratorios, evaluando la concentración de harina de yuca (20, 30, 40, 50, 60, 70 y 80 %), concentración de la cascarilla de arroz (20, 30, 40, 50, 60, 70 y 80 %) y tamaño de partícula de la cascarilla de arroz (malla 30, 40, 50, 60 y cascarilla molida), cabe mencionar que en esta etapa no se incluyó cascarilla de la malla 20. Al igual que en los pre- ensayos anteriores las proporciones de los componentes sólidos se mantuvieron fijas en 38%, como también se mantuvo fija la proporción de glicerol en 5% del total. La masa a termoformar era de 400 g, de 8 y 10 mm de espesor por 50 minutos de proceso.

2.2.4. Ensayos exploratorios 4: efecto de la concentración de diferentes aditivos en el material compuesto.

Con el objeto de indagar el uso de insumos para mejorar las características de cohesión, se procedió a la elaboración del material compuesto siguiendo lo reportado por Navia (2011), quien investigó el uso de polvo de fique, harina de yuca, glicerol, Tween 80 y aceite vegetal, en la elaboración de materiales compuestos. En la tabla 2 se presentan las combinaciones empleadas para cada componente del material. Además, con la finalidad de evaluar el comportamiento de la cascarilla retenida en la malla 20, los pre- ensayos se realizaron con este tamaño de partícula. La masa a termoformar fue de 26.3 g, con 6 mm de espesor y 10 minutos de termoformado, estas condiciones fueron empleadas para determinar la cohesión y resistencia al tacto de cada material obtenido.

Tabla 2. Formulaciones de pre- ensayos para definir compactación y viabilidad.

Pre-ensayo	Harina de yuca (%)	Cascarilla de arroz (%)	Glicerol (%)	Aceite vegetal (%)	Tween 80 (%)	Agua (%)
A ₁	36,36	15,15	9,10	0	0	39,39
A ₂	35,93	14,97	8,98	0	1,20	38,92
A ₃	36,36	15,15	0	9,10	0	39,39
A ₄	35,93	14,97	0	8,98	1,20	38,92
A ₅	35,18	14,66	0	8,79	3,27	38,10
A ₆	36,36	15,15	4,55	4,55	0	39,39
A ₇	35,93	14,97	4,49	4,49	1,20	38,92
A ₈	35,18	14,66	4,40	4,40	3,27	38,09

Adaptado de Navia (2011).

2.3. Determinación de los niveles y región experimental para la obtención de los materiales compuestos a partir de la cascarilla de arroz y harina de yuca

A partir de todos los pre- ensayos realizados, se delimitó la región experimental, trabajando con corridas experimentales 2*3, correspondiente a 6 tratamientos con dos tamaños de partícula y tres concentraciones para la cascarilla de arroz y la harina de yuca. El porcentaje de agua y glicerol fueron fijados en 57 y 5 %, respectivamente, la proporción de solidos fue de 38% respecto a la masa total, dicha masa del material a termoformar fue de 400 g, con espesores de entre 8 y 10 mm; y 50 minutos de termoformado. En la tabla 3 se muestran las corridas experimentales.

Tabla 3. Corridas experimentales.

Tamaño de partícula retenido en malla	Cascarilla de arroz (%)	Harina de yuca (%)
20	50	50
20	60	40
20	70	30
40	50	50
40	60	40
40	70	30

Fuente: Autor

La cascarilla y la harina se mezclaron de forma manual en seco durante 2 minutos. Por otro lado, los aditivos y el plastificante se mezclaron con el agua acorde con las formulaciones del diseño experimental a 50°C hasta que se homogenizó la solución. Finalmente, se adicionaron la solución acuosa a la mezcla de cascarilla y harina hasta completar un tiempo total de mezclado de 5 minutos. La mezcla se realizó manualmente empleando una cuchara metálica. El termoformado del material compuesto se realizó por compresión empleando una sandwichera doméstica (Oster, CG120W UL LISTED, China) a una temperatura de entre 190 y 200 °C por 50 minutos (Figura 12).

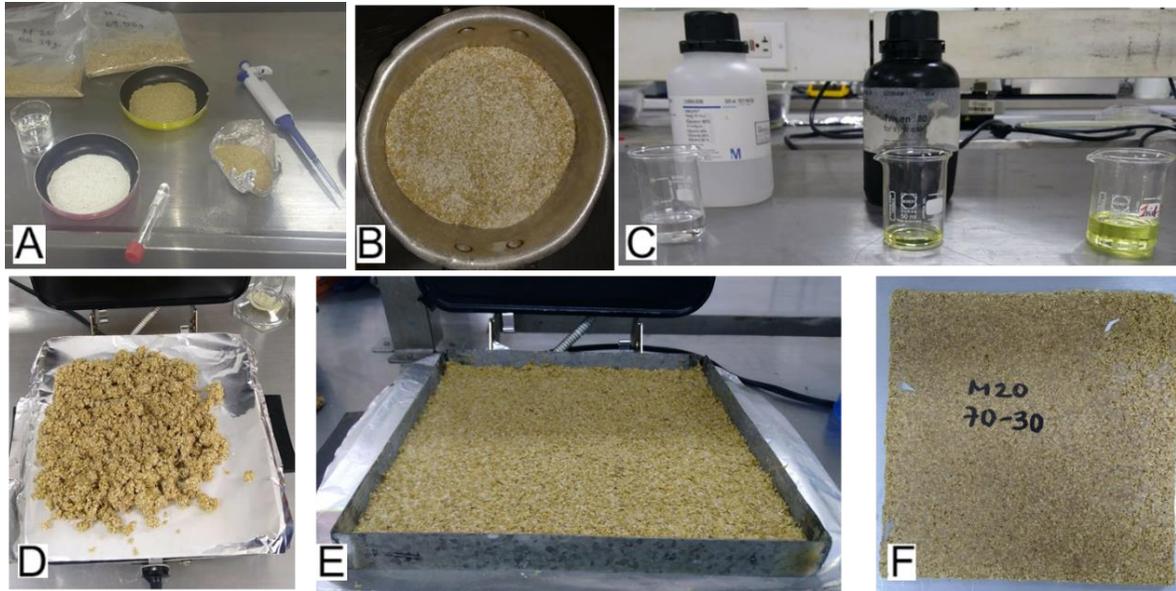


Figura 12. Obtención del material; A: ingredientes principales; B: mezcla seca; C: ingredientes de la mezcla líquida; D: mezclado final (seca + húmeda); E: termoformado y F: placa de material terminado.

2.4. Ensayo de tensión

Los ensayos de tensión se realizaron en una máquina universal de ensayos MTS EXCEED modelo E45 del laboratorio de caracterización de materiales del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana, de acuerdo con la norma técnica ASTM D638-14. Antes de los ensayos las muestras fueron mantenidas dentro de bolsas plásticas tipo Ziploc y en una campana de vacío con sílica durante 1 día. Se empleó una velocidad de ensayo de 0,083 mm/s y se utilizó una celda de carga de 5 kN. La fuerza fue incrementada linealmente con el tiempo hasta que se produjo la falla de la probeta (Figura 13). Se usó poliestireno expandido como muestra patrón para comparar los resultados de tensión de los materiales compuestos obtenidos a partir de la cascarilla de arroz y harina de yuca.

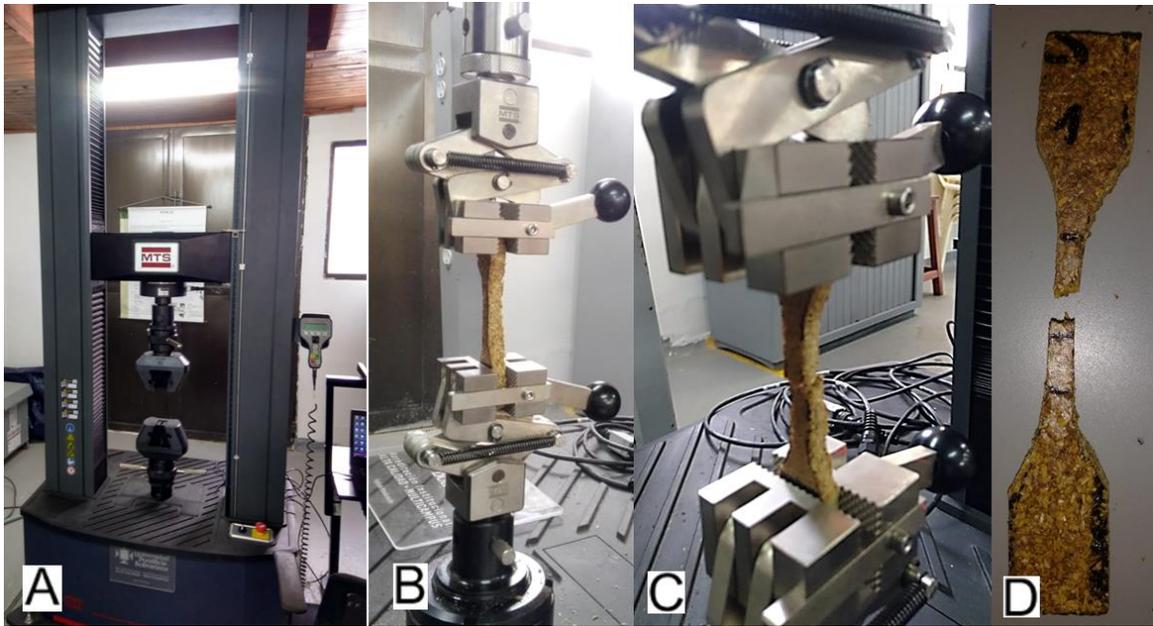


Figura 13. Ensayo de tracción: A: máquina universal de ensayos MTS EXCEED modelo E45; B: probeta tipo IV, ASTM D638-14; C y D: ruptura por tensión en la probeta.

El esfuerzo de ruptura o resistencia a la tracción fue calculado utilizando los valores de la fuerza máxima necesaria para producir la falla y el área de la sección transversal de las probetas acorde a la siguiente ecuación 1:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde: σ : Esfuerzo de ruptura MPa, F: Fuerza máxima necesaria para romper el material (N) y A: Área de la sección transversal de la probeta en (m²).

La figura 14 y la tabla 4 muestran las dimensiones y la forma de las probetas que se utilizaron en los ensayos de tensión acorde a la norma ASTM D638-14, modificando T dentro de un rango de 8 a 10 mm de espesor.

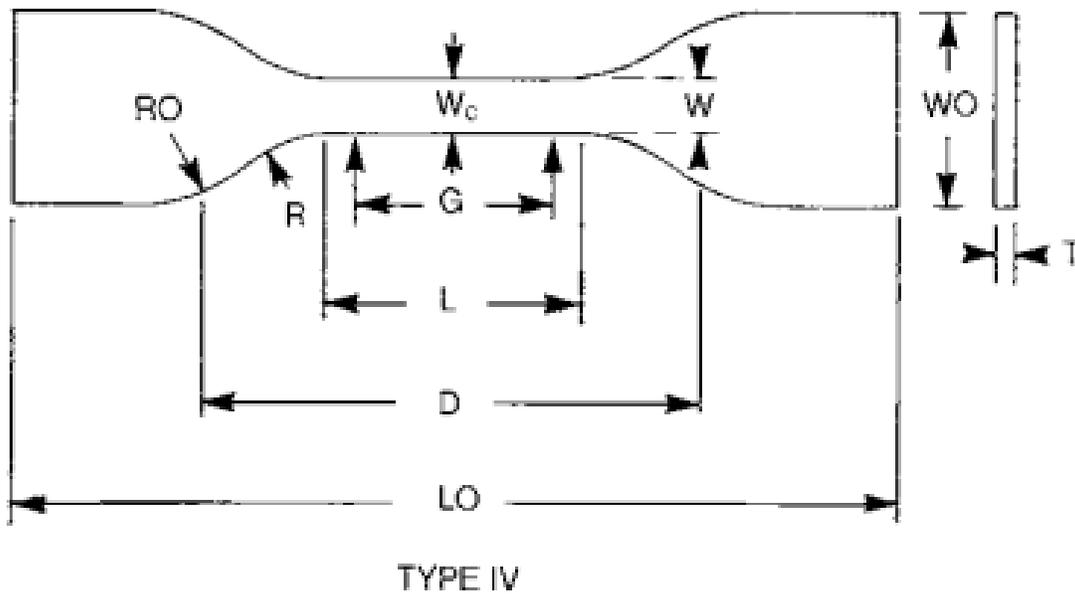


Figura 14. Dimensiones de probeta de tipo IV (ASTM D638-14)

Fuente: ASTM D638-14

Tabla 4. Dimensiones en mm (in) de la probeta de tipo IV (ASTM D638-14).

Dimensions (see drawings)	4 (0,16) or under Type IV ^B	Tolerances
W- Width of narrow section ^{E,F}	6 (0,25)	$\pm 0,5$ ($\pm 0,02$) ^{B, C}
L- Length of narrow section	33 (1,30)	$\pm 0,5$ ($\pm 0,02$) ^C
WO- Width overall, min ^G	19 (0,75)	+6,4 (+0,25)
WO- Width overall, min ^G	...	+3,18 (+0,125)
LO- Length overall, min ^H	115 (4,5)	No max (no max)
G- Gage length ^I	...	$\pm 0,25$ ($\pm 0,010$) ^C
G- Gage length ^I	25 (1,00)	$\pm 0,13$ ($\pm 0,005$)
D- Distance between grips	65 (2,5) ^J	± 5 ($\pm 0,2$)
R- Radius of fillet	14 (0,56)	± 1 ($\pm 0,04$) ^C
RO- Outer radius (Type IV)	25 (1,00)	± 1 ($\pm 0,04$)

Fuente: adaptado de ASTM D638-14

2.5. Determinación de la absorción de agua del material compuesto

El material compuesto obtenido de las diferentes corridas experimentales fue cortado en piezas de igual tamaño (1 pulgada cuadrada) y se colocaron dentro de un desecador al 100% de humedad relativa (HR), a una temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$. La absorción de agua se determinó por la ganancia en peso del material (Gennadios, Weller & Gooding. 1994); mediante una balanza analítica PA214 PIONEER (OHAUS, China). El peso se registró cada hora durante un mínimo de 6 horas. Las mediciones se realizaron por duplicado (ver figura 15). El porcentaje de aumento de peso se calculó haciendo uso de la ecuación 2:

$$Wg = \left(\frac{W_w - W_{seco}}{W_{seco}} \right) * 100 \quad (2)$$

Donde, W_g : aumento de peso (%), W_{seco} : peso de probetas secas y W_w : peso de la probeta tras mantenerse en el desecador.

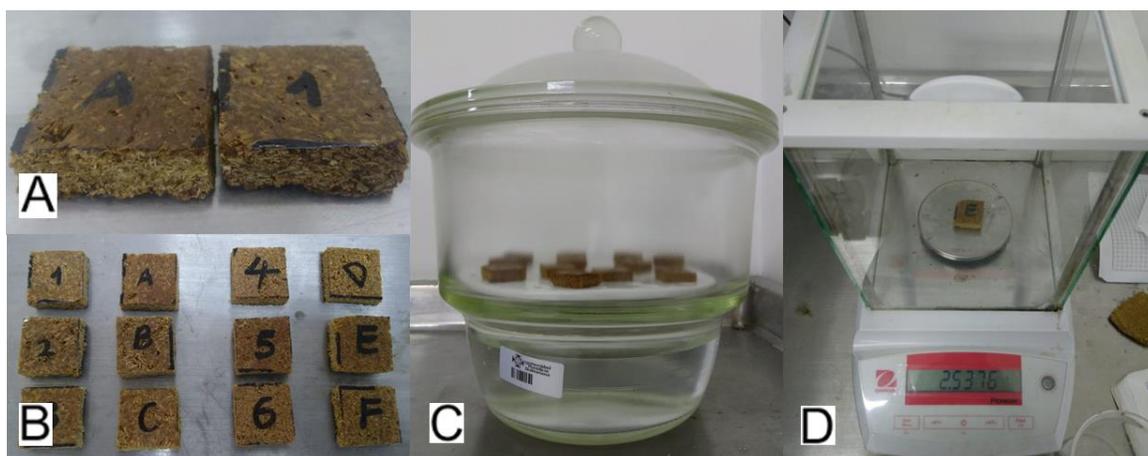


Figura 15. Prueba absorción de humedad: A: muestras de 1 pulgada cuadrada; B y C: vista superior y vista lateral de las muestras; D: pesaje.

2.6. Análisis Estadístico.

Los datos obtenidos fueron analizados por ANOVA con un nivel de confianza del 95%, usando el software Statgraphics Centurión XVII Versión 16.1.15.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Ensayos exploratorios

3.1.1. Ensayos exploratorios 1: efecto del glicerol y el almidón nativo de yuca en los materiales compuestos.

De los pre- ensayos a partir del almidón de yuca se encontró que a pesar de que el material obtenido mostró buena compactación, se presentó la migración del almidón a la superficie del producto cuando se trabajó con glicerol al 2.5%, como se muestra en la figura 16A. Mientras que para las muestras obtenida con glicerol al 5% la migración observada fue mucho menor (Figura 16B). Se infiere que este comportamiento fue debido al bajo contenido de glicerol empleado (2.5% de la mezcla), por lo que la cantidad de almidón adicionado no alcanzó a ser plastificado en su totalidad. La migración del material aglutinante hacia la superficie del material compuesto puede ser debido al comportamiento anti- plastificante del glicerol cuando se emplea a bajas concentraciones (Yu, Li y Ren, 2009).

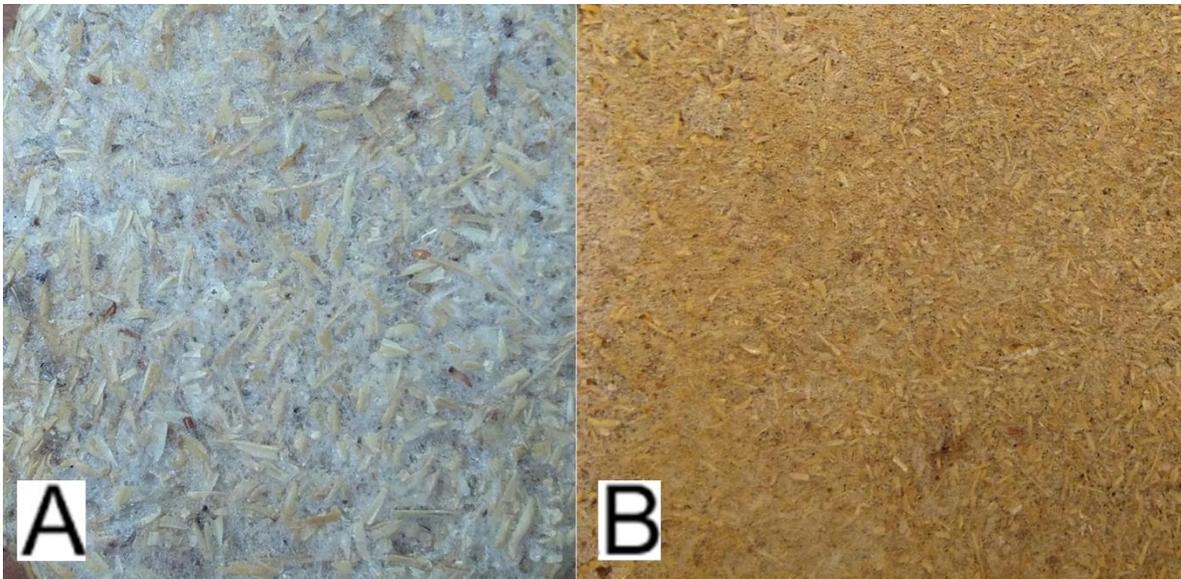


Figura 16. Material a base de almidón de yuca (50%) y cascarilla de arroz (50%): A: con 2.5% glicerol y B: con 5% glicerol.

3.1.2. Ensayos exploratorios 2: efecto de la harina de yuca en los materiales compuestos.

Teniendo en cuenta la harina de yuca como material aglutinante, se encontró que a simple vista los materiales compuestos resultantes, presentaron buena adhesión, sin migración aparente del aglutinante hacia la superficie de este, resaltando como un producto seco y compacto al tacto (Figura 17).



Figura 17. Material a base de harina de yuca (50%) y cascarilla de arroz (50%) con 5% glicerol.

Por otra parte, se comenzó a evaluar el tiempo necesario para el termoformado del material compuesto. Con base a las temperaturas alcanzadas durante el proceso (190 - 200 °C) se observó que, el tiempo necesario para obtener el material está estrechamente relacionado con la masa, el tamaño de partícula de la cascarilla y el espesor del material a termo-formar. Por lo que un tiempo de 20 minutos de termoformado a materiales compuestos de 400g, con espesores de entre 8 y 10 mm; se traducía en materiales con baja resistencia al tacto, con deformaciones y alta porosidad (Figura 18). Así mismo, durante el almacenamiento a condiciones ambientales, luego de 7 días todas las muestras independientemente

del tamaño de partícula presentaron crecimiento de hongos en la superficie (Figura 19).

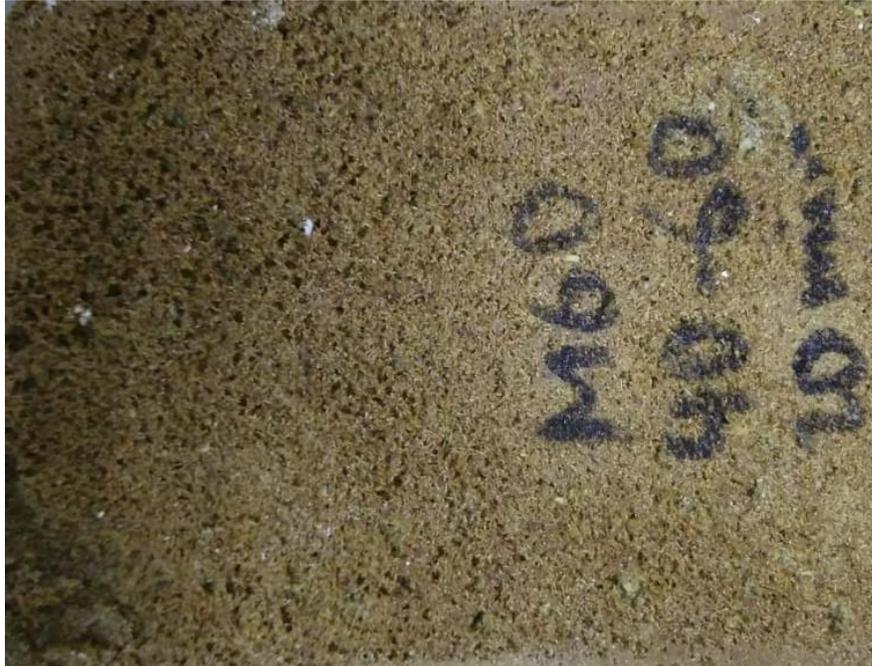


Figura 18. Material compuesto con 20 minutos de termoformado.



Figura 19. Material de la malla 40 con daño por hongos.

Por lo tanto, la presencia de hongos se puede atribuir al alto contenido de humedad libre que no alcanzó a ser retirado durante el termoformado, de igual manera, la presencia de harina de yuca que es una fuente rica en micro y macronutrientes como la glucosa, el almidón y la celulosa, sirvieron como sustrato para diversos tipos de microorganismos, incluidos los hongos (Arias y Piñeros, 2008). Debido a los resultados descritos anteriormente, se procedió a extender el tiempo de termoformado sin cambiar el rango de temperaturas de proceso (190-200°C) ni mucho menos, la masa de la mezcla a termoformar (400 g) hasta un tiempo de 50 minutos en total.

3.1.3. Ensayos exploratorios 3: efecto de las concentraciones y tamaños de partícula de la cascarilla de arroz en el material compuesto.

En estos ensayos pese al incremento del tiempo de termoformado de los materiales compuestos (50 minutos), se encontró que los obtenidos con tamaños de mallas 30, 50, 60 y la cascarilla molida (mezcla de tamaños) presentaron una menor compactación al tacto, zonas húmedas, alta porosidad, deformaciones, entre otras imperfecciones; por lo tanto, se descartaron con la finalidad de definir las corridas experimentales (Figura 20). Lo anterior dicta que los materiales obtenidos de cascarilla con tamaños de partículas más finas (malla 30, 50 y 60) generan mayor adherencia entre la matriz y el refuerzo, dificultando en mayor medida la salida del agua (quedando húmedos al final).

Por otra parte, la malla 30 pese a tener un tamaño de partícula intermedio presentó zonas húmedas, porosidad, grietas y demás defectos. Es probable que, para alcanzar el secado de estos materiales, sea necesario prolongar el tiempo de termoformado, lo cual puede llevar a quemar el producto. Mientras que, los materiales compuestos reforzados con la cascarilla molida al quedar considerablemente más secos en comparación con los materiales con cascarilla de mallas finas descritas anteriormente presentaron excesiva fragilidad al tacto.

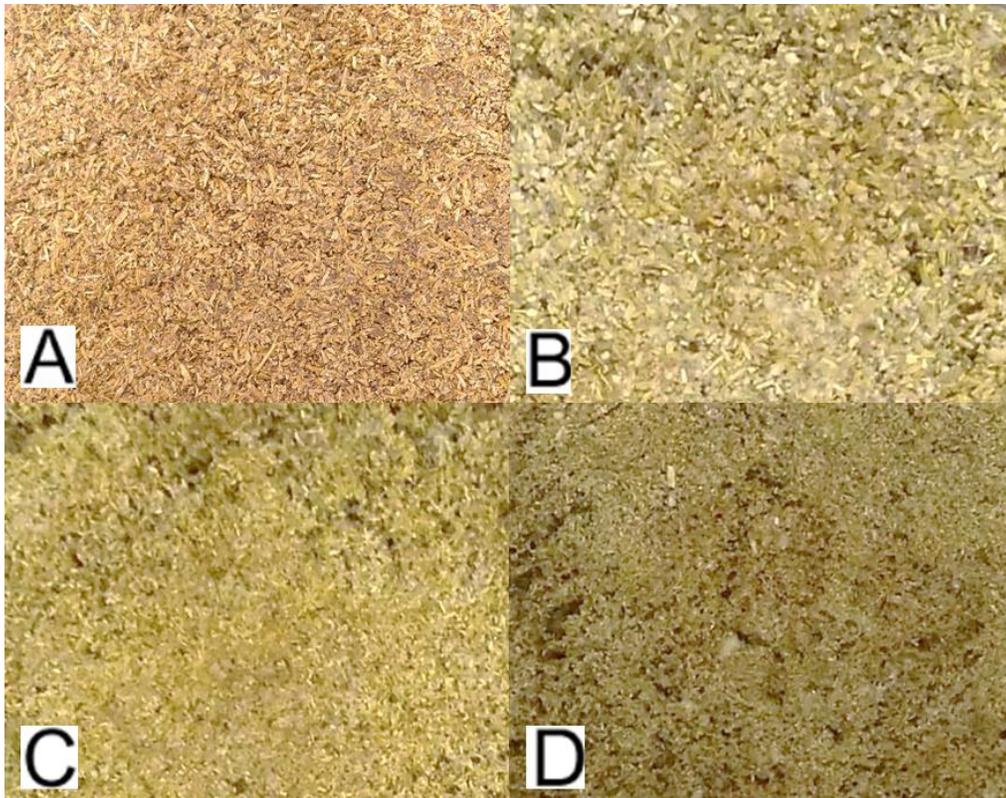


Figura 20. Ensayos con irregularidades: A: cascarilla molida; B: malla 30; C: malla 50; D: malla 60.

Por otro lado, los materiales compuestos obtenidos a partir del 80% de la mezcla de tamaños de partículas de cascarilla de arroz con 20 % de harina de yuca, resultaron muy quebradizo al tacto (Figura 21A), debido a la pobre adherencia interfacial entre la cascarilla de arroz y el aglutinante, por el bajo contenido de este último. Para el ensayo invirtiendo las concentraciones, es decir, 20% cascarilla y 80% harina, el material obtenido también resultó ser quebradizo al tacto y no mostró el aspecto y funcionalidad deseados (Figura 21B), por lo que estas concentraciones fueron descartadas para ensayos siguientes.



Figura 21. Pre- ensayos (mezcla de los tamaños de partícula), A: 80% cascarilla de arroz, 20% Harina de yuca; B: 20% cascarilla de arroz, 80% harina de yuca

3.1.4. Ensayos exploratorios 4: efecto de la concentración de diferentes aditivos en el material compuesto.

Para determinar aún más las corridas experimentales, se llevaron a cabo ensayos con cascarilla de arroz de tamaño malla 20 (Figura 20), teniendo en cuenta las formulaciones con glicerol, Tween 80 y aceite vegetal como aditivos, vistos previamente en la tabla 2. Ahora bien, se descartaron aquellas formulaciones que hacían uso del Tween 80 y aceite vegetal desde la “A₂” hasta la “A₈”, debido al comportamiento de adhesión y rigidez al tacto, similar al observado en las muestras que no contenían estos insumos (Figura 22). Un comportamiento similar fue observado por Navia (2011), al evaluar la adición de los mismos insumos aplicados en el actual estudio en materiales elaborados a partir de fibra de fique y harina de yuca. Sin olvidar que, todos los resultados obtenidos en los pre- ensayos contribuyeron a la delimitación de la región experimental, tal como se presentó en la tabla 3, fijando la concentración de glicerol al 5 % con relación a la mezcla total.

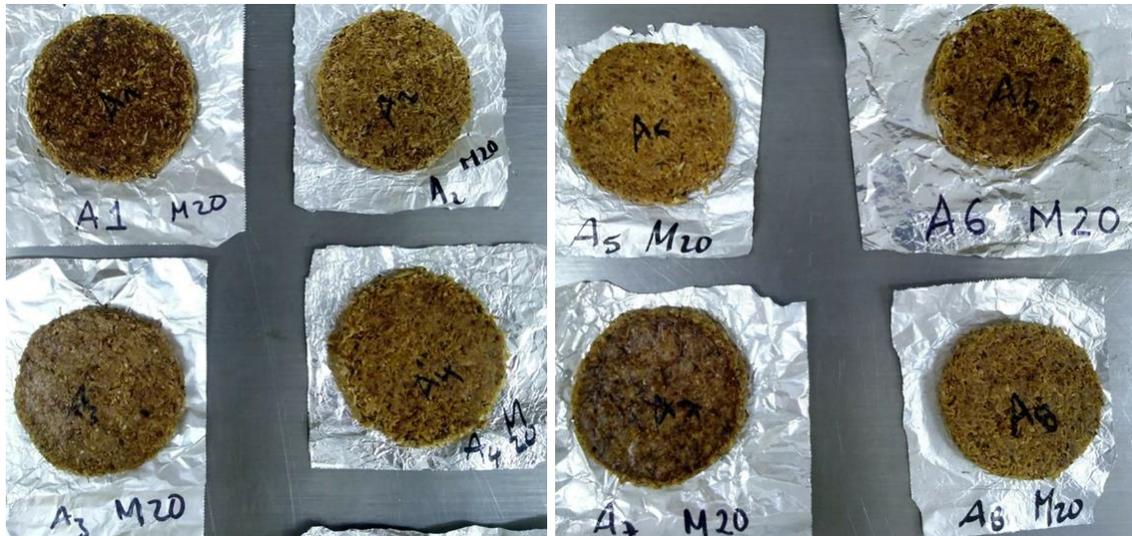


Figura 22. Materiales con cascarilla de malla 20, variando únicamente los aditivos glicerol, Tween 80 y aceite vegetal.

3.2. Ensayo de tensión

El análisis de varianza ANOVA demostró diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los tratamientos. Al aplicar la prueba de Fisher se encontró que las probetas obtenidas con los tratamientos M20 50-50, M40 50-50 y M40 60-40, no presentaron diferencia significativa, alcanzando el mayor valor de esfuerzo a la ruptura con un promedio de $661,5828 \pm 17,3446$ KPa. Mientras que el menor valor lo presentaron las probetas de los tratamientos M20 70-30 y M40 70-30, con valor promedio de $321,7384 \pm 27,2071$ KPa. Así mismo los tratamientos M20 60-40 y M40 70-30, no presentaron diferencia significativa, alcanzando un valor promedio de $378,4800 \pm 53,0377$ KPa (Figura 23).

A partir de los resultados obtenidos se encontró que el mayor esfuerzo a la ruptura lo alcanzaban las mezclas de sólidos en proporciones de 50-50 y 60-40, independientemente del tamaño de partícula de la cascarilla de arroz (malla 20 y malla 40). Este comportamiento puede explicarse debido a la mayor adhesión que presentan las muestras a estas combinaciones. Mientras que la disminución de la fuerza a la ruptura es debido al aumento del contenido de cascarilla de arroz en el material compuesto. El aumento del contenido de cascarilla de arroz con relación al producto aglutinante, tal como se mencionó en los pre- ensayos genera un material con alta porosidad.

Según Utrera, Pérez, Botana y Botana-Galvín (2017), el aumento de los poros, grietas y demás defectos en el material, reducen las propiedades mecánicas. Así, el tamaño y la fracción del volumen de defectos como los poros, son factores

importantes que afectan significativamente la resistencia. En estudio Premalal, Ismail y Baharin (2002), informaron un comportamiento similar al encontrar una disminución en la resistencia de un material compuesto a medida que aumentaban el contenido de cascarilla de arroz como material de relleno. Otros investigadores han reportado comportamientos similares (Bisht y Gope, 2017).

Al comparar los valores de esfuerzo a la ruptura con el poliestireno como muestra control, se encontró que todos los tratamientos registraron valores de resistencia significativamente superiores a ésta. Lo cual dicta que, los materiales compuestos logrados empleando cascarilla de arroz, harina de yuca y glicerol representan un buen sustituto a materiales de empaquetado, como lo es el poliestireno expandido.

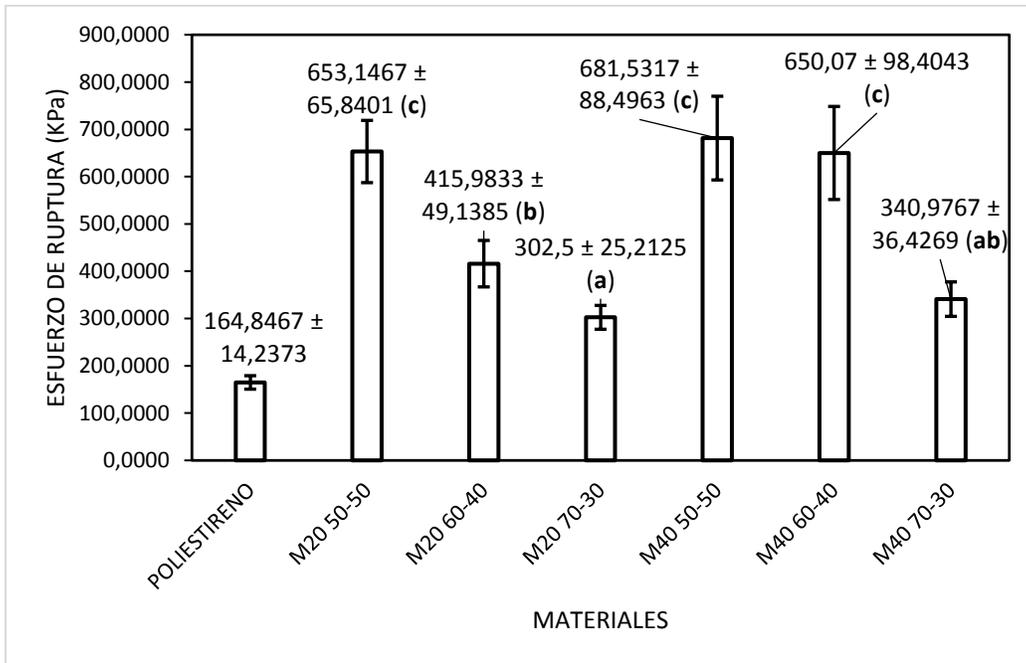


Figura 23. Esfuerzo de ruptura de los materiales compuestos y el poliestireno expandido (patrón).

3.3. Determinación de la absorción de agua del material compuesto

La ecuación de absorción de agua en el periodo de estudio de 6 horas (Figura 24), arrojó según el análisis de varianza ANOVA, diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los tratamientos. Al aplicar la prueba de Fisher se encontró que los tratamientos M20 50- 50, M20 60-40 y M40 70-30 presentaron diferencia significativa con relación a los tratamientos M40 50-50, M40 60-40 y M20 70-30,

donde los primeros alcanzaron el mayor porcentaje de ganancia de humedad, con un promedio de 5.03 ± 0.36 %; mientras que los otros tratamientos presentaron el menor porcentaje de agua absorbida, registrando un valor promedio de $2.95 \pm 1,01$ %.

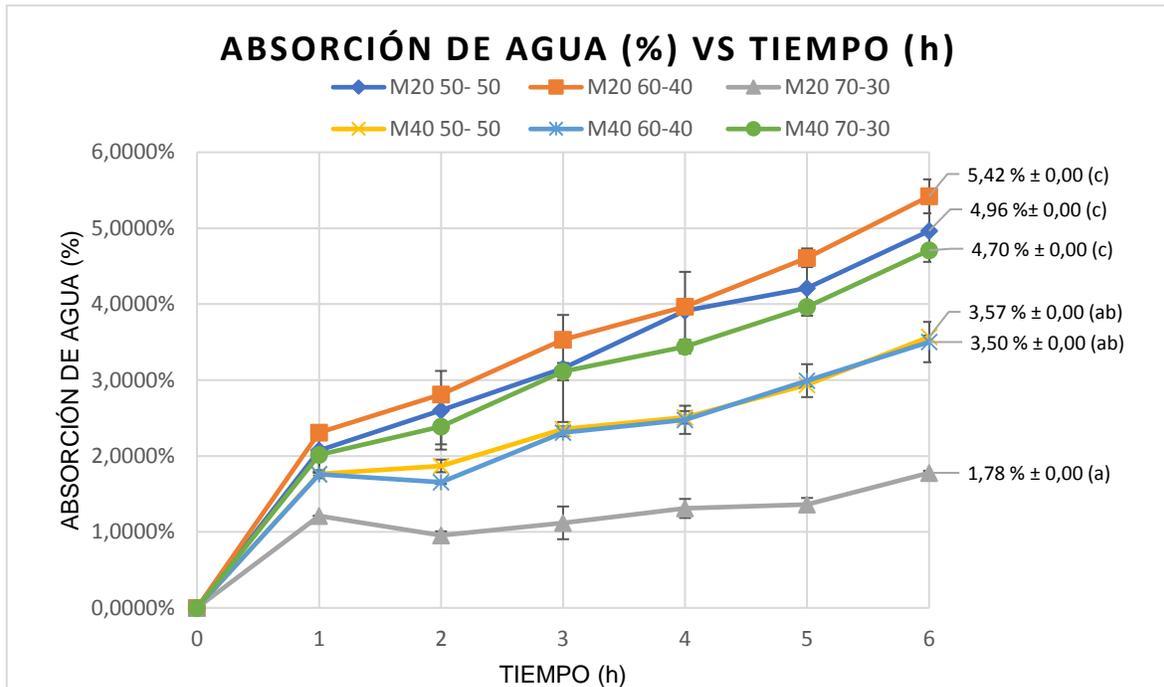


Figura 24. Absorción de agua de los materiales compuestos en 6 horas.

Para seguir evaluando la ganancia de peso de las muestras, se extendió la medición del peso de cada muestra a las 24 y 95 horas, el tratamiento que arrojó la mayor ganancia de humedad fue el M20 60-40 con valores de 13.16 y 30.87 % respectivamente, en segundo lugar, el tratamiento M20 50-50 con valores de 11.96 y 29.12%. Por último, la que menos peso ganó fue la muestra de M20 70-30 con valores de 6.81 y 21.71% respectivamente. Lo cual indica que el comportamiento en la ganancia de humedad se mantuvo luego de 95 horas de evaluación; es decir los tratamientos que más agua absorbieron durante las primeras 6 horas de evaluación mantuvieron la tendencia hasta el final del periodo evaluado.

A partir de los resultados obtenidos, se puede decir que, al tener un material compuesto más compacto, se dificulta la transferencia del agua desde el exterior hasta el interior del producto, donde el agua puede unirse a las moléculas hidrofílicas del almidón contenido en la harina de yuca y permanecer retenida, por tal razón los tratamientos con tamaño de malla 40 en su mayoría presentan bajos porcentajes de absorción, al tener menor tamaño de partícula.

La forma como los materiales absorben humedad está influenciada por su estructura, composición y tratamientos previos (Chuzel y Zakhia, 1991). Al obtener los materiales compuestos por termoformado, implica la aplicación de presión y altas temperatura (190-200 °C), a un tiempo de 50 min, lo cual puede ocasionar cambios en la estructura del material compuesto e influir en el comportamiento de absorción de agua. Este tipo de influencia ha sido manifestado por algunos investigadores durante la obtención de materiales a partir de polímeros naturales (Wlodarczyk-Stasiak y Jamroz, 2008; Navia 2011).

Por su parte, el que los materiales compuestos continúen absorbiendo agua luego de 24 y 95 horas de almacenamiento a las condiciones evaluadas, significa que el material aún contenía espacios vacíos que podían ser ocupados por las moléculas de agua, sin aún alcanzar el equilibrio con el ambiente circundante. Como es sabido, el almidón posee regiones cristalinas y amorfas, siendo las regiones cristalinas resistentes a la penetración del agua, contrario a las zonas amorfas. En la medida que los materiales absorben humedad el almidón presente reduce la cristalinidad, lo cual genera mayor disponibilidad de grupos polares, haciendo que estos puedan seguir ganando peso por la absorción de agua (Al-Muhtaseb, McMinn y Magee, 2004)

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

En la obtención de un material compuesto a partir de cascarilla de arroz, puede emplearse la harina de yuca como material aglutinante, así mismo para lograr un material compuesto con valores de esfuerzo a la ruptura superior al del poliestireno expandido de espesor de 10 mm, se debe trabajar con cascarilla de arroz molido a tamaño de partícula malla 20 o malla 40, en concentraciones de cascarilla entre 50 y 60 %, 5% de glicerol y 57 % agua, estos dos últimos porcentajes con relación a la masa sólida total; aplicando unas condiciones de termo formado de 190 °C y un tiempo de 50 min para una masa de 400 g (espesor alcanzado entre 8 y 10 mm); empleando una sandwichera (Oster, CG120W UL LISTED, China). Por otro lado, cuanto más compacto al tacto sea el material obtenido, menor cantidad de agua absorbe y mayor esfuerzo a la ruptura alcanza. El material compuesto obtenido en esta investigación podría ser empleado en la elaboración de material de empaque o envase expuesto a bajos porcentajes de humedad relativa.

4.2. Recomendaciones

En relación con el termoformado de los materiales compuestos, se puede hacer uso de termo-prensas especializadas que garanticen el proceso de obtención de los materiales compuestos en menor tiempo, controlando las condiciones de temperatura y presión, logrando de esta forma un mayor grado de homogeneidad en comparación a la sandwichera empleada en esta investigación.

Evaluar otras propiedades mecánicas y térmicas de los materiales compuestos obtenidos con la formulación establecida en esta investigación, para que con mayor precisión se identifique la aplicación que se le debería dar a este tipo de materiales.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, J. (2009). Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Colombia (tesis). Recuperado de: <http://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/001/211/2/333.794S571.pdf>
- Arias, E., y Piñeros, P. (2008). *Aislamiento e identificación de hongos filamentosos de muestras de suelo de los páramos de Guasca y Cruz Verde* (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Instituto tecnológico del plástico. AIMPLAS. (2011). *Extrusión: informe de vigilancia tecnológica 2011*. Recuperado de http://www.observatoriplastico.com/ficheros/publicaciones/126155748IT-19_Extrusion_version_web.pdf
- Avérous, L., Fringant C., y Moro, L. (2001). Plasticized starch-cellulose interactions in polysaccharide composites. *Polymer*, 42, 6565–6572.
- Avanza, M., Puppo, M., y Añon, M. (2005). Rheological characterization of amaranth protein gels. *Food Hydrocolloids*, 1–10.
- Al-Muhtaseb, A., McMinn, W., & Magee, R. (2004). Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: *Thermodynamics Characteristics*. *J Food Eng*, 62(2), 135-142.
- American Society for Testing and Materials. ASTM D638 (2010). Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken: ASTM International.
- Ballesteros, L. (2014). *Los bioplásticos como alternativa verde y sostenible de los plásticos basados en petróleo*. Recuperado de https://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2247/1/Los%20Biopl%C3%A1sticos_Laura%20Ballestero_USBCTG_2014.pdf
- Beltrán, M., y Marcilla, A. (2012). Tema 2. Tipos de plásticos, aditivación y mezclado. *Tecnología de polímeros* (pp. 57- 84). Alicante, España: universidad de Alicante.
- Bouzon, N. (2015). *Actividades alcalinas alternativas a partir de la ceniza de cascara de arroz para la fabricación de geopolímeros* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Bisht, N., & Gope, P. (2017). Effect of Alkali Treatment on Mechanical Properties of Rice Husk Flour Reinforced Epoxy Bio-Composite. *Materials Today: proceedings* 5, 24330–24338.

- Castañeda, J. Villada, H., y Mosquera, S. (2008). Evaluación de las propiedades mecánicas en harinas de amaranto termoformadas (*amaranthus caudatus*) con polvillo de fique. *Facultad de Ciencias Agropecuarias* 6(1), 61-65.
- Chuzel, G., & Zakhia, N. (1991). Adsorption isotherms of gari for stimation of packaged shelf-life. *Ineternational J Food Sci Technol*, 26 (6), 583- 593.
- Diaz, F. (2012). *Conformado de materiales plásticos*. Recuperado de http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_me c/m6/conformado%20de%20plasticos.pdf
- ENAM. (2018). Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado I Semestre 2018. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/bol_arroz_lse m18.pdf Consultado 30/04/2019.
- FAO. (2018). FAO Rice Market Monitor, April 2018, Volume XXI - Issue No. 1 <http://www.fao.org/economic/est/publications/rice-publications/rice-market-monitor-rmm/en/> consultado 30/04/2019
- Gómez, J. (2016). *Diagnóstico del impacto del plástico - botellas sobre el medio ambiente: un estado del arte* (tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Facatativá, Cundinamarca.
- González, Y., Salamanca, J., Vargas, J. (2018). The effect of potato starch modified as a coupling agent in polymer-wood fiber composites. *Prospective*, 16(1), 107-113.
- Gil, L. (27 de febrero de 2014). Propiedades físico-mecánicas: ensayos específicos sobre envase para uso alimentario. [Blog]. Recuperado de <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/120050-Propiedades-fisico-mecanicas-ensayos-especificos-sobre-envase-para-uso-alimentario.html>
- Gennadios, A., Weller, C., & Gooding, C. (1994). Measurement Errors in Water Vapor Permeability of Highly Permeable, Hydrophilic Edible Films. *Journal of Food Engineering* 21, 395-409.
- Hermida, E. (2011). *Polímeros*. Recuperado de http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09_Polimeros.pdf
- Hispack (2012). *El futuro del packaging en 10 tendencias*. Recuperado de <http://www.hispack.com/>
- Jolianis, M., y García, O. (2010). *Automatización e instrumentación de una máquina de embalaje de botellas* (tesis de pregrado). Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia.

- León, J. (2013). *Envases, Empaques y Embalajes*. Recuperado de <https://licenciadofelipeleon.files.wordpress.com/2012/06/envases-2013-material.pdf>
- Lizarazo, J., Gamboa, W., y López, L (2015). Estudio de materiales para empaque de panela pulverizada. *Matices Tecnológicos*, (6), 11-17.
- Luna, G., Villada, H., y Velasco, R. (2009) Almidón termoplástico de yuca reforzado con fibra de fique: preliminares. *Dyna*, 76, (159), 145-151.
- López, A. (2013). *Diseño, desarrollo y aplicación de envases comestibles potencialmente bioactivos* (tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.
- Majid, I. (2018). Biodegradable Packaging Materials. *Elsevier Inc. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* ,1(1), 1-11. doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.10356-X
- Moya, R. (2011). *Diseño de empaques hechos de resina poliéster reforzado con fibra de abacá para la exportación de artesanías* (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Mafla, A. (2009). Uso de la cascarilla de arroz como material de construcción. *INVENTUM*, 4(6), 74-78.
- Navia, D. (2011). *Desarrollo de un material para empaques de alimentos a partir de harina de yuca y fibra de fique* (tesis de maestría). Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Oropeza, R., Montes, A., y Padrón, C. (2016). Películas biodegradables a base de almidón: propiedades mecánicas, funcionales y biodegradación. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 7 (1): 065-093
- Perilla, C. (2017). *Estudio de alternativa al proceso de reciclaje del plástico PET en la Universidad Católica de Colombia* (tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Pérez, C. (2012). *Empaques y embalajes*. Recuperado de http://www.aliat.org.mx/BibliotecasDigitales/comunicacion/Empaques_y_embalajes.pdf
- Prada, A., y Cortés, C. (2010). La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral. *Orinoquia*, 14 (1),155-170.
- Prada, R. y Acosta-Prado, J. (2017). El molde en el proceso de inyección de plásticos para el logro de objetivos empresariales. *Dimensión Empresarial*, 15(1), 157-168. doi: <http://dx.doi.org/10.15665/rde.v15i1.1002>

- Plastics engineering company: PLENCO (2009). *Moldeo por Compresión*. (1). Recuperado de [https://plenco.com/plenco_processing_guide_spanish/Sect%2012%20Compression%20Molding%20\(Spanish\).pdf](https://plenco.com/plenco_processing_guide_spanish/Sect%2012%20Compression%20Molding%20(Spanish).pdf)
- Premalal, H., Ismail, H., & Baharin, A (2002). Comparison of the mechanical properties of rice husk powder filled polypropylene composites with talc filled polypropylene composites. *Polymer Testing* 21, 833–839.
- Petchwattana, N., & Covavisaruch, S. (2013). Effects of Rice Hull Particle Size and Content on the Mechanical Properties and Visual Appearance of Wood Plastic Composites Prepared from Poly(vinyl chloride). *Journal of Bionic Engineering* 10, 110–117.
- Ruiz, S. (2017). Preparación y caracterización de geopolímeros empleando como materia prima cenizas de cáscara de arroz. (Tesis de pregrado). Universidad de Jaén, Andalucía, España.
- Sorrentino, A., Gorrasi, G., Vittoria, V. (2007). Potential perspectives of bionanocomposites for food packaging applications. *Trends in Food Science and Technology* 18, 84–95
- Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Rosa, M. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: A review. *Trends in Food Science and Technology* 19, 634–643
- Sierra, N., Plazas, C., Guillén, L., y Rodríguez, P. (2010). Protocolo para el control de calidad de envases de plástico, utilizados en la industria farmacéutica, de cosméticos y de alimentos. *Colomb. Cienc. Quím. Farm*, 39 (2), 149-167. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rccqf/v39n2/v39n2a04.pdf>
- Tserki, V., Matzinos, P., Kokkou P., y Panayiotou, C. (2005). Novel biodegradable composites based on treated lignocellulosic waste flour as filler. Part I. Surface chemical modification and characterization of waste flour. Composites Part A: *Applied Science and Manufacturing*, 36 (7), 965-974.
- UP. (2018). *Extrusión*. Recuperado de https://fido.palermo.edu/servicios_dyc/blog/docentes/trabajos/23839_78929.pdf
- Urrutia, M., Bustillo, C., y Salinas, J. (8 de agosto de 2010). Normas ASTM para pruebas mecánicas. [Blog]. Recuperado de <https://sites.google.com/site/labmecanicadematerialesunah/noticias/normasastmparapruebasmecanicas>
- Utrera, L., Pérez, F., Botana, F., y Botana-Galvín, M. (2017). Estrategias en el análisis de muestras de materiales compuestos para la cuantificación de

porosidad mediante el análisis de imagen. *Revista de la Asociación Española de Materiales Compuestos*, 1(1), 162-168.

Vargas, J., Alvarado, P., Vega-Baudrit, J. y Porras, M. (2013). Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. *Revista Científica*, 23(1), 87-102.

Valverde, A., Sarria, B., Monteagudo, J. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica* Año XIII, No 37. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.

Wlodarczyk-Stasiak, M., & Jamroz, J. (2008). Analysis of sorption properties of starch-protein extrudates with the use of water vapour. *J Food Eng*, 85(4), 580-589.

Yu, T., Li, Y., & Ren, J. (2009). Preparation and properties of short natural fiber reinforced poly (lactic acid) composites. *Trans. Nonferrous Met Soc China*, 651-655.