

ELABORACIÓN DE MATERIALES REFORZADOS CON CARÁCTER BIODEGRADABLE A PARTIR DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD Y BAGAZO DE CAÑA MODIFICADO

René Salgado-Delgado^{1*}, Laura Coria-Cortés¹, Edgar García-Hernández¹, Zully Vargas Galarza¹, Efraín Rubio-Rosas², Ismael Crispín-Espino³

1) Instituto Tecnológico de Zacatepec, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. Calzada Tecnológico No. 27 Zacatepec Morelos, C.P. 62780, renesalgado@hotmail.com

2) Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Centro Universitario de Vinculación. Prolongación de la 24 sur y Av. San Claudio, Cd. Universitaria. Col. San Manuel, C.P. 72570.

3) Facultad de Ciencias Químicas UASLP.

RESUMEN

Debido a la importancia de la protección ambiental, el objetivo de este trabajo es elaborar y caracterizar químicamente materiales compuestos de polietileno de baja densidad con bagazo de caña modificado mediante un tratamiento alcalino y por acetilación, para su posible uso como materiales biodegradables y evaluación de sus propiedades físicas. En este trabajo se elaboraron y caracterizaron materiales compuestos con polietileno de baja densidad utilizando como carga el bagazo natural, el bagazo tratado alcalinamente y el bagazo natural con acetilación, además se estudiaron las propiedades mecánicas de esfuerzo a la tensión (norma: ASTM D-1708) del material después de su exposición en tierra por 1, 2 y 3 meses, para determinar posibles cambios que pudieran atribuirse a una posible biodegradación. Los análisis de caracterización, corroboran el efecto de los diferentes tratamientos químicos sobre la fibra de bagazo proporcionando un carácter hidrófobo para el caso de la acetilación de la fibra y la hidrólisis sugerida por la exposición de los materiales compuestos a tierra e intemperismo y la disminución del esfuerzo mecánico de los mismos a la tensión a 1 y 2 meses después de exponerlos.

Palabras claves: Materiales reforzados, polietileno de baja densidad, bagazo de caña.

ABSTRACT

The aim of this work is to develop and characterize chemical compounds of low density polyethylene modified with sugar cane bagasse by alkaline treatment and acetylation, for possible use as biodegradable materials and evaluation of their physical properties. In this work we developed and characterized compounds with low density polyethylene used as a natural load bagasse, alkali treated bagasse, bagasse with natural acetylation also studied

The mechanical properties of tensile (NORMA: ASTM D-1708) of material after his exhibition in land for 1, 2 and 3 months to determine possible changes that could assume to a possible biodegradation. The analyses of characterization corroborate the effect of the different chemical treatments on the fiber of bagasse providing a hydrophobic character for the case of the acetylation of the fiber and the hydrolysis suggested by the exhibition of the composite materials to land and the decrease of the mechanical properties of tension to 1 and 2 months after exposed in land. The possible changes in the properties that could be attributed to a possible degradation.

Keywords: Composite materials, LDPE, cane bagasse

1. INTRODUCCIÓN

En México se generan al día once mil toneladas de desechos sólidos, de las cuales los plásticos representan cerca del 20% del volumen total, y aproximadamente el 12% en peso. Los plásticos están presentes en todos los ámbitos de la sociedad [1]. Los avances conseguidos por estos en los últimos 30 años no habrían sido posibles sin este material, que es fundamental en sectores como la agricultura, la industria, la alimentación, la medicina, las telecomunicaciones o el transporte. Son versátiles, duraderos, con una buena relación costo/eficacia, seguros y ligeros, y

todas esas cualidades los han convertido en la opción elegida por fabricantes de diferentes áreas. Entre las exigencias actuales se incluye también la necesidad de encontrar un equilibrio entre esas ventajas y la protección del medio ambiente. Las sustancias macromoleculares de origen natural son muy bien conocidas por los microorganismos y estos dan cuenta de ellas una vez que han cumplido su función. El proceso de degradación de un árbol, la seda, el algodón, los tejidos toma un tiempo razonable, lo suficiente como para que el ambiente se limpie y los residuos sean incorporados en un ciclo para que la vida continúe. Esto no sucede con el plástico, y una vez que ya se le haya dado el uso apropiado, le tiran al vertedero de desechos y allí pernochará por miles de años; se cree que por mucho más de seis mil años [2]. Las bacterias no conocen estos materiales y, por lo tanto, no los digieren y puede pensarse que si el hombre no los construye de manera programada, o no crea bacterias capaces de digerir el material sintético, el problema será tan grave que puede catalogarse como: materiales contaminantes del medio ambiente. Podemos decir que de seguirse con el uso irracional de los plásticos, como ha sucedido, no hay duda de que dentro de unas generaciones esto sea un grave problema. El polietileno de baja densidad es el más empleado representa el 33% de producción de todos los plásticos [1] y se utiliza sobre todo en bolsas, tanto comerciales como de saco, para cubos de basura, bidones, etc. Es también el principal componente de juguetes, agricultura, piezas para la industria y para la construcción, pero presenta un problema, no es biodegradable y afecta ampliamente el medio ambiente. Por lo que ha cobrado un mayor interés la búsqueda de materiales compuestos biodegradables y se están planteando diversas estrategias para resolver los aspectos básicos de esta problemática, como son la mayor biodegradabilidad de los materiales compuestos, la compatibilidad de las mezcla polímero sintético-celulosa y las propiedades físicas y mecánicas de los materiales compuestos obtenidos. Una de las estrategias poco exploradas hasta el momento es la mezcla de polímeros sintéticos con la celulosa del bagazo de caña modificado, lo cual podría traer consigo mejores materiales en lo que se refiere a los aspectos antes mencionado y además la utilización del bagazo de caña podría aumentar sus usos obteniendo un valor agregado, generando un alto impacto ambiental [3-6].

Debido a los problemas ambientales en torno a la disposición final de los materiales plásticos que no son degradables en el medio ambiente, y a la utilización de recursos renovables que sean económicos y seguros, y sobre todo que posean el atributo de ser biodegradables, se plantea la alternativa de emplear el polietileno de baja densidad y el bagazo de caña de azúcar modificado, para elaborar materiales compuestos con posible carácter biodegradable. Una de las estrategias que han sido poco exploradas hasta el momento es la mezcla de polímeros sintéticos con celulosa obtenida del bagazo de caña modificada, lo cual podría resultar en la obtención de materiales con

propiedades específicas y con posible carácter biodegradable.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Material. Se utilizó bagazo de caña de azúcar como materia prima, el cual se adquirió (donado) por el Ingenio *Emiliano Zapata*, ubicado en la población de *Zacatepec*, municipio del *Estado de Morelos*. Como reactivos se empleó lo siguiente: polietileno de baja densidad (*Aldrich* CAS: 9002-88-4), agua destilada (reactivos *Karal* CAS: 7732-18-5), anhídrido acético (reactivos *Karal* CAS: 108-24-7), ácido clorhídrico (reactivos *Karal* CAS: 7647-01-0), hidróxido de sodio (reactivos *Karal* CAS: 1310-73-2). Para las pruebas de biodegradabilidad del material compuesto, se utilizó un suelo tipo limo arcilloso de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos y cribado con la malla 40 [7].

2.2. Equipo. El instrumental utilizado fué: Equipo de análisis infrarrojo Modelo PRS, marca *MIDAC*. Microscopio óptico *Intel Play QX3*. Tamices de diferentes números de malla (10, 20, 30, 40, 60, 100 y 200) marca *FIIC*, S.A. de C.V. Estufa de secado, marca *SHEL LAB*, modelo N° VA1. Estufa marca *Thermolyne*. Parrilla con agitador magnético, modelo *Nuova*, marca *Thermolyne*. Analizador Termogravimétrico, marca *TA Instruments*, modelo Q600 SDT Simultaneous DSC/TGA. Microscopio electrónico de barrido *JEOL*, JSM-5600LV. Equipo de pruebas universales, marca *Instron*, modelo 5000.

2.3. Metodología.

2.3.1. Modificación de la superficie del bagazo. En esta investigación se tamizó el bagazo de caña durante 7 minutos y se seleccionó el tamaño de fibra malla 100. El bagazo se lavó con agua destilada durante 10 minutos con agitación y a temperatura ambiente, lo anterior para eliminar impurezas adheridas a la fibra de origen. Se filtro sobre papel filtro, y las muestras se secaron en una estufa a 70°C durante 24 horas para darles posteriormente un tratamiento con solución alcalina.

2.3.2. Tratamiento alcalino. Se llevó a cabo un tratamiento alcalino sobre el bagazo de caña durante 120 minutos, para ello se utilizó una solución de hidróxido de sodio 0,5 N y con una proporción de 500 mL solución alcalina/50 g de fibra de bagazo. Una vez transcurrido el tiempo de tratamiento alcalino, las muestras se neutralizaron con HCL, y se lavaron con agua destilada. Las muestras se secaron en una estufa a 70°C durante 24 horas hasta alcanzar un peso constante.

2.3.3. Tratamiento de acetilación. La modificación superficial de la fibra mediante acetilación se realizó usando 5 g de fibra de bagazo de caña, previamente secado durante 12 horas a 80°C y una solución de anhídrido acético-acetona 1:3 (1 mL de anhídrido acético por 3 mL de acetona). El bagazo de caña se coloca en un matraz bola de 2 bocas con 20 mL de solución de

anhídrido acético y 0,2 mL de una solución de NaOH 0,5 M. Se colocó a reflujo durante 3 horas. La solución se filtró y la fibra separada se secó durante 12 horas después del secado se lavó con acetona durante dos horas con agitación y se dejó secar por 24 horas. Posteriormente se caracterizó en el espectrofotómetro FTIR.

2.3.4. Tratamiento alcalino- acetilado. Para este tratamiento se siguen el procedimiento del tratamiento alcalino seguido del tratamiento de acetilación como se menciona anteriormente.

2.3.5. Elaboración de las probetas para las pruebas de tensión y análisis de degradación en tierra (norma ASTM D-1708). Las probetas para las pruebas de esfuerzo a la tensión y degradación se obtuvieron bajo la norma ASTM D-1708. Estas se elaboraron con una proporción de bagazo/polietileno (30/70%) en peso, usando una inyectora marca *Atlas* modelo LMM con capacidad para un gramo, se fundió el polietileno a 140°C durante 2 minutos y después se agregó el bagazo, el cual se mezcló durante 5 minutos a la misma temperatura, una vez transcurrido el tiempo, se inyectó sobre un molde, el cual se encontraba a una temperatura de 110°C, con dimensiones de acuerdo a la norma establecida anteriormente. Se tomó un recipiente de plástico de forma rectangular de 20 x 30 x 15 cm y se le agregó tierra hasta llenarlo. Los materiales compuestos obtenidos (probetas) fueron colocados en el interior de este recipiente enterrándolos a 10 cm de profundidad en tierra y a unos 5 cm de distancia entre probeta y probeta. Los recipientes fueron colocados en una estufa donde se mantuvo controlada la temperatura a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y $57 \pm 2\%$ de humedad relativa. Las probetas se retiraron en diferentes tiempos 1, 2 y 3 meses, para su análisis de caracterización en evaluación mecánica [8].

2.4. Técnicas de análisis.

2.4.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM). Con el fin de observar los cambios morfológicos provocados a la superficie del bagazo de caña por los tratamientos químicos aplicados, así como el análisis microscópico del modo de fractura en las películas sometidas a la prueba de resistencia al esfuerzo de tensión, se utilizó un microscopio electrónico de barrido modelo *JEOL*, JSM-5600LV.

2.4.2. Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). El análisis espectroscópico FTIR se realizó por medio de la técnica que implica el uso de pastillas de KBr. El equipo utilizado fue el PRS, marca *MIDAC*, el fin de aplicar esta técnica de análisis fue de caracterizar el polietileno de baja densidad, la fibra del bagazo de caña natural y modificada.

2.4.3. Análisis termogravimétrico. Este análisis se realizó con el objetivo de obtener el porcentaje de pérdida de humedad, además del porcentaje de residuos y la temperatura de descomposición de las diferentes muestras del bagazo de caña natural y modificada, además del

material compuesto polietileno con las diferentes modificaciones del bagazo.

2.4.4. Análisis de carácter hidrófobo de la fibra en un sistema agua-tolueno. Se realizó la prueba de afinidad al agua de las muestras de bagazo de caña y consistió en colocar 0,5 g de bagazo de caña natural o modificada entre una mezcla de agua/tolueno al 50%, para observar con cuál de estas dos líquidos la fibra presenta mayor afinidad y comparar el carácter hidrófobo o hidrófilo de las fibras tratadas contra las que no recibieron tratamiento químico.

2.4.5. Ángulo de contacto. Para esta prueba se utilizó un microscopio óptico digital modelo Intel Play QX3 y una micropipeta de capacidad 2-20 μL . Se obtuvieron imágenes de las microgotas depositadas sobre la superficie del material compuesto. Con esta técnica se relaciona en forma cuantitativa las propiedades hidrófobas o hidrófilas de un material en base al ángulo de contacto que se genera en la superficie del material compuesto y la microgota depositada.

2.4.6. Evaluación de las propiedades mecánicas de tensión. Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos se evaluaron por estudios de tensión de acuerdo con la norma ASTM D-1708. Tal como se ha evaluado en la literatura [1, 9,10].

3. RESULTADOS

Con el fin de verificar si hubo un cambio de los grupos funcionales en la superficie del bagazo de caña antes y después del tratamiento químico se realizó el análisis de FTIR. En la Figura 1 se observa que el tratamiento alcalino modifica la superficie de la celulosa del bagazo de caña, ya que con este tratamiento desaparece la señal de $1.700\text{-}1.756\text{ cm}^{-1}$ que corresponde al estiramiento del C=O presente en la lignina y también disminuye a señal de estiramiento del C=C (1.600 cm^{-1}) correspondiente al anillo aromático presente en la lignina. Durante la acetilación se puede observar que aparece nuevamente el carbonilo C=O ($1.700\text{-}1.750\text{ cm}^{-1}$). Además, se observa un ensanchamiento en las señales del modo vibracional del O-H ($3.200\text{-}3.700\text{ cm}^{-1}$) debido a evidencia de un mayor número de tipo de grupos hidroxilos expuestos por el tratamiento [3].

En la Figura 2 se observa el FTIR del bagazo natural y del bagazo modificado por acetilación donde se pueden observar las señales de modo vibracional del grupo carbonilo C=O ($1.700\text{-}1.750\text{ cm}^{-1}$) que es más aguda debido a los grupos acetilos formados sobre la estructura celulósica.

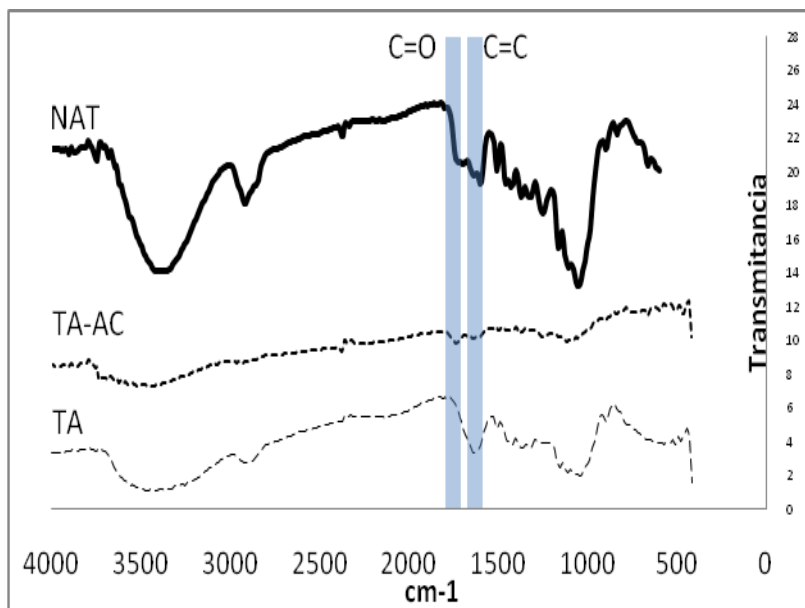


Figura 1. Análisis comparativo FTIR entre las muestras del bagazo natural (NAT), bagazo tratado alcalinamente (TA) y bagazo tratado alcalino-acetilado (TA-AC).

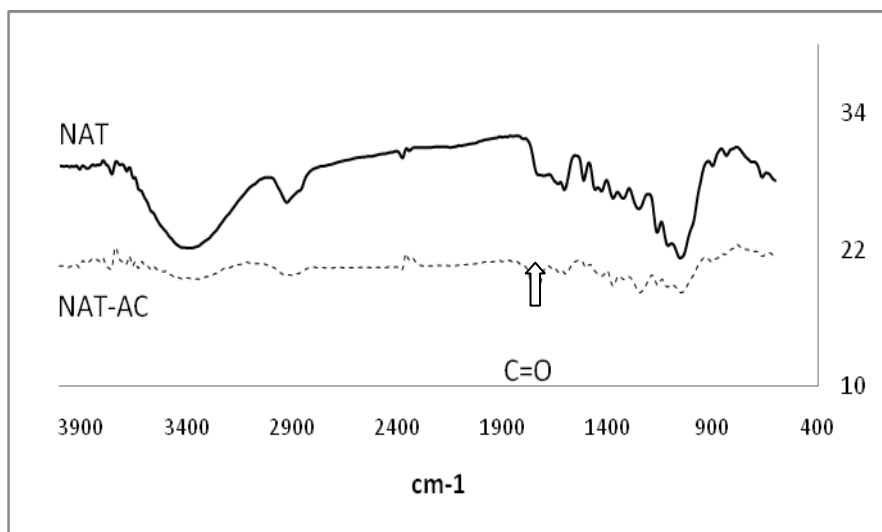


Figura 2. Análisis comparativo FTIR entre las muestras del bagazo natural (NAT) y bagazo tratado con acetilación (NAT-AC).

En la Figura 3 se observa un análisis de curva de secado confirmando que la acetilación sobre la fibra esta adquiriendo un mayor porcentaje de carácter hidrófobo a la fibra manteniendo de un 4% de humedad para la fibra natural-acetilada y de 5,42% para la fibra alcalina-acetilada.

En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos del porcentaje de pérdida en peso de humedad de la fibra de bagazo natural y modificado. El menor porcentaje lo presenta el natural-acetilado. Con lo que se corrobora que este tratamiento provocó un cierto carácter hidrófobo en la fibra.

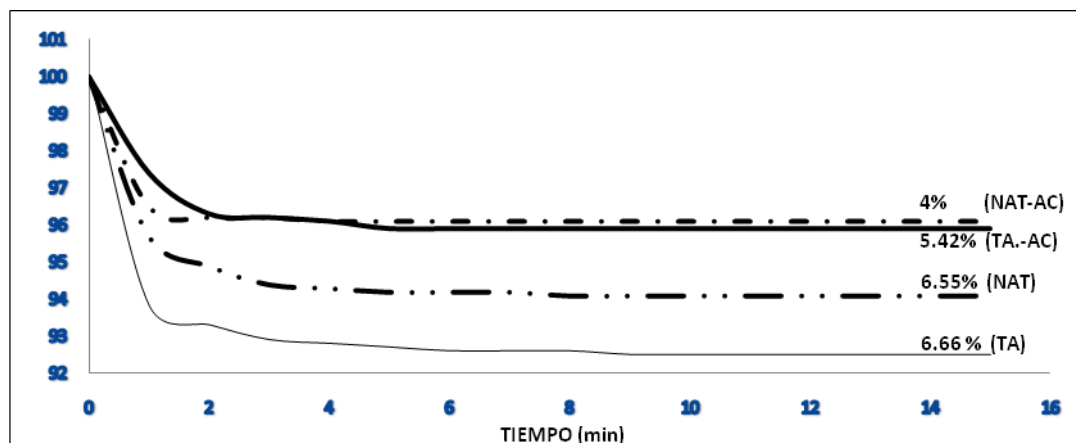


Figura 3. Análisis comparativo de la pérdida en peso de la fibra de bagazo natural (NAT) debida al tratamiento químico: Bagazo tratado alcalinamente (TA), bagazo natural acetilado (NAT-AC) y bagazo tratado alcalinamente y acetilado (TA-AC).

Tabla 1. Pérdida en peso de humedad de la fibra natural y fibra tratada.

<i>Clave</i>	<i>Descripción muestra de bagazo</i>	<i>Porcentaje en peso</i>
(NAT)	Natural	6,55
(NAT-AC)	Natural acetilado	4,00
(TA)	Tratamiento alcalino	6,66
(TA-AC)	Alcalino – acetilado	5,42

La estabilidad térmica de la fibra es estudiada por el análisis TGA, en la Tabla 2, se muestran los resultados del análisis termogravimétrico y se observa un incremento en la temperatura de descomposición del bagazo al recibir el tratamiento alcalino y aun mas cuando se acetila.

Tabla 2. Temperatura de descomposición del bagazo natural y tratado.

Tratamientos	Temperatura de descomposición/ °C
NAT	244,7
NAT-AC	259,5
TA	247,2
TA-AC	258,3

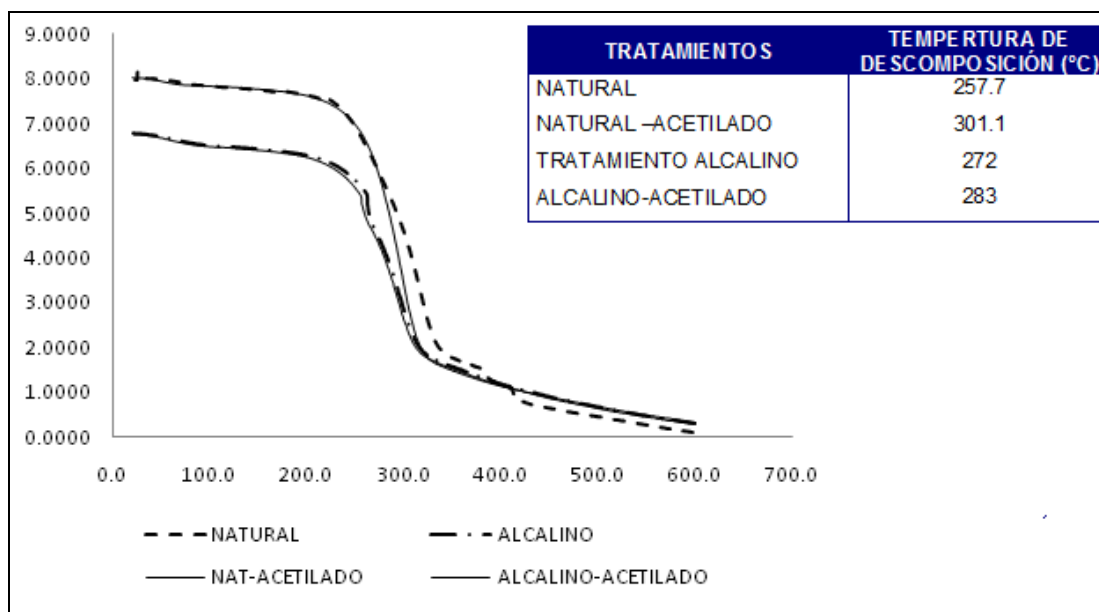


Figura 4. Análisis comparativo de TGA del material reforzado con bagazo natural y tratado.

En la Figura 4 se tienen los resultados obtenidos del análisis termogravimétrico del material compuesto con las diferentes cargas de fibra (natural y tratada), se observa un aumento en la temperatura de descomposición de los materiales reforzados que contienen fibra de bagazo tratado alcalinamente siendo mas elevada cuando se emplea fibra acetilada.

En la Figura 5, se observa el resultado de afinidad al agua/tolueno en la cual se aprecia que aquellas muestras de bagazo que fueron acetiladas tuvieron mayor afinidad con el tolueno que con el agua, contrario sucede con la muestra que no fue acetilada y que se hunde en la fase acuosa. Lo anterior ocurrió debido a que la adición de los grupos acetilos sobre la superficie del bagazo disminuye su carácter hidrófilo, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en el análisis de humedad.

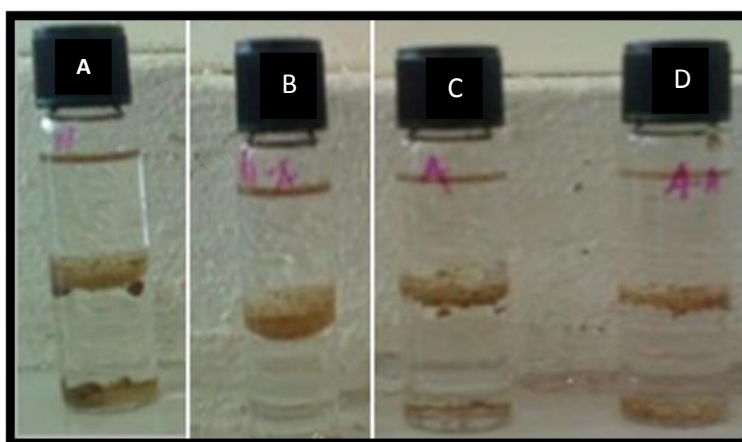


Figura 5. Prueba de afinidad en agua/tolueno, A: Bagazo natural (NAT), B: Bagazo natural acetilado (NAT-AC), C: Bagazo tratado alcalinamente (TA), y D: Bagazo tratado alcalinamente y acetilado (TA-AC).

En la Tabla 3, se muestran los resultados de la prueba de resistencia al esfuerzo de tensión, para esta prueba se utilizaron probetas según la norma ASTM D-1708, se realizaron 3 repeticiones por cada tratamiento registrando al final la media de los resultados.

En los resultados podemos observar que las probetas tienden a disminuir su resistencia de acuerdo a los meses en que estuvieron enterradas. Así como también se observa una disminución de propiedades mecánicas para el caso de las probetas reforzadas con el bagazo tratado alcalinamente.

Tabla 3. Resultados de las pruebas mecánicas de tensión a 0,1, 2 y 3 meses de exposición en tierra en condiciones normales de intemperismo.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS MECANICAS				
	0 MESES	1 MES	2 MESES	3 MESES
Natural (NAT)	86,30 N	72,47 N	66,60 N	60,83 N
Natural-acetilado (NAT-AC)	52,60 N	73,16 N	69,28 N	62,58 N
Alcalino (TA)	68,40 N	66,05 N	53,85 N	52,95 N
Alcalino-acetilado (TA-AC)	86,60 N	67,70 N	75,25 N	71,18 N
Polietileno (PE)	78,55 N	71,51 N	70,64 N	70,60 N

En la Figura 6 se muestra la imagen de una microgota depositada en la superficie del material compuesto y el ángulo formado por este sobre la superficie. Esta prueba fue realizada con el fin de obtener información del grado de afinidad que tiene la superficie del material compuesto con el agua y observar si existía diferencia del ángulo de contacto respecto a los tratamientos aplicados a la fibra de bagazo que se utilizó como carga en el material compuesto.

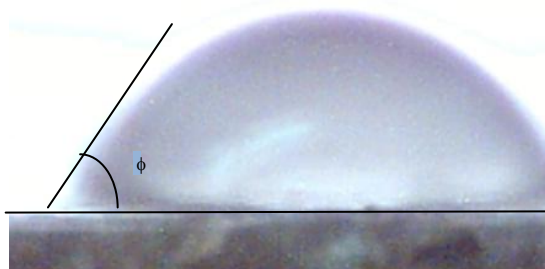


Figura 6. Imagen de una microgota de agua depositada sobre la superficie del material reforzado y el ángulo de contacto generado.

En las Figuras 7 y 8 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de los ángulos de contacto generados por la microgota depositada sobre los materiales compuestos (los cuales contienen las fibras sin tratar y tratadas). Se observa que el material que presenta un comportamiento más hidrófobo es el material que estuvo en un tiempo de cero meses de exposición.

Lo anterior debido a la disminución del ángulo de contacto en las probetas que fueron expuestas 1 y 2 meses sugiriendo una biodegradación por la exposición en tierra adquiriendo así un carácter más hidrófilo.

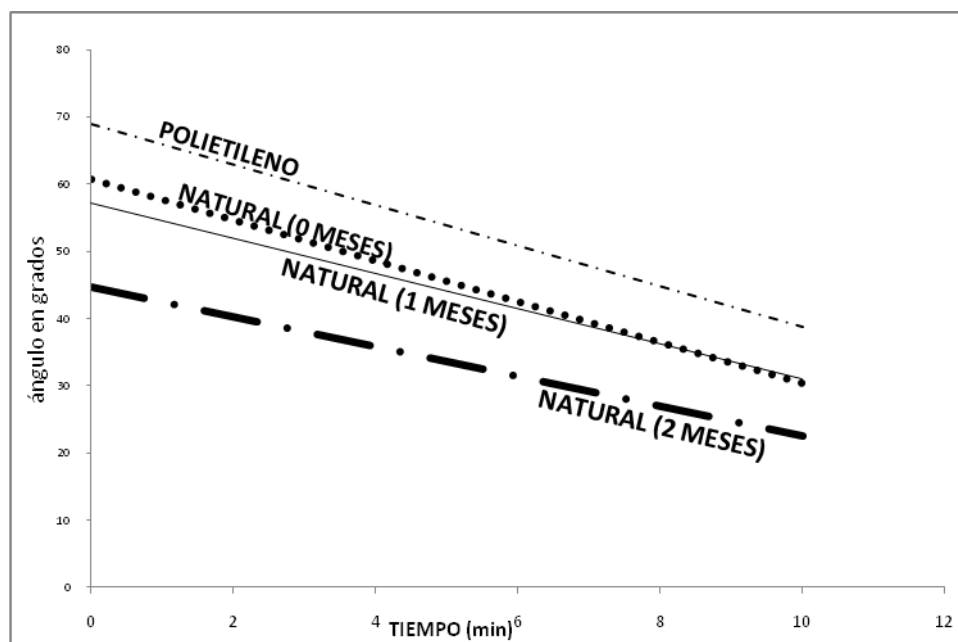


Figura 7. Resultados de la evaluación del ángulo de contacto formado entre los materiales reforzados con el bagazo de caña sin tratamiento y una microgota de agua con respecto al tiempo.

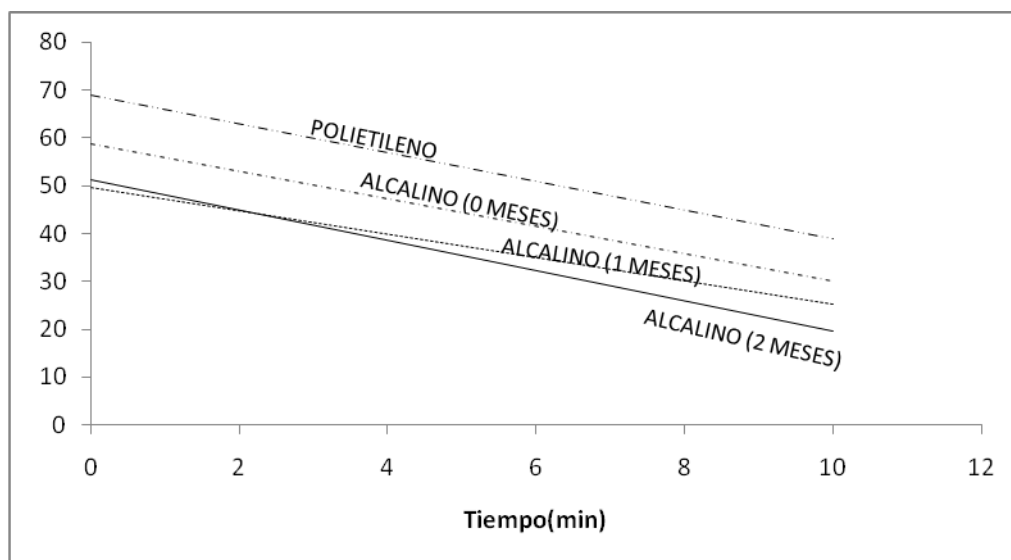


Figura 8. Resultados de la evaluación del ángulo de contacto formado entre los materiales compuestos con el bagazo de caña con tratamiento alcalino y una microgota de agua con respecto al tiempo.

4. CONCLUSIONES

Se demostró por medio del análisis de FTIR que el tratamiento alcalino modifica superficie de la celulosa del bagazo de caña, al mostrar cambios de ensanchamiento en las señales de modo vibracional del O-H ($3.200-3.700\text{ cm}^{-1}$), generando un cierto carácter hidrófilo en el bagazo. Lo

anterior es corroborado con el análisis de curva de secado y prueba de afinidad en el cual se muestra una diferencia de ganancia de porcentaje de humedad 0,11% en este tratamiento respecto a la natural. Lo anterior debido a que el tratamiento alcalino, además de eliminar lignina y ceras, también genera rompimiento en la estructura celulósica permitiendo una mayor absorción de moléculas de agua [3].

Se demostró por medio del análisis FTIR que el tratamiento de acetilación modifica la superficie del bagazo caña, al mostrar la presencia de la señal de modo vibracional de estiramiento del grupo carbonilo (C=O) debido a los grupos acetilo formados en la fibra. Lo anterior genera un cierto carácter hidrófobo en el bagazo y se corrobora este efecto con el análisis de curva de secado y prueba de afinidad en el cual se muestra una diferencia en pérdida de porcentaje de humedad de 2,55% en este tratamiento de acetilación con respecto al natural y una diferencia de 1,24% con respecto al que recibió tratamiento alcalino.

La prueba de afinidad tolueno-agua demuestra el carácter hidrófobo e hidrófilo adquirido por el bagazo de caña en sus diferentes modificaciones químicas [1].

De acuerdo con las pruebas mecánicas a la tensión y el ángulo de contacto, el bagazo tratado alcalinamente podría estar rompiendo la estructura molecular dejando mas al descubierto los OH, generando una mayor adsorción de agua que podría estar provocando un mayor alto porcentaje de hidrólisis y esto puede estar disminuyendo las propiedades mecánicas [9].

Cabe mencionar que el mecanismo de degradación de este tipo de material ha sido poco estudiado por lo que en este trabajo se pretendió estudiar algunos parámetros o variables que puedan permitir a futuros trabajos poder seguir estudiando el proceso de biodegradación. Hasta este momento, las variables estudiadas y los resultados obtenidos aportan información valiosa para continuar con este tema de investigación.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Guilbert E “*Modificación de la superficie de la cascarilla de arroz usando diclorodimetilsilano y triclorovinilsilano como agentes acoplantes y el uso de esta en la obtención de materiales compuestos usando Polipropileno (PP) como matriz polimérica*”. Tesis de Maestría. Mexico. Instituto Tecnológico de Zacatepec, 2006
- [2] Perdomo GA, *Rev. Iberoam. Polim*, **3** (2) 345 (2002)
- [3] Salgado R “*Composito poliméricos reforzados con cascarilla de arroz modificada en su superficie*”. Tesis de Doctorado. Mexico. Universidad Autónoma de Querétaro, 2009
- [4] Pataky B, Perczel S, Sachetto JP, *J. Polym. Sci. Symposium*, **43**, 267 (1973)
- [5] Abdelwahab NA, Helaly FM, *J. Elast. & Plas.*, **40(4)** 347 (2008)
- [6] Apolonio V “*Elaboración y caracterización de películas de Polietileno y almidón de plátano modificado*”. Tesis de Doctorado. México. Instituto Tecnológico de Zacatepec (México), 2009.
- [7] Juárez B, Rico R “*Mecánica de Suelos*”. Tomo 1, Editorial Limusa, México, 1994 p.149-161
- [8] Vargas Apolonio, Zamudio Paul Baruk, Salgado René, Bello LA, *J. App. Polym. Sci.*, **106(6)**, 3994(2007)
- [9] Norma ASTM D 1708. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, Vol 8.01, Filadelfia

(USA): American Society for Testing and Materials, 2003

[10] Apolonio V, Zamudio P, Salgado R, Bello LA, *J. Appl. Polym. Sci.*, **110(6)**, 3464 (2008)

[11] Askeland DR “*Ciencia e Ingeniería de los Materiales*”, Editorial Iberoamericana, México, 1997