

Estudio de la influencia del medio alcalino en la estructura y elongación de las fibras de henequén (*Agave fourcroydes* Lemaire)

Study of the influence of alkaline medium on the structure and stretch fibres henequen (*Agave fourcroydes* Lemaire)

Magali Torres Fuentes^{1*} y Fernando Fernández Urquiza²

Palabras clave

medio alcalino;
estructura química;
elongación;
fibra de henequén;

Resumen

El conocimiento de la composición química y estructura interna de las fibras vegetales tiene gran importancia para comprender cómo actúa el medio alcalino en la degradación de las mismas y cómo influye esto en la elongación. Se estudió un corte longitudinal de la fibra de henequén (*Agave fourcroydes* Lemaire) por microscopía electrónica. Para simular el medio cementicio, se prepararon disoluciones de pH 10,3; 11,5; 12,1 y 13 en las que se sumergieron las fibras, y se tomaron muestras a diferentes tiempos de las disoluciones y las fibras. En las disoluciones se determinó la presencia de carbohidratos con la reacción de alfa naftol en medio ácido. A las fibras se les determinó el % de elongación. Como resultado se observó en el microscopio electrónico la presencia de la pared celular cuyo componente principal es la celulosa. El incremento de carbohidratos en las disoluciones fue una medida de la degradación. La elongación de las fibras disminuyó con el tiempo, es menor a los 180 días para todas las muestras con relación a la medición inicial. A pH 13, se observaron los mayores valores de elongación de las fibras.

Keywords

alkaline medium;
chemical structure;
elongation;
fibre henequen;

Abstract

The knowledge of the chemical composition and the internal structure of plant fibers is very important to understand the way basic medium acts in the degradation of such fibers and how this factor influences elongation. A longitudinal section of the fiber henequen (*Agave fourcroydes* Lemaire), was studied by electron microscopy. To simulate the cementitious medium, solutions of pH 10, 3; 11, 5; 12, 1 and 13 were prepared for the fibers to be immersed in, and samples of the solutions and the fibers taken at different times. The presence of carbohydrates in the solutions was determined by alpha naphthol reaction in acid medium. The elongation percentage of the fibers was also defined. As a result, the presence of the cell wall, whose main component is cellulose, was viewed through the electronic microscope. The increase of carbohydrates in the solutions was a measure of degradation. This process increased as time went by. The elongation of fibers decreased over time; being less, after 180 days, for all samples related with initial measure. Higher values of the elongation of fibers were observed at pH 13.

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la estructura interna de las fibras vegetales y de su composición química tiene gran importancia para comprender como podrá influir su presencia en las propiedades de los materiales compuestos donde son empleadas como refuerzo.

Como parte de los materiales de construcción, las fibras vegetales se han concebido desde milenios, por ejemplo, el empleo de fibras como refuerzo de yeso viene desde el Renacimiento (Savastano, 2000). Innumerables evidencias arqueológicas dan fe de que en Babilonia y en Egipto las fibras vegetales se combinaron con mezclas de arcilla para fabricar elementos estructurales. Desde la antigüedad las fibras han sido empleadas en la construcción para disminuir la fragilidad de los materiales. Los antiguos egipcios empleaban la paja para reforzar los ladrillos que cocían al

sol y los romanos usaban la crin de los caballos para hacer enlucidos y morteros.

1.1. Fundamentación del empleo de las fibras vegetales en la construcción

Los materiales compuestos son un sistema formado por más de una fase en una escala macroscópica cuyas propiedades y comportamientos son superiores a las de los materiales que las componen cuando actúan de manera independiente (Bojórquez, 2005). En cualquier material compuesto se establecen relaciones entre tres aspectos: el proceso (incluye control de las reacciones químicas), microestructura y propiedades (Jennings, 1991).

Las fibras vegetales están compuestas fundamentalmente por celulosa, hemicelulosas y lignina.

1.2. Estructura de las fibras vegetales

Williams (2003) menciona que una de las características distintivas de las células vegetales es la presencia en ellas de la pared celular.

* Autor de contacto: magali.torres@umcc.cu

¹ Universidad de Matanzas, Cuba.

² Centro de Estudios Biotecnológicos de la Universidad de Matanzas, Cuba

Según, Valenciaga y Chongo, 2004, en la pared celular está del 35 al 80 % de la materia orgánica de los tejidos vegetales.

La pared celular está constituida por dos fases: fase fibrilar o esqueleto y fase amorfa o matriz. La fase fibrilar está formada por celulosa que se combina en una disposición muy ordenada (mediante puentes de hidrógeno) que le otorga propiedades cristalinas, formando fibrillas elementales que se reúnen en microfibrillas. La fase amorfa está formada por hemicelulosas, compuestos pécticos y glucoproteínas.

La glucosa es la unidad estructural (monómero) más simple, que se repite en el espacio para formar la celulosa (polímero). La estructura cíclica de la glucosa, (figura 1) se representa mediante fórmulas de Fischer y Haworth.

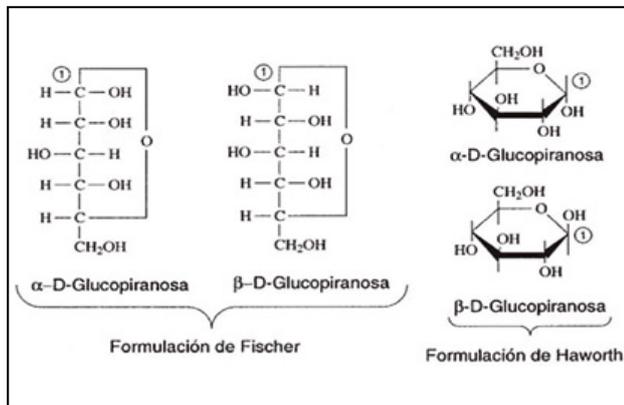


Figura 1. Formulación de Fischer y de Haworth para la glucosa. Fuente: Tomada de Primo, E.

La glucosa es un monosacárido con fórmula molecular $C_6H_{12}O_6$. La aldohexosa glucosa posee dos enantiómeros, la L-glucosa y la D-glucosa, esta última es predominante en la naturaleza. La forma D-Glucosa, se cicla, formando un hemiacetal para dar su forma piranosica (D-glucopiranosica) que a su vez presenta anómeros alfa (α) y beta (β).

La estructura cíclica de los monosacáridos se representa mejor mediante la formulación hexagonal de Haworth, (figura 1) en ésta, los grupos hidroxilo (-OH) de la derecha están situados por debajo del plano y el $-CH_2OH$ por encima del mismo (en la configuración D). En el C_1 el isómero α tiene el -OH por debajo del plano y el β por encima, todo ello si la posición del O puente es posterior y el C-1, está a la derecha (Primo, E. s/a).

En realidad, los azúcares no son planos sino que toman la configuración más estable que es la silla (figura 2).

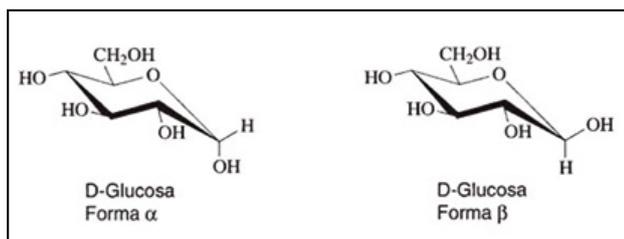


Figura 2. Conformación silla para la glucosa. Fuente: Tomada de Primo, E.

En la formación de la molécula de celulosa, acontecen reacciones sucesivas entre grupos hidroxilos del C_1 de la β

D (+) glucosa, con grupos hidroxilos del C_4 de otras unidades de β D (+) glucosa, dando origen a un polímero lineal formado exclusivamente por unidades de β D (+) Glucosa y eliminación de una molécula de agua por cada enlace formado (Carballo, L. R.; Arteaga, Y. (s/a).

Las cadenas de celulosa son largas y están ordenadas en un plano (figura 3).

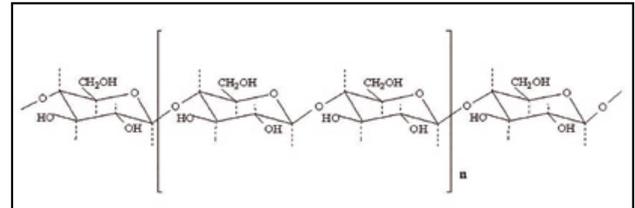


Figura 3. Estructura de la Celulosa (polímero 1,4-O- β -D-glucopiranosido). Fuente: Tomada de Carballo, L.R.; Arteaga, Y.

Los grupos funcionales de las moléculas de glucosa, interactúan unos con otros, especialmente los grupos hidroxilos (-OH) libres de los átomos de carbono 2,3 y 6. Estos grupos son responsables de la estructura supramolecular (figura 4) y del comportamiento físico y químico de la célula (Carballo, L. R.; Arteaga, Y. (s/a)).

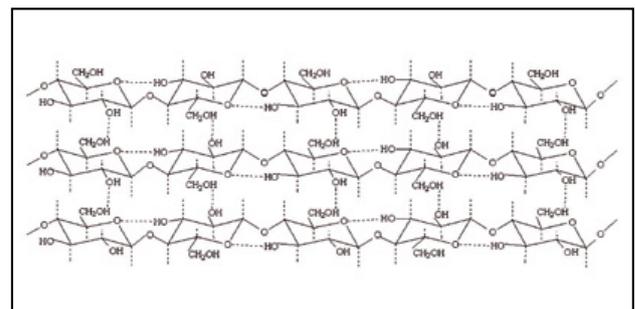


Figura 4. Estructura supramolecular de la celulosa. Fuente: Tomada de Carballo, L.R.; Arteaga, Y.

En la molécula de celulosa cada unidad de glucosa contiene tres grupos hidroxilos (-OH) libres en los átomos de carbono 2, 3 y 6 respectivamente. En ésta molécula existen dos grupos terminales que difieren entre sí, uno es reductor debido al enlace hemiacetal intramolecular (C_1) y el otro no es reductor (C_4).

Las unidades de glucosa se unen mediante enlace glucosídico β (1- 4). La posición β de los grupos hidroxilos en el C_1 necesita un giro de la unidad siguiente de glucosa alrededor del eje C_1-C_4 del anillo piranosico. Por tanto, la unidad que se repite en las cadenas de celulosa es la Celobiosa, disacárido, con longitud de 1,03 nm. (Carballo, L. R.; Arteaga, Y. (s/a). Sin embargo, es necesario explicar el largo y la forma planar de las moléculas de celulosa sobre la base de su estructura química. Según Carballo, L. R. y Arteaga, Y. (s/a) esto se debe a:

1. Tipo de enlace: el enlace glucosídico β (1-4) propicia que sea el grupo hidroxilo (-OH) del C_1 el que permanece alargando la cadena molecular, este tipo de enlace conduce a la formación de cadenas helicoidales.
2. Conformación del anillo piranosico: puede existir en varias conformaciones como, silla, bote torcido

etc., siendo la más estable la conformación silla y propiciándose la formación del enlace β - glucosídico y el alargamiento de la cadena.

3. Posición de los grupos hidroxilo en posición axial ó ecuatorial .En la conformación axial el grupo hidroxilo (-OH) se encuentra fuera del plano del anillo, mientras que en la posición ecuatorial se encuentra en el plano del anillo y por tanto es más estable y predominante. En esta conformación las unidades de glucosa se ordenan casi en el mismo plano, propiciando el alargamiento de la cadena.

Las interacciones por puentes de hidrógeno que se originan en la celulosa son de dos tipos y dependen de la posición del grupo hidroxilo (-OH) en las unidades de glucosa, por ello pueden presentarse enlaces de hidrógeno en la misma molécula originando enlaces por puentes de hidrógeno **intramoleculares**.

Existen interacciones por puentes de hidrógeno entre una cadena de celulosa y la cadena adyacente originando enlaces **intermoleculares**.

Los enlaces por puentes de hidrógeno intramoleculares son los responsables de cierta rigidez en las cadenas de celulosa, mientras que los enlaces por puentes de hidrógeno intermoleculares son responsables de la formación de la estructura supramolecular (la formación de fibra en el vegetal) (Carballo, L. R.; Arteaga, Y. (s/a).

Las cadenas lineales de glucosa, unidas por enlaces β (1-4) se combinan en una disposición muy ordenada (mediante puentes de hidrógeno intermoleculares) que le otorga propiedades cristalinas, formando fibrillas elementales que se reúnen en microfibrillas.

2. DESARROLLO

2.1. Materiales

- Fibras de henequén (*Agave fourcroydes* Lemaire), Clase D, provenientes de la Empresa Henequenera "Eladio Hernández" de Matanzas, Cuba.
- Disoluciones buffer
 - **buffer 10,3**: obtenido con 500 mL de disolución 0,05 mol/L de NaHCO_3 (bicarbonato de sodio) + 107 mL de disolución 0,1 mol/L de NaOH (hidróxido de sodio).
 - **buffer 11,5**: obtenido con 500 mL de disolución 0,05 mol/L de NaHPO_4 (fosfato monobásico de sodio) + 41 mL de disolución 0,1 mol/L de NaOH (hidróxido de sodio).
 - **buffer 12,1**: obtenido con 250 mL de disolución 0,2 mol/L de KCl + 60 mL de disolución 0,2 mol/L de NaOH (hidróxido de sodio).
 - **buffer 13,0**: obtenido con 1,3 g de CaO (óxido de calcio) en 250 mL de agua destilada.

2.2. Métodos

- **Microscopia electrónica**. Se utilizó un equipo para sombrear Sputter coater modelo SC 500 marca Bio Rad y un microscopio electrónico de barrido Hitachi 4100-FE. Las muestras de fibras de henequén se

fijaron con carbono coloidal (C). Se utilizó detector de electrones secundarios.

- **Determinación de carbohidratos con la reacción de alfa naftol en medio ácido**.
 - Este método es químico. Se basa en la determinación cualitativa de carbohidratos a través del ensayo de Molish (Zumalacárregui y Ramos, 1988). El mismo, fue propuesto por los autores de este trabajo como indicador de la degradación de las fibras vegetales.
 - **Determinación potenciométrica de pH**. Se realizaron en phmetro Pye Unicam.
 - **Determinación de la elongación de las fibras de henequén**. Se empleó un equipo MESDAN, con dispositivo medidor digital.
 - **Método estadístico**. Se obtuvieron los valores medios de la elongación. Las diferencias entre las medias se determinaron mediante análisis 4 x 5 ANOVA de medidas repetidas seguida de la prueba de Tukey para comparaciones múltiples, se consideraron significativas las diferencias cuando $p < 0,05$.

2.3. Diseño de experimento

Se hicieron cuatro (4) mazos de 20 gramos cada uno: m_1 , m_2 , m_3 , m_4 , de fibras de henequén, luego de desechar los extremos. Los mismos fueron llevados a peso constante, mediante el calentamiento a 50 °C en una estufa marca Memmert durante 24 horas.

Los mazos de fibras para cada tiempo de experimentación, se mantuvieron hasta su empleo en una desecadora, con ácido sulfúrico concentrado.

Todos los mazos de fibras fueron sumergidos en las disoluciones de pH experimentales y se extrajeron muestras de fibras ($n=10$) a los tiempos de 28, 45, 90 y 180 días. Finalizado cada período de tiempo fueron extraídas 10 fibras, al azar, las cuales fueron secadas a temperatura ambiente, sobre papel de filtro, durante 24 horas y después se determinó su elongación.

Con el objetivo de determinar las variaciones de pH, se tomaron alícuotas de 10 mL de cada disolución que contenía cada mazo de fibras y se le determinó el pH al final de cada tiempo de experimentación.

3. ANÁLISIS Y DISUSIÓN DE RESULTADOS

La determinación de la composición química de las fibras de henequén fue hecha por Martín *et al*, 2006, y se muestra a continuación, donde se comprobó un alto contenido de celulosa, aproximadamente el 60 % en la fibra seca (tabla1).

Tabla 1. Composición química de la fibra de henequén

Componentes	%
Celulosa	57,92
Hemicelulosa	30,50
Lignina	6,47

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados revelan que las fibras de henequén tienen un alto contenido de celulosa y hemicelulosas (88,42

%), lo cual lo hace un material rico en carbohidratos y las propiedades que presenten las mismas dependen de esto.

3.1. Microscopía electrónica de fibras de henequén

En la imagen de la fibra de henequén (*Agave fourcroydes* Lemaire), tomada en el microscopio electrónico (figura 5), se observaron tráqueas o vasos del xilema que son elementos conductores de agua y minerales, sus paredes celulares presentan celulosa y como modificación secundaria, impregnaciones de lignina de forma anillada.

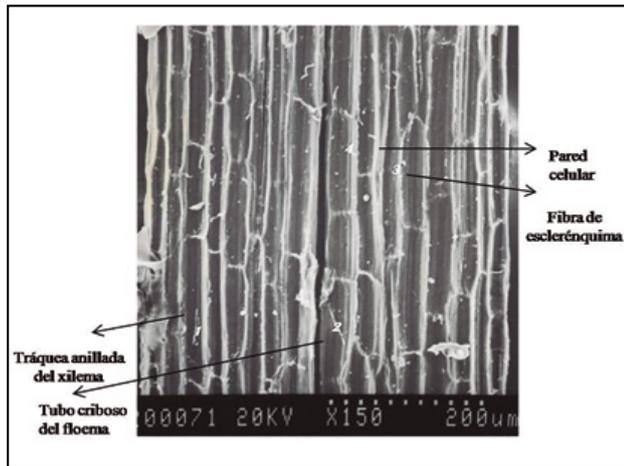


Figura 5. Sección longitudinal de fibra de henequén por MEB con detector de electrones secundarios 1000 x. Fuente: elaboración propia.

En la figura también se observaron tubos cribosos, con su peculiar placa cribosa, y fibras de esclerénquima, tejido de sostén, conformado de células fusiformes, con abundante lignina y celulosa.

3.2. Determinación de carbohidratos con la reacción de alfa naftol en medio ácido.

Se diseñó un experimento para comprobar la degradación de las fibras de henequén a través de la presencia de carbohidratos o azúcares en disolución acuosa. Los resultados se muestran a continuación (tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la determinación de carbohidratos

Muestra	pH	Carbohidratos			
		28 días	45 días	90 días	180 días
m ₁	10,3	+	+	+++	+++
m ₂	11,5	++	++	+++	+++
m ₃	12,1	++	++	+++	+++
m ₄	13,0	++	++	++	++

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que en el rango de pH (determinados por el método potenciométrico) estudiado, ocurre la degradación de la fibra desde los 28 días. Este proceso se va incrementando en la medida que aumenta el tiempo.

En este caso se han producido la hidrólisis de los enlaces glucosídicos de la celulosa. La disolución de la celulosa consiste en la ruptura de la estructura fibrilar lo que resulta

una desintegración de las fibras y microfibrillas originando las cadenas de celulosa sin cambiar la longitud de la cadena. Según Xiao, B., Sun X. F. y Sun, R.C.; 2001 el tratamiento alcalino a los materiales lignocelulósicos destruye la pared celular y provoca el hinchamiento de la celulosa.

El comportamiento químico de la celulosa se produce mediante reacciones complejas, que ocurren por la presencia en su estructura de los grupos hidroxilos (-OH).

Según, Carballo, L. R.; Arteaga, Y. (s/a), la degradación de la celulosa incluye no solo la ruptura de la estructura supramolecular, sino que las interacciones por puentes de hidrógeno no sólo se presentan entre los grupos hidroxilo (-OH) de las unidades de glucosa en las moléculas de celulosa; sino también la celulosa puede formar este tipo de enlace con al agua, lo que explica el hinchamiento de los materiales lignocelulósicos.

También, Mac Vicar, L.M. Matuana, y J.J Balatinez; 1999, afirman que la lignina y las hemicelulosas que existen en la lámina media de las fibras vegetales son más susceptibles al ataque de los álcalis y a la degradación que la celulosa, cuando las fibras vegetales están reforzando el cemento.

En este experimento, se utiliza una disolución básica, de pH 13, simulando el pH del agua de poro producido con el cemento Portland. En el proceso de degradación de la fibra se rompen los enlaces entre la lignina y los azúcares a los cuales está enlazada, por ejemplo como se muestra en la figura 6, donde una fracción de la molécula de lignina está unida a la cadena de xilano de una hemicelulosa a través de un enlace éster.

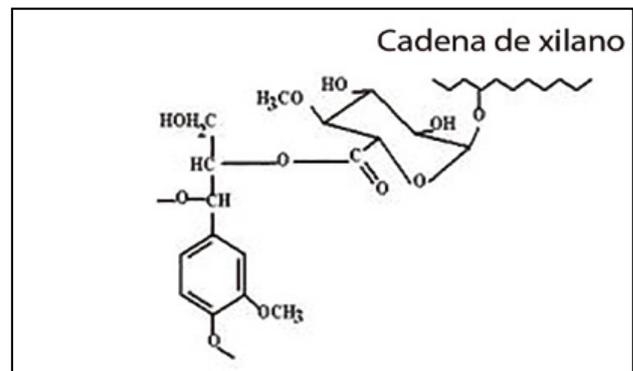


Figura 6. Lignina unida a carbohidrato por enlace éster. Fuente: elaboración propia.

Como se pudo observar en la Tabla 1, las fibras vegetales de henequén tienen un alto contenido de hemicelulosas (30,52 %), las cuales con la pectina forman parte de la lámina media que separa dos células vegetales contiguas y son responsables de la cohesión entre las células adyacentes.

El principal constituyente de las hemicelulosas es el xilano, polisacárido constituido por una cadena lineal de residuos de xilosa y diversas ramificaciones y sustituciones.

Las unidades de D-xilosa en forma piranósica, se unen entre si mediante enlaces β por las posiciones 1-4. La diferencia entre las hemicelulosas radica en la proporción, ubicación y tipo de enlace de los otros azúcares presentes, tales como la L-arabinosa, D-manosa, D-glucosa, D-galactosa, L-arabinosa, y en menor extensión L-ramnosa, L-fucosa, derivados de monosacáridos como el ácido D-glucorónico, 4-O-metil ácido D-glucorónico (MeGlcA), ácido D-galacturónico y otros azúcares O-metilados. (Saavedra y Cordero; 1986).

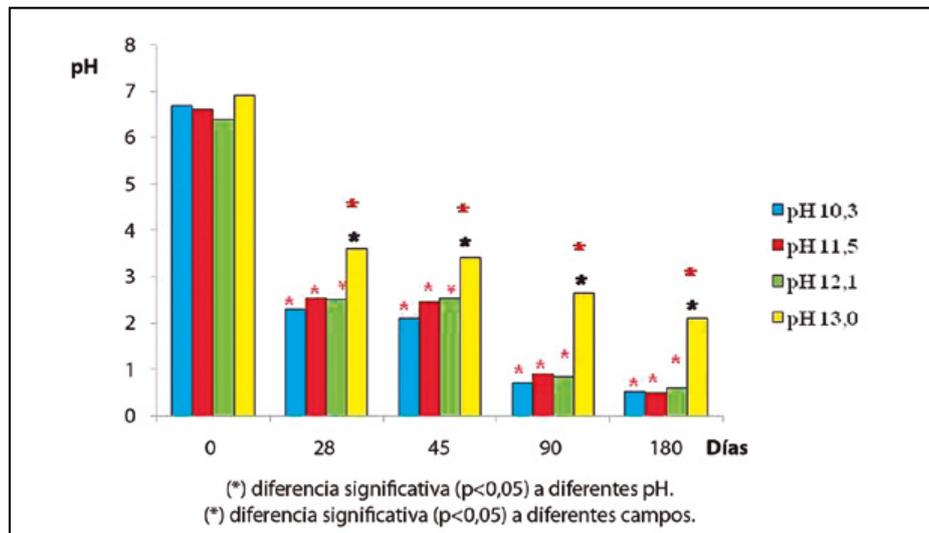


Figura 7. Porcentaje de elongación de las fibras de henequén en el tiempo, a diferentes pH.

Todos estos carbohidratos más sencillos que la celulosa y que las hemicelulosas son producto de la hidrólisis básica de los enlaces glucosídicos y se solubilizan en el medio acuoso básico, por eso pueden ser determinados por el método de alfa naftol, lo cual es indicativo de la degradación de las fibras de henequén.

Wang et al. (2012) mencionan que la mayoría de los enlaces entre la lignina, la hemicelulosa y celulosa son de tipo éster o éter, susceptibles a ser hidrolizados por el tratamiento alcalino. La acción química de los agentes alcalinos sobre la fracción fibrosa es la de saponificar los ésteres de ácidos urónicos asociados con las cadenas de xilanos; por consiguiente, se rompen enlaces químicos que ligan a los carbohidratos de la pared celular.

El cambio más sobresaliente en la composición química de los residuos fibrosos al tratarse con álcali, es la solubilización de la hemicelulosa, manteniéndose relativamente constante el contenido de celulosa y lignina (Lázaro Que, 2012).

3.3. Determinación de la elongación de las fibras de henequén

Hasta aquí se ha considerado, la celulosa como un polímero natural, constituyente de las fibras vegetales, por lo tanto se analizará la propiedad mecánica que está relacionada con su resistencia, que indica cuánta tensión se necesita para romperla pero no da información de lo que ocurre con la muestra mientras se trata de romper. Ahí es donde corresponde estudiar el comportamiento de elongación de la muestra polimérica. La elongación es un tipo de deformación. Ésta es simplemente el cambio en la forma que experimenta un material bajo tensión. Cuando la muestra se somete a tensión, se deforma por estiramiento, volviéndose más larga, esto es elongación.

El porcentaje de elongación, que es el largo de la muestra después del estiramiento (L), dividido por el largo original (L_0), y multiplicado por 100.

En este trabajo se consideró la medición de la elongación final de la fibra de henequén. La elongación final es crucial para todo tipo de material. Representa cuánto puede ser estirada una muestra antes de que se rompa (Universidad del Sur de Mississippi, 1998).

En la figura 7 se muestran los valores de elongación de las fibras de henequén sumergidas en disoluciones básicas de diferentes valores de pH y diferentes tiempos o edades.

En los estudios de laboratorio se pudo comprobar que la elongación de las fibras también se afecta con el tiempo, es menor a los 180 días para todas las muestras. El análisis estadístico de los resultados mostró que las fibras presentaron una disminución significativa ($p < 0,05$) de la elongación en el tiempo, cuando fueron sumergidas en las disoluciones básicas de los pH estudiados. Se pudo observar que el valor de elongación de las fibras disminuyó en todas las muestras respecto a las fibras no tratadas. Este hecho está relacionado con la naturaleza química de las sustancias componentes de las disoluciones buffer utilizadas en el experimento.

No se observaron diferencias significativas en la elongación de las fibras sumergidas en las disoluciones de pH 10,3; 11,5; y 12,1 a los diferentes tiempos de experimentación. Sin embargo, la elongación fue significativamente ($p < 0,05$) mayor a pH 13 para todos los tiempos. Este hecho, pudo estar relacionado con la presencia de hidróxido de sodio (NaOH) en la composición química de las disoluciones buffer de pH 10,3; 11,5; y 12,1. Este hidróxido es un electrolito fuerte y soluble, que se disocia totalmente en disolución acuosa en iones Na^+ y $-\text{OH}$ cuya solubilidad es de 111, g/100 mL de agua a 20°C , el cual es corrosivo y daña los tejidos vivos y los compuestos orgánicos.

El hidróxido de sodio diluido produce hinchamiento, permitiendo un incremento en el área de superficie interna reduciendo el grado de polimerización y cristalinidad de la celulosa, causando la separación de las unidades estructurales entre la lignina y los carbohidratos (Fan *et al.*, 1987).

Por otra parte en la disolución de pH 13,4 el CaO se hidrata rápidamente y se forma el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, el cual es un electrolito fuerte e insoluble, y en el medio acuoso existe un equilibrio químico entre el sólido no disuelto ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y los iones en disolución Ca^{2+} y 2OH^- y cuya solubilidad es de 0,185 g/mL, lo cual tiene efecto sobre la fibra; la mineraliza. Los cristales de hidróxido de calcio, ($-\text{OH}$) se depositan sobre la pared celular, la cual se endurece y las fibras pierden elasticidad y se vuelven frágiles.

Glaus, *et al.* (1999), estudiaron la degradación de materiales celulósicos (celulosa pura, algodón, tejidos) en un

reservorio de cemento de residuales radioactivos bajo condiciones alcalinas e identificaron los compuestos químicos formados utilizando técnicas de Espectrometría de Masas y Resonancia Magnética Nuclear (RMN) y demostraron que el principal producto de la degradación de la celulosa por el agua alcalina de los poros del cemento a pH 13,3 y temperatura ambiente es el ácido isosacarínico (ISA) en dos formas diastereoisómeras (figura 8).

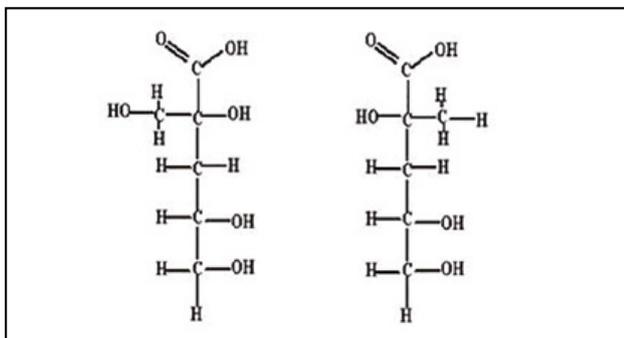


Figura 8. Estructura del ácido isosacarínico (ISA). Fuente: elaboración propia.

Esto explica la degradación de las fibras vegetales, al obtener moléculas sencillas como glucosa y la oxidación del grupo formilo (COH) en el grupo carboxilo (COOH).

4. CONCLUSIONES

El medio alcalino influye directamente en la estructura química de las fibras vegetales por la ruptura de enlaces químicos. En la celulosa, se rompen los enlaces glucosídicos, lo que influye en el grado de polimerización y la ruptura de los enlaces por puente de hidrógeno intermoleculares disminuyendo su cristalinidad además, en la lignina se hidrolizan los enlaces de tipo éster y éter entre ésta y los carbohidratos, lo que se evidenció con la presencia de carbohidratos sencillos con el ensayo de Molish y con la reducción de la elongación de las fibras respecto a la fibra patrón.

La naturaleza química del hidróxido utilizado en la preparación del medio alcalino influyó en las propiedades de las fibras. Con el hidróxido de sodio, la hidrólisis de los enlaces químicos de los componentes de las fibras vegetales es mayor, de ahí que produzca mayor degradación de la misma, lo que se pone de manifiesto en la mayor cantidad de carbohidratos en el medio acuoso y menores valores de elongación, respecto a los de las fibra sumergidas en $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

5. BIBLIOGRAFÍA

Bojórquez Báez, I. (2005). *Desarrollo de un nuevo material a base de fibras orgánicas del sudeste mexicano en matriz de cemento Portland para producir paneles ligeros*. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Ciudad de La Habana (Cuba).

Carballo, L., y Arteaga Y. (s/a). Monografía de *Celulosa de Madera*. Departamento de Química, Facultad de Forestal y Agronomía, Universidad de Pinar del Río (Cuba). Disponible en <http://www.monografias.com/trabajos46/celulosa-madera/celulosa-madera.shtml> (Accedido: 18 de diciembre 2014).

Fan, L. T., Gharpuray, M. M., y Lee, Y. H. (1987). *Cellulose Hydrolysis* (Biotechnology Monographs). Vol. 3. New York (EE UU): Springer Berlin Heidelberg, 57.

Glaus, M. A., van Loon, L. R., Achatz, S., Chodura, A., y Fischer, K. (1999). Degradation of cellulosic materials under the alkaline conditions of a cementitious repository for low and intermediate level radioactive waste. Part I: Identification of degradation products. *Analytical Chimica Acta*, 398 (1), 111-122. DOI: 10.1016/S0003-2670(99)00371-2

Jennings, H. M. (1991). Advanced cement-based matrices for composites. *Workshop High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*. En Reinhardt, H. W., y Naaman, A. E. (Eds.), Mainz (Alemania), 23-26 junio, 1991. Organizado por RILEM (The International Union of Testing and research laboratories for Materials and Structures) y ACI (American Concrete Institute), Stuttgart University y University of Michigan. Chapman and Hall/Spon.

Lázaro, C. (2012). *Efecto del hidróxido de calcio en el mejoramiento del valor nutritivo de alimentos a base de residuos de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar*. Tesis en opción al grado de Maestro en Ciencias. Institución de enseñanza e investigación en Ciencias Agrícolas, Tabasco, México.

MacVicar, R., Matuana, L. M., y Balatinecz, J. J. (1999). Aging mechanisms in cellulose reinforced cement composites. *Cement & Concrete Composites*, 21(3), 189-196.

Martín, C., Carrillo, E., Torres, M., García L., Marcet, M., y Thomsen A. B. (2006). Determination of the chemical composition of tropical cellulosic materials by the detergent sequential system combined with acid hydrolysis. *Cellulose Chemistry and Technology*, 40 (6), 399-403.

Primo, E. (1995). *Química orgánica básica y aplicada*. Tomo II. Universidad Politécnica de Valencia. Barcelona: Editorial Reverté, S.A., 1258.

Saavedra, F., y Cordero, D. (1986). Las hemicelulosas del bagazo y la caña de azúcar. Estudio bibliográfico. *ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar*. Ciudad de La Habana (Cuba), 20 (1), 30-35.

Savastano Júnior, H. (2000). *Materiais a base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo*. Tesis presentada en el Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica de Universidade de São Paulo (Brasil).

Universidad del Sur de Mississippi. (1998). *Mechanical properties of polymers*. Departamento de Ciencia de Polímeros. Disponible en <http://www.usm.edu/index.html>. (Accedido: 10 de noviembre 2014).

Valenciaga, D., y Chongo, B. (2004). La pared celular. Influencia de su naturaleza en la degradación microbiana ruminal de los forrajes. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 38 (4), 343-350.

Wang, Z., Ruyu, L., Xu, J., Marita, J. M., Hatfield, R. D., Qu, R., y Cheng, J. J. (2012). Sodium hydroxide pretreatment of genetically modified switchgrass for improved enzymatic release of sugars. *Bioresource Technology*, 110, 364-370. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.01.097

Williams, K. (2003). *The physiological and morphological effects of grazing on grasses*. Disponible en <http://www.grc.uri.edu/programs/2003.hlm/> (Accedido: 28 de enero 2014).

Xiao, B., Sun, X. F., y Sun, R. C. (2001). Chemical, structural, and thermal characterizations of alkali-soluble lignins and hemicelluloses, and cellulose from maize stems, rye straw, and rice straw. *Polymer Degradation and Stability*, 74 (2), 307-319.

Zumalacárregui, B., y Ramos, T. (1988). *Prácticas de Química Orgánica*. Ciudad de La Habana (Cuba): Editorial ISPJAE, 179.