



Pasta blanqueada y azúcares fermentables a partir de médula de bagazo de caña

Bleached pulp and fermentable sugars from sugarcane pith bagasse

J. Jesús Vargas-Radillo^{1*}, Edgar Salazar-Ríos¹, Lucia Barrientos-Ramírez¹, Armando Pérez-Centeno², Maite Rentería-Urquiza³, Antonio Rodríguez-Rivas¹, Fernando Navarro-Arzate¹ y José Rutiaga-Quiñones⁴

¹Departamento de Madera, Celulosa y Papel. CUCEI. Universidad de Guadalajara. Jalisco, México.

*Autor de correspondencia: jvargasr@dmcyp.cucei.udg.mx

²Departamento de Física, CUCEI. Universidad de Guadalajara. Jalisco, México.

³Departamento de Química, CUCEI-Universidad de Guadalajara. Jalisco, México.

⁴Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México.

RESUMEN

La médula del bagazo de caña es un residuo subaprovechado que se produce en gran cantidad en los ingenios azucareros y en las fábricas de papel. Es una mezcla de células de parénquima, vasos y pequeñas fibras. Su contenido de carbohidratos y lignina es similar a la fracción fibra. Con el propósito de aprovechar este considerable contenido de carbohidratos, se aplicaron a la médula dos procesos distintos: Pulpeo-blanqueo, hidrólisis enzimática. El primer caso se aplicó prehidrólisis, pulpeo químico, blanqueo y refinación, obteniendo pulpa de médula blanqueada con 68% ISO de blancura y 0,38% de lignina residual. El mayor incremento en resistencia (77,6% de aumento en índice de tensión, IT) fue con la incorporación de 30% de pulpa de médula blanqueada sin refinrar, mientras que con 10% de pulpa de médula blanqueada refinada, el IT se incrementó en 43,8%. En el segundo caso, se trató enzimáticamente la médula. Con 6 h de hidrólisis se obtuvo 86,6% de rendimiento en azúcares fermentables tanto para pulpa de médula cocida como para pulpa de médula blanqueada, lo que representa cerca del 100% de hidrólisis de los carbohidratos presentes en el sustrato, lo cual es significativo ya que el rendimiento en azúcares fermentables de médula sin tratar fue de solo 26,1%.

Palabras clave: blanqueo, material de compuesto, morfología, parénquima, sosa-AQ.

ABSTRACT

Pith bagasse is a sub-exploited residue produced in large quantities in sugar mills and paper mills. It is a mixture of parenchyma cells, vessels and small-size cellulose fibers. The content of carbohydrates and lignin in pith is similar to the fiber fraction. In order to take advantage of this significant carbohydrate content, two distinct processes were applied to the pith material: Pulping-bleaching, and enzymatic hydrolysis. In the first case the pith was treated with pre-hydrolysis, soda pulping, bleaching and beating process, obtaining bleached pith-pulp with 68% ISO brightness and 0,38% of residual lignin. The largest increase in strength (77,6% increase in tensile index, IT) happened when 30% of this unbeaten pulp was added to paperboard, while with 10% of refined bleached pulp, IT increased in 43,8%. In the second, the pith was enzymatically hydrolyzed. In 6 h of hydrolysis a yield of 86,6% of fermentable sugars was obtained in both, cooked pith-pulp and bleached pith-pulp, close to 100% hydrolysis of carbohydrates present in the substrate, which is significant because the yield of fermentable sugars from untreated pith was only 26,1%.

KEY WORDS: bleaching, composite, morphology, parenchyma, soda-AQ.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*) es una gramínea perenne, originaria de Asia, adaptada a la mayoría

de climas tropicales y subtropicales (Freitas Andrade y Colodette, 2014), con gran rendimiento agrícola de 60 t ha⁻¹-100 t ha⁻¹ (FAO. 2008). En México el rendimiento

fue de 78,7 t ha⁻¹ en el ciclo 2012/13, la más alta hasta entonces (DOF, 2014). De la periferia al centro se observa epidermis, corteza o cáscara, haces fibrovasculares y médula o tejido fundamental (Triana *et al.*, 1990). La corteza tiene fibras lignocelulósicas en forma de haces fibrovasculares estrechamente empaquetados (Isaac *et al.*, 2013), rígidas, muy lignificadas, alargadas y de pared gruesa, formando tejido esclerenquimatoso, adecuadas para la industria papelera (Triana *et al.*, 1990).

La médula (colénquima, clorénquima, anular y parénquima) son células de almacenamiento para solutos y alimento para la planta (Hegbom, 1992), de forma irregular y anisotrópica paredes finas y muy porosas (Triana *et al.*, 1990), de estructura frágil y fracturada (Chimenez *et al.*, 2014). Predomina en el interior del tallo junto con haces fibrovasculares inmersos distribuidos espaciadamente, siendo estos haces más numerosos en la periferia, donde forman un anillo sólido, con pequeñas fibras celulósicas finas, de paredes delgadas (Triana *et al.*, 1990; Rasul *et al.*, 1999), de menores dimensiones biométricas que la fibras de la corteza.

La caña de azúcar es prensada para extraer la sacarosa en los ingenios azucareros. Esto produce una gran cantidad de residuo, consistente en una mezcla de fibras, vasos y médula denominado bagazo integral (Boopathy, 2004). El bagazo de caña de azúcar promedio contiene 35% médula y el resto es la fracción fibrosa, preferida para la producción de papel (Rainey *et al.*, 2012). Ha sido usado como combustible en las calderas del ingenio para generar electricidad, como materia prima para la industria de celulosa y papel y como reforzante de compuestos poliméricos (Cao *et al.*, 2006). Además se ha utilizado bagazo para productos de alto valor agregado (químicos y metabolitos) (Pandey *et al.*, 2000), nanocristales o nanofibras (Teixeira *et al.*, 2011; Gilfillan *et al.*, 2014), y etanol celulósico (Emsley, 2008).

Tanto en los ingenios como en las fábricas de papel la médula constituye un residuo orgánico no aprovechado y plantea un serio problema de eliminación de residuos. El desmedulado mejora el bagazo para la producción de pulpas, aumenta el rendimiento y mejora la blancura y las

propiedades de resistencia del papel (Aguilar-Rivera, 2011). Una fábrica de papel que procesa 300 t d⁻¹ de bagazo genera 160 t d⁻¹ de médula (Jain *et al.*, 2011). En los ingenios azucareros la mayoría de la médula se quema en la caldera, junto con el resto del bagazo. Tiene baja eficiencia energética, ya que su poder calorífico es de 71,4 kJ kg⁻¹ (17,07 kcal kg⁻¹) (Díez *et al.*, 2010). La eliminación de médula es benéfica para el almacenamiento del bagazo en fábrica puesto que reduce en 50% la contaminación por polvo libre, la humedad, contaminación por lixiviados, y la combustión espontánea (Rainey *et al.*, 2013).

Casi todas las referencias consultadas sobre el aprovechamiento de la médula se refieren a la obtención de azúcares fermentables y etanol (García-Kirchner y Huítron, 1996; Hernández-Salas *et al.*, 2009; Dasgupta *et al.*, 2013). Se encontró una menor cantidad de menciones sobre el uso de la médula en el refuerzo de pulpa y polímeros (Rutiaga *et al.*, 2002a; Lee y Mariatti, 2008). En México la caña de azúcar se utiliza casi exclusivamente para la producción de azúcar (refinada, morena, piloncillo) con 6,92 millones de toneladas en el ciclo 2012/13 así como 16,7 millones de litros de alcohol en 5 ingenios (DOF, 2014), obteniéndose además melaza (40 kg t⁻¹) y bagazo de caña como subproductos, así como otros aprovechamientos de menor importancia como compostas agrícolas, vinazas, ceras, fibra absorbente, etc. (Coveca, 2008).

La médula generada en México (35% de los 12,5 millones de toneladas de bagazo) (Flores *et al.*, 2008), podría convertirse en un fuente de biomasa importante considerando que tiene una composición química similar a la fracción de fibra, con 68%-69% holocelulosa (20%-21% hemicelulosa y 48%-49% de alfa celulosa) y 21%-22% de lignina (Sanjuán *et al.*, 2001). Por otro lado, los fabricantes de papel y cartón utilizan de forma frecuente fibra reciclada OCC (Old Corrugated Containers), como fuente de fibra barata (Rivera *et al.*, 2008). El reciclar papel y cartón reduce la contaminación del agua en 3% y la ambiental en 74% (Misman *et al.*, 2008), pero este proceso degrada el papel por lo que es necesario añadir celulosa “virgen” para compensar la degradación del papel



(De la Madrid, 2009). En este contexto, la médula del bagazo de caña podría utilizarse para reforzar matrices celulósicas poliméricas.

OBJETIVOS

Debido a su disponibilidad, origen biológico, composición química, morfológica y sub-aprovechamiento, el objetivo de este trabajo fue evaluar la transformación de la médula de bagazo de caña en dos productos de mayor valor agregado: 1) pulpa de médula blanqueada para reforzar cartón OCC reciclado y 2) azúcares fermentables utilizando pretratamiento químico e hidrólisis con enzimas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El bagazo de caña utilizado fue recolectado de la zafra 2012/2013 del Ingenio azucarero José Ma. Martínez de Tala, Jalisco. El bagazo se secó al medio ambiente, a temperatura promedio de 23 °C, el tiempo necesario para obtener una humedad final de aproximadamente 10%. Posteriormente se separaron la fracción fibra y la fracción médula por frotamiento manual en seco utilizando una malla con poros de 0,8 mm de diámetro. La fracción médula se trató secuencialmente por medio de prehidrólisis ácida, pulpeo sosa-antraquinona, blanqueo parcialmente libre de cloro elemental (ECF) y refinación. También se utilizó cartón OCC reciclado, con 62,4 de número de kappa y 57 °SR (165 CSF) de grado de refinación. Se hizo una clasificación de fibras del cartón por el método Bauer McNett (Tappi T 233).

Prehidrólisis

Se aplicó una prehidrólisis ácida con 0,1% de H_2SO_4 , relativo a la médula base seca, en suspensión acuosa al 10% de consistencia, 150 °C y 30 minutos, utilizando un reactor eléctrico giratorio. Se evaluó el rendimiento y número de kappa (T 236 cm – 85), según condiciones publicadas previamente (Kordsachia *et al.*, 2004; Freitas y Colodette, 2014), ajustadas a la médula de bagazo de caña.

Pulpeo

Se utilizó el proceso químico sosa-antraquinona (Sosa-AQ). Se realizó primero una etapa exploratoria con las variables sosa (%), tiempo de reacción (minutos) y temperatura (°C), a 10% de consistencia y 0,1% de AQ respecto al material en base seca, y se evaluó el rendimiento y número de kappa. Como resultado de este estudio previo, la médula fue tratada aplicando las condiciones para obtener pasta grado blanqueable (número de kappa alrededor de 20), es decir con 15% de sosa (como Na_2O), 141 °C, 55 minutos y 0,1% AQ, en un reactor eléctrico giratorio. Se evaluó número de kappa, rendimiento y viscosidad CED (T 230 om–89).

Blanqueo ECF

Se aplicó la secuencia dióxido de cloro-extracción alcalina-dióxido de cloro-extracción-dióxido de cloro, $D_0ED_1ED_2$, utilizando condiciones publicadas previamente (Rutiaga *et al.*, 2002b; Freitas y Colodette, 2014), ajustadas a la médula y evaluadas previo a cada etapa. Se utilizó como agente principal de blanqueo el dióxido de cloro ya que mejora la limpieza de la pulpa mientras preserva su viscosidad (Kordsachia *et al.*, 2004). Las condiciones de blanqueo fueron D_0 : 0,24 de factor, 3,9% ClO_2 , 60 min; D_1 : 0,16 de factor, 1,2% ClO_2 , 60 minutos; D_2 : 0,1 de factor, 0,18% ClO_2 , 120 minutos. En todas las etapas se aplicó una temperatura de 70 °C y 10% de consistencia. Se evaluó el rendimiento y número de kappa en cada etapa, así como la viscosidad al final del blanqueo.

Refinación, formación de hojas y pruebas fisicomecánicas

La pulpa de médula blanqueada fue refinada en el equipo de laboratorio Jokro (ISO, 1979). Este molino centrífugo tiene el mismo principio que los otros refinadores: tratamiento mecánico por rotor-estator. Consiste en una tina giratoria con seis cavidades en donde se colocan cilindros de paredes ranuradas (estator) que tienen un elemento cilíndrico libre ranurado (rotor) que muele o refina la pulpa. Trabaja con muestras pequeñas de 16 gramos a 6% consistencia y 150 min⁻¹ (revoluciones por minuto).

Los efectos de la refinación (aplastamiento, cepillado, corte, hidratación, fibrilación interna y externa) son determinantes para el entrelazamiento y consolidación del papel (Escoto, 2009). La refinación se hizo a diferentes tiempos: 5 y 10 minutos de forma progresiva, y 30 minutos, tiempo en el que visualmente se apreció que la muestra estaba molida o pulverizada, formada por microelementos.

A continuación se hicieron hojas de cartón OCC, solo y combinado con 10% y 30% de pulpa de médula blanqueada sin refinar y refinada. Las mezclas se trajeron en un desintegrador por 10 min a 3000 min^{-1} , y luego se mantuvieron 30 minutos en agitación en un homogeneizador a 1,57% de concentración. Se hicieron hojas de 60 g m^{-2} en un formador Tappi (T 205 om-88), midiendo su grado de refinación por medio de pruebas de drenado, la cual se usa para medir la intensidad de la refinación. Se expresa tanto en la escala Schopper Riegler, °SR (ISO, 1999) de 0-100, como en la escala Canadian Estándar Freeness (T-227) de 700-0. Por último, las hojas secas fueron acondicionadas para realizar las pruebas de resistencia y ópticas (T 402 om-93).

Microscopía

Se tomaron imágenes con microscopio óptico y microscopio electrónico.

Microscopio óptico

Muestras de pulpa de médula blanqueada y pulpa de médula blanqueada refinada se tiñeron con safranina para ser dispersadas sobre un portaobjeto y fijadas con polietilenenglicol (Franklin, 1937; Ruzin, 1999). A continuación se tomaron imágenes con un microscopio compuesto marca Wild. Se evaluaron las características biométricas de los elementos anatómicos usando una escala certificada montada en el ocular del microscopio.

Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FE-SEM)

Con el propósito de tomar micrografías de pulpa de médula y hojas formadas, la pulpa se secó utilizando un liofilizador marca *Freeze Dryer* 10N mientras que las

hojas se secaron en horno a 105 °C durante 30 minutos. Las muestras fueron posteriormente montadas sobre una película de carbón conductora de doble cara y metalizadas con una capa de oro de 4 nm con un sistema de erosión catódica marca Spi. Las muestras fueron observadas utilizando un microscopio de barrido de emisión de campo marca Tescan modelo Mira3, con un detector a 20 kV para captura de imágenes. Todas las imágenes fueron adquiridas en la modalidad de electrones secundarios.

Azúcares fermentables

Se obtuvieron azúcares fermentables a partir de médula del bagazo prehidrolizado, cocido y blanqueado, en cada caso, ya que estos procesos funcionan como pretratamiento o método de acondicionamiento de la médula, previo a la hidrólisis enzimática. Se empleó una mezcla enzimática comercial (Sigma-Aldrich) de celulasas (Celluclast 1,5 L), glucosidasas (Novozyme 188) y β -xilananas. Los tratamientos fueron hechos en un incubador marca Lab-tech con una carga de 11 FPU g^{-1} de celulasas, 20 CBU mL^{-1} de celobiasas y 2,5 % de xilananas, a 2% (w/w), 50 °C, 140 min⁻¹ y pH de 4,8. Se añadieron 100 ppm de cloranfenicol y 100 ppm de hidrocloruro de tetraciclina, antibióticos que previenen la contaminación microbiana. Se utilizaron frascos cerrados con tapón de hule. De esta forma, a cada frasco se añadió 1 g de la muestra, 50 mL de buffer (ácido cítrico/citrato de sodio), 270 μL de Celluclast, 50 μL de Novozyme, 25 mg de xilanasa y los antibióticos. Se tomaron muestras a 1 h, 6 h y 24 h de hidrólisis. Al final de la hidrólisis, las muestras fueron enfriadas en baño de hielo, para detener la reacción, filtradas, y ensayadas para azúcares fermentables por el método del ácido 3,5 dinitrosalicílico, DNS (Miller, 1959), usando un espectrofotómetro UV-Vis, a 540 nm de longitud de onda. Para calcular la concentración de los azúcares fermentables se construyó una curva con 10 puntos de concentración de glucosa en el intervalo de $0,2\text{ mg mL}^{-1}$ a $2,0\text{ mg mL}^{-1}$ (Ghose, 1987).

Muestreo Estadístico

Los tratamientos cocimiento/blanqueo y azúcares fermentables se hicieron por duplicado, mientras que en el caso



de las pruebas de resistencia físico-mecánica se realizaron 8 repeticiones. Se calculó el promedio (\bar{x}) y desviación estándar (s) para cada prueba, utilizando estadística descriptiva convencional.

RESULTADOS

Pre-hidrólisis, pulpeo y blanqueo

En relación con los tratamientos de acondicionamiento y deslignificación (pulpeo) de la médula, en el caso de la prehidrólisis ácida se obtuvo un rendimiento de 70,3% ($s=1,28\%$), con número de kappa de 134 ($s=3,1$), mientras que en el pulpeo se obtuvo pasta con número de kappa promedio de 18 ($s=1,67$), rendimiento de 45,9% ($s=0,12\%$), y viscosidad de 16,02 ($s=2,46$) cp. El material fue a continuación blanqueado (Tabla 1). Se obtuvo una blancura final de 68% ISO (T 218 om-91) y viscosidad de 12,50 ($s=0,97$), grado de polimerización de 536,3.

Tabla 1. Resultados del blanqueo de médula de bagazo de caña.

Etapa	Rendimiento (%)	No. Kappa
D ₀	100	16,5
E	96,0	--
D ₁	81,3	7,2
E	92,8	--
D ₂	75,6	0,9

D₀= Etapa inicial de Dióxido de cloro inicial, D₁= Primera etapa de dióxido de cloro, D₂= Segunda etapa de dióxido de cloro, E= Extracción alcalina
Blancura final de 68% ISO; viscosidad de 12,50; grado de polimerización de 536,3.

Morfología de la médula blanqueada y efecto de la refinación

En la figura 1 se presentan imágenes de la pulpa de médula blanqueada y pulpa de médula blanqueada refinada, con el propósito de apreciar visualmente el efecto de la refinación.

Los elementos predominantes son el parénquima y vasos (Fig. 1A), aunque también se aprecian fibras peque-

ñas de pared delgada. Las fibras tienen 0,189 mm de longitud (L), ancho (D) de 3,19 μm y 0,89 μm de espesor de pared (d). Estas fibras procedentes de los haces fibro-vasculares del parénquima central de la caña son significativamente de menores dimensiones que las fibras de la cáscara o corteza, las cuales tienen L= 1,13 mm, D= 20 μm y d= 12 μm (Sanjuán *et al.*, 2001). En relación con el resto de elementos, Agnihotri *et al.* (2010) hallaron que el parénquima del bagazo tiene una longitud de 0,327 mm, con ancho de 0,053 μm , vasos con L entre 1,2 mm a 1,6 mm.

Hojas de cartón con pulpa de medula blanqueada y pruebas físico-mecánicas

En la figura 2 se presentan imágenes adquiridas en el microscopio electrónico de las hojas de cartón reciclado y de las hojas de cartón reciclado reforzado con pulpa de médula blanqueada refinada: Las figuras 2a y 2c son imágenes de una hoja de cartón OCC, las figuras 2b y 2d son imágenes de hojas de cartón reforzadas con pulpa de médula blanqueada refinada.

Un mayor aumento (2000x) permite observar con mayor detalle la interacción entre el cartón y la médula, como en la figura 3, en la que se muestra la imagen de cartón OCC cargado con médula blanqueada sin refinar.

En la tabla 2 se presentan las propiedades de drenado y resistencia de las hojas de cartón y cartón mezclado con pulpa de médula.

Azúcares fermentables

Los resultados de rendimiento en azúcares fermentables son presentados en la tabla 3.

DISCUSIÓN

Los valores de la prehidrólisis y cocimiento de la médula aquí obtenidos son similares a los de publicaciones previas en que se ha procesado bagazo de caña. Freitas y Colodette (2014) aplicaron una prehidrólisis a 180°C y 15 minutos a bagazo desmedulado y obtuvieron 71,0% de rendimiento, atribuyendo la pérdida en biomasa principalmente a la solubilización de xilan, mientras que

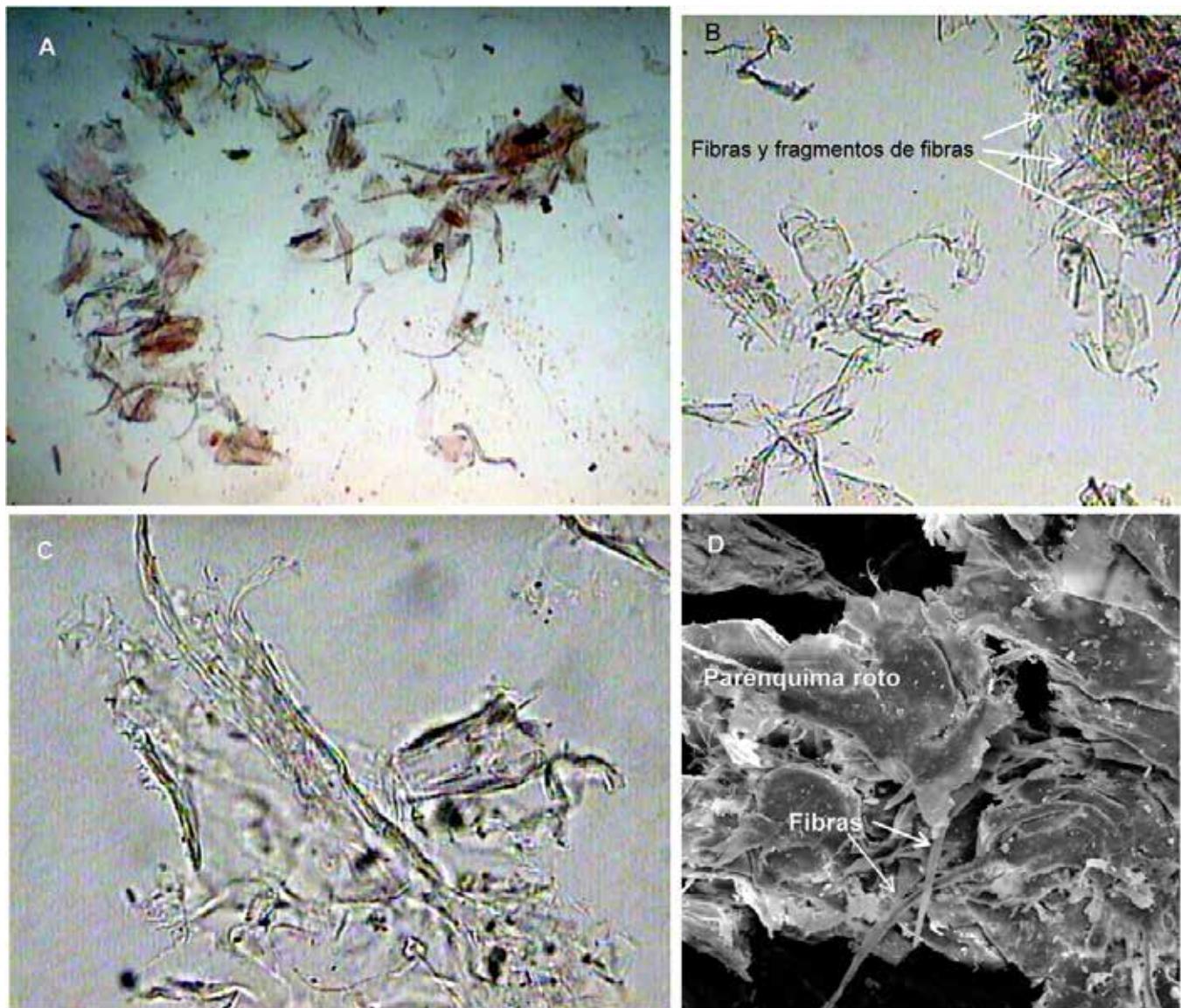


FIGURA 1. Imágenes de pulpa de médula de bagazo de caña: A. Pulpa de médula blanqueada, microscopio óptico, 4x; B. Pulpa de médula blanqueada refinada, microscopio óptico, 4x; C. Pulpa de médula blanqueada refinada, microscopio óptico, 40x; Pulpa de médula blanqueada refinada, microscopio electrónico, 500x.

Agnihotri *et al.* (2010) procesaron bagazo de caña desmedulado con una carga de 14,0% de álcali, 150 °C, 60 minutos y 0,1% de AQ obteniendo rendimiento de 42,2% y número de kappa de 16,1.

En el caso del blanqueo de la médula, aunque la blanqueura final no fue la óptima (68% ISO), se eliminó gran parte de la lignina ($0,9\% \times 0,15\% = 0,13\%$ de lignina residual teórica) ($T 236 \text{ cm} - 85$), mientras que la viscosidad

disminuyó levemente en 3,52 cp. Estos resultados indican que el material procesado contiene elementos poliméricos factibles de transformarse en otros productos útiles.

En relación con la refinación, se conoce que este tratamiento produce fibrilación externa por desprendimiento gradual de las capas de la pared celular (P y S_1), exposición de la pared S_2 con fibrilación interna por pérdida de la pared celular (Wagberg, 2005). La fibrilación incre-

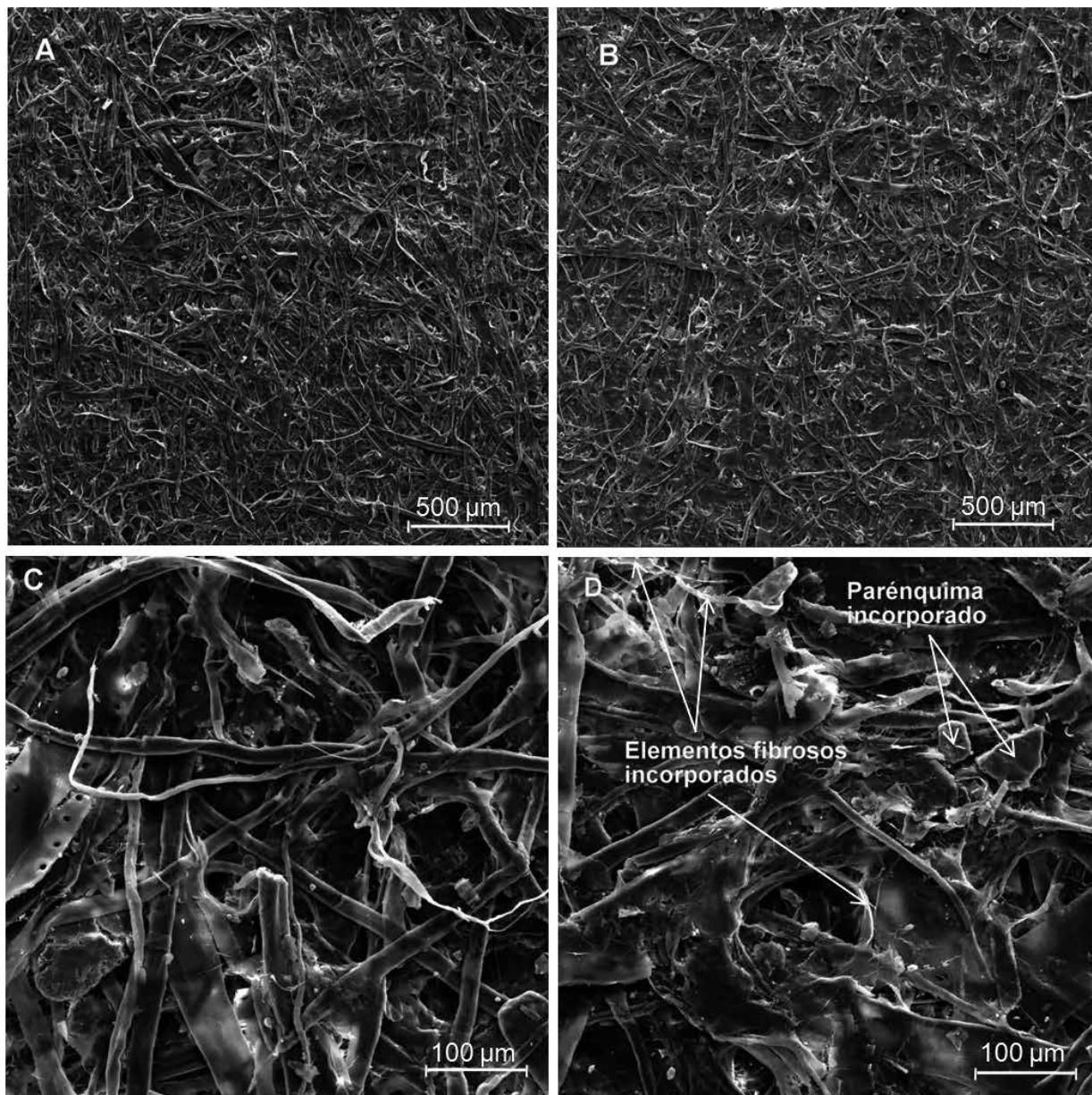


FIGURA 2. Imágenes de hojas de cartón solo y cargado con pulpa de médula blanqueada refinada: A. Cartón OCC, 100x; B. Cartón OCC con médula blanqueada refinada, 100x; C. Cartón OCC, 500x; D. Cartón OCC con médula blanqueada refinada, 500x.

menta las propiedades de resistencia mecánica de los compuestos (Nakagaito y Yano, 2005).

En este caso, debido a que la médula blanqueada está formada por una mezcla de sus elementos anatómicos originales, y por tanto con alto contenido de parénquima y poco contenido fibroso, la refinación provocó rotura de las pequeñas fibras provenientes de los haces fibrovasculares de la parte central de la caña (Fig. 1C), lo que generó

fibrillas o macrofibrillas (Fig. 1B), con probables diámetros entre 8 nm y 60 nm y varias micras de longitud (Fengel y Weneger, 1984) y finos, además de aplastamiento y rompimiento de la mayor parte del parénquima en fragmentos de diversos tamaños desde paredes celulares completas hasta fragmentos de pared celular (Fig. 1D).

Al incorporar la médula blanqueada al cartón OCC se producen efectos diversos. Las imágenes de microscopio

TABLA 2. Propiedades de resistencia y drenabilidad del cartón, y del cartón reforzado con médula de bagazo de caña.

Muestra	°SR (mL)	Drenado en el formador (segundos)	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Índice de tensión (N·m g ⁻¹)	Dobles (No.)	Índice de explosión (kPa·m ² g ⁻¹)	Índice de rasgado (mN·m ² g ⁻¹)	Porosidad (segundos)
$\bar{x} \pm s$								
C	56	6,0±0,1	0,39±0,02	21,51±3,5	7,7±2,4	1,7±0,1	6,21±0,0	5,5±0,1
CIOMB	57	6,7±0,2	0,40±0,01	21,86±1,1	4,7±1,5	1,38±0,2	6,70±0,4	5,4±0,5
CIOMB5	65	10,2±1,2	0,43±0,02	28,86±2,4	11±2,8	1,92±0,1	5,69±0,7	15,6±3,5
CIOMB10	66	9,9±1,1	0,42±0,01	29,83±1,1	9,5±2,3	2,16±0,1	6,41±0,3	13,2±1,2
CIOMB30	73	10,8±0,3	0,42±0,02	30,94±1,0	12±2,4	1,92±0,2	5,47±0,0	19,7±8,1
C30MB30	90	66,2±8,3	0,50±0,02	27,09±2,3	12±3,7	2,07±0,3	5,33±1,7	342,0±15,5
C30MB	66	9,5±0,4	0,44±0,02	38,20±3,9	5,0±1,0	1,31±0,2	5,31±0,6	31,0±0,7
C30MC	63	14,4±0,7	0,45±0,01	22,33±4,8	4,5±0,5	1,27±0,2	5,20±0,4	25,0±4,2

C= cartón reciclado, CIOMB= cartón con 10% pulpa de médula blanqueada, CIOMB5= cartón con 10% pulpa de médula blanqueada refinada 5 minutos, CIOMB10= cartón con 10% de pulpa de médula blanqueada refinada 10 minutos, CIOMB30= cartón con 10% de pulpa de médula blanqueada refinada 30 minutos, C30MB= cartón con 30% de pulpa de médula blanqueada, C30MC= cartón con 30% de médula cocida.

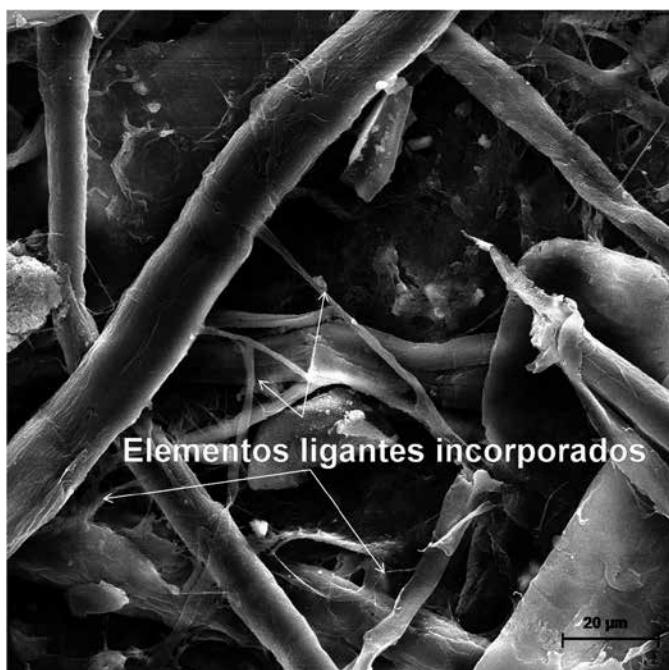


FIGURA 3. Imagen FE-SEM 2000x de hoja de cartón OCC con médula blanqueada añadida.

muestran que la hoja de cartón con médula (Fig. 2B) presenta menos huecos y menos rugosidad que la hoja de cartón sola (Fig. 2A). En la figura 2C (hoja de cartón a 500x), se pueden observar fibras con puntuaciones intertraqueidad areoladas propias de las fibras de pino, componentes

Tabla 3. Rendimiento de azúcares fermentables de la médula de bagazo de caña

Muestra	Tiempo de hidrólisis, h	Azúcares fermentables, %
		$\bar{x} \pm s$
Médula cruda	1	8,03±1,3
	6	8,03±0,5
	24	26,10±1,2
Prehidrolizada	1	22,20±1,1
	6	43,94±0,4
	24	49,12±2,7
Cocida	1	79,74±1,1
	6	86,60±0,6
	24	31,08±2,1
Blanqueada	1	84,79±1,1
	6	86,60±1,2
	24	37,00±1,7

del cartón OCC, así como finos ocasionados por el reciclaje. En la figura 2D (aumento 500x) se muestra el parénquima roto depositado en los huecos del cartón OCC, como relleno, así como fibras y fibrillas incorporadas desde la médula blanqueada, que interactúan con las fibras del car-



tón. Asimismo en la figura 3 se aprecia que el parénquima blanqueado y las fibras pequeñas blanqueadas parecen interactuar con las fibras de cartón, en forma de ligaduras.

Respecto a las propiedades de resistencia (Tabla 2), la única que evidentemente mejoró fue la resistencia a la tensión (T 404 cm-92). Esta aumentó consistentemente cuando se agregó 10% de pulpa de médula blanqueada refinada 5 minutos (C10MB5) y refinada 30 minutos (C10MB30). En este último caso, se advirtió un incremento en IT, respecto al cartón OCC (C en la tabla), de 43,8% (de 21,51 N m g⁻¹ a 30,94 N m g⁻¹), sin incremento significativo en el tiempo de drenado en el formador de hojas (equivalente al drenado en la mesa plana de la máquina de papel), de 6 segundos en el cartón OCC a 10,8 segundos del cartón reforzado con médula, ni aumento relevante de la porosidad Gurley (T 460 om-88), que indica la permeabilidad del papel con base en su estructura abierta o cerrada, de 5,5 segundos a 19,7 segundos.

Sin embargo, añadir un exceso de médula blanqueada y refinada ocasiona una disminución en la resistencia, lo que se evidencia al comparar las muestras C10MB30 y C30MB30: con 30% de pulpa de médula refinada 30 minutos (C30MB30), el índice de tensión (IT) cayó 12,4%, de 30,94 N m g⁻¹ del cartón con 10% de médula a 27,09 N m g⁻¹ del cartón con 30% de médula blanqueada refinada, ya que se incrementó la cantidad de parénquima roto añadido, el cual aparentemente no mejora las propiedades de resistencia. Además el tiempo de formación de hojas se incrementó considerablemente a 66,2 segundos (tiempo de formación de la muestra C30MB30), lo que indica un drenado sumamente lento, lo que afectaría la velocidad de producción a través del proceso de la máquina de papel (runnability), así como también una disminución significativa en la porosidad (porosidad de 342 segundos), lo que evidencia un papel cerrado. Esta disminución en drenado y en porosidad, se atribuye al parénquima roto que se deposita en los huecos del cartón OCC, como relleno, así como finos, los cuales reducen el tiempo de drenado (Paavilainen, 1993).

El mayor aumento en resistencia a la tensión, de 21,51 N m g⁻¹ a 38,2 N m g⁻¹, ganancia de 77,6% respecto al cartón OCC, lo ocasiona añadir 30% de medula blanqueada

sin refinar (C30MB). Este valor de resistencia se acerca al del papel de escritura producido a partir de fibra virgen, el cual tiene un valor entre 40 N m g⁻¹ y 45 N m g⁻¹ de IT (González *et al.*, 2012). Un efecto distinto ocurrió al añadir 30% de pulpa de médula cocida sin blanquear (C30MC), como se aprecia en la tabla 2, ya que no se mejoró ninguna de las propiedades de resistencia del cartón, lo que muestra lo valioso del blanqueo químico. La resistencia a la tensión o estiramiento se debe tanto a la resistencia individual de las fibras como a la resistencia de los enlaces interfibrilares (Page, 1969; González *et al.*, 2012). El incremento de la tensión del cartón reforzado con pulpa de médula blanqueada se atribuye a las fibras y fibrillas (producidas con el blanqueo) contenidas en la médula de bagazo añadido, como se observa en las figuras presentadas arriba, así como a la incorporación de fibras enteras flexibles (Fig. 3), libres de lignina, hábiles para establecer enlaces intra e inter-fibrilares, además de parénquima sin refinar.

Adicionalmente, el blanqueo químico produce una desorganización de la morfología de fibras y médula y aumenta la rugosidad de su superficie, además de que se producen algunos microelementos (Chimenez *et al.*, 2014). En estudios previos, Rutiaga *et al.* (2002a), mencionan que la pulpa de médula blanca, debido a su compatibilidad con el papel, actuaría como una “malla” entrelazante con las fibras. En esta mezcla (C30MB con cartón OCC) la pulpa de médula blanqueada no ocasiona aumento importante en el tiempo de drenado (9,5 segundos) ni pérdida de porosidad (31 segundos). Se podría especular que la porosidad no se incrementa debido a que el parénquima añadido con la pulpa de médula blanqueada incorporada al cartón es parénquima entero, y al secarse el papel, este elemento se contrae, además que tiene menos finos que el material refinado. Asimismo, aumenta 10 unidades (de 56 a 66) el valor SR, ya que este material (parénquima) tiene elevada capacidad de absorción de líquidos y tamaño irregular lo que afecta la drenado (Triana *et al.*, 1990).

Respecto al resto de propiedades, en todos los casos la resistencia a la explosión (T 403 om-91) no cambió o disminuyó levemente, mientras que la resistencia al rasgado (T 414 om-88) disminuyó un poco. Ya que la resis-

tencia al rasgado depende en gran medida de la longitud de las fibras (Clark, 1969), añadir pulpa de médula blanqueada al cartón, lo cual implica menos fibra larga y más fibra corta y finos, provoca decremento de esta propiedad. Asimismo, la resistencia al doblez (T 423) mejoró marginalmente.

La densidad aparente se incrementa con la adición de médula blanqueada y médula blanqueada refinada. Cartón reforzado con 30% de médula blanca refinada 30 minutos (C30MB30) presenta la mayor densidad aparente con 0,5 g cm⁻³, mientras que el cartón reciclado tiene el menor valor con 0,39 g cm⁻³. La densidad aparente del papel es una propiedad representativa de las características de la pasta celulósica, ya que es producto de múltiples factores (fibrilación, cantidad de fibrillas y microfibrillas, flexibilidad de las fibras, propiedades físicas de las fibras, cantidad de enlaces, etc.) (Amiri *et al.*, 1991; Paavilainen, 1993; Gorres *et al.*, 1996).

Es también destacable el elevado valor SR del cartón (C en la tabla 2), de 56 °SR (170 CSF), característico de los cartones reciclados varias veces en un sistema cerrado (Howard y Bichard, 1992). El contenido alto de finos acumulados (38,3% en este caso), no retenidos por la malla 200, son los que mayor efecto negativo provocan en la resistencia del papel, entre otros factores, y además tienen alto grado de hinchamiento y absorción de agua (Htun y De Ruvo, 1978).

Existe un considerable número de referencias del uso de celulosa altamente refinada (celulosa microfibrilada) proveniente de materias primas fibrosas como refuerzo de papel. Por ejemplo, González *et al.* (2012) añadieron microfibras de eucalipto a pulpa blanqueada de eucalipto sin refinar, encontrando que con 9% de nanofibras el índice de tensión mejoró 100%, el índice de explosión mejoró 2,72 veces, y el rasgado se incrementó 80%, pero ocasionó un pobre nivel de drenado y porosidad Gurley, la cual aumentó de 2 segundos a 52 segundos.

Son pocas las referencias respecto a la utilización de la médula del bagazo de caña blanqueada como refuerzo. Rutiaga *et al.* (2002a) añadieron pulpa de médula de bagazo de caña blanqueada a pulpa de pino blanqueada

refinada a diversos niveles. Encontraron que el largo de ruptura se incrementó hasta 5 veces al añadir 10% de pulpa de médula blanqueada al pino refinado 12 °SR, y hasta 7 veces al añadir 40% de ésta médula. Mientras que el índice de rasgado (IR) se incrementó 1,15 veces al agregar 10% de este material, disminuyendo este incremento al añadir mayor cantidad. Estos resultados son mejores que los aquí encontrados, posiblemente porque el sustrato utilizado fue diferente, en este caso cartón OCC, con fibras más rígidas y gran cantidad de finos. El papel reciclado, como es el caso del cartón OCC, tiene pobre calidad y baja resistencia debido a la reducción de flexibilidad y capacidad de hinchamiento de las fibras a causa del fenómeno de hornificación¹ (Scallan y Tydeman, 1992), y por la desactivación de agentes enlazantes de su superficie. La hornificación hace las fibras más rígidas, debido a que sufren un colapso interno a causa del proceso de secado, lo que dificulta su fibrilación (Minor *et al.*, 1993).

Por otro lado, en relación con la producción de azúcares fermentables, el mejor rendimiento se obtuvo con la pulpa de médula cocida y la pulpa de médula blanqueada utilizadas como sustrato de hidrólisis, las cuales tuvieron un comportamiento similar: 86,6% de rendimiento en azúcares fermentables con 6 h de tratamiento, lo que significa que se hidroliza la mayor parte del 97,3% de carbohidratos de la pulpa de médula cocida, y la mayor parte del 99,9% de carbohidratos de la pulpa de médula blanqueada. En ambos casos, un tiempo mayor de hidrólisis, 24 h, provoca que el rendimiento de azúcares fermentables disminuya. Como era de esperarse, la médula con mayor contenido de lignina residual produce menor rendimiento: Con la médula cruda (sin ningún tratamiento) se obtiene un máximo de 26,10% de rendimiento, mientras que con la médula prehidrolizada se obtuvo un máximo en rendimiento de 49,12%, ambos con 24 h de hidrólisis. En el caso de la pulpa de médula cocida y pulpa de médula blanqueada, el tratamiento químico eliminó la mayor parte de la lignina y disminuyó la cristalinidad de la celu-

¹ Los cambios que ocurren en la fibra durante el proceso de secado corresponden a un fenómeno investigado en fibra virgen por Jayme (1944), al que se denominó Hornificación.



losa, principales barreras que sirven de protección contra la actividad enzimática sobre los azúcares (Zheng *et al.*, 2009). También se menciona que el blanqueo de la biomasa lignocelulósica hace más accesibles el material a la hidrólisis (Novaes *et al.*, 2012). García-Kirchner y Huitron (1996), obtuvieron un máximo de 25,7% de azúcares fermentables en 48 horas, al hidrolizar médula de bagazo de caña sin pretratamiento, utilizando una mezcla enzimática de endo y exoglucanasas, glucosidasas y xilananas, cultivadas a partir de los hongos *Penicillium sp* y *A. terreus*. Lo que coincide con el 27,0% de rendimiento obtenido con la hidrólisis enzimática por 24 h de la médula sin tratar (Tabla 3). En estudios más recientes (Hernández-Salas *et al.*, 2009), pretrataron la médula de bagazo de caña con NaOH diluido (2% w/v) a 121 °C; 1,1 kg cm⁻² y 4 h, e hidrólisis posterior con 20% (w/w) de una mezcla enzimática de Celluclast, Novozyme, Cellubrix y Pulpzyme HC, y obtuvieron solo 11%-20% de sacarificación. Dasgupta *et al.* (2013), utilizaron médula de bagazo pre tratada con vapor y H₂SO₄ e hidrólisis enzimática para obtener 40 g L⁻¹ de azúcares fermentables y 17,4 g L⁻¹ de alcohol.

CONCLUSIONES

Se evaluó el efecto de añadir médula de bagazo de caña como refuerzo de cartón OCC, llegando a las siguientes conclusiones:

La médula blanqueada promueve la interacción entre las fibras del cartón por medio de enlaces y mayor área de contacto a través de las células de parénquima blanqueadas, con aumento de la resistencia a la tensión.

Este material blanqueado, sin refinar, se puede añadir en altos porcentajes sin decremento de las propiedades de drenado y porosidad.

El batido (refinado) de la médula blanqueada provoca rompimiento del parénquima en fragmentos de diversos tamaños y finos no funcionales.

Los fragmentos y finos no funcionales actúan como relleno de huecos de las hojas, mejorando su rugosidad y opacidad, pero no la resistencia, porosidad y capacidad de drenado, si se añade en un porcentaje mayor a 10%.

Probablemente otros métodos de refinación más suaves (Pila Valley o Pila Holandesa) promoverían una mayor generación de fibrillas o finos funcionales entrelazantes.

Desde otra perspectiva, la médula del bagazo de caña podría ser un material útil para transformarse en bioproductos, ya que la baja cristalinidad y grado de polimerización facilitaría la generación de azúcares fermentables.

RECONOCIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a la SEP-PRO-MEP por el apoyo económico del proyecto clave PRO-MEP/103.5/13/6982 “Obtención de azúcares fermentables y celulosa microfibrilada a partir de médula de bagazo de caña”, del cual se generó este manuscrito.

REFERENCIAS

- Aguilar-Rivera, N. 2011. Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel. *Ingeniería Investigación y Tecnología* 12(1):189-197.
- Agnihotri, S., D. Dutt y C.H. Tyagi. 2010. Complete characterization of bagasse of early specie of *Saccharum officinarum*-co89003 for pulp and papermaking. *BioResources* 5(2):1197-1214.
- Amiri, R., J.R.Wood, A. Karnis y J. Gorres. 1991. The apparent density of paper. Proc. International Paper Physic Conference. p:11-18.
- Boopathy, R. 2004. Use of post-harvest sugarcane residue in coastal reclamation: A feasibility study. *Sugar Cane International* Jan/Feb:9-13.
- Chimenez, T.A., M.H. Gehlen, K. Marabezi y A.A.S. Curvelo. 2014. Characterization of sugarcane bagasse by autofluorescence microscopy. *Cellulose* 21:653–664 DOI 10.1007/s10570-013-0135-9.
- Cao Y., S. Shibata y I. Fukumoto. 2006. Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments. *Composites: Part A* 37:423–429.
- Clark, J.D.A. 1969. Fibrillation, free water, and fiber bonding. *Tappi Journal* 52(2):335-340.
- COVECA (Comisión Veracruzana de la caña de azúcar). 2008. Monografía de la caña de azúcar. Gobierno del Estado de

- Veracruz. [En línea] <http://portal.veracruz.gob.mx/pls/portal/docs/page/covecainicio/imagenes/archivospdf/archivosdifusion/monografia%20ca%d1adeazucar2010.pdf>. Fecha de acceso: 20/02/2015.
- Dasgupta, D., S.K. Suman, D. Pandey, D. Ghosh, R. Khan, D. Agrawal, R.K. Jain, V. T. Vadde y D.K. Adhikari. 2013. Design and optimization of ethanol production from bagasse pith hydrolysate by a thermotolerant yeast *Kluveromyces* sp. IIPE453 using response surface methodology. *Springerplus* 2:159.
- De la Madrid C., E. 2009. La situación de la industria de la celulosa y el papel en el mundo. Financiera Rural. México. [En línea]
- <http://www.fnd.gob.mx/informacionsectorrural/Documents/Articulos%20FR/Microsoft%20Word%20-%20art%C3%A1culo%20Celulosa%20y%20Papel.pdf>. Fecha de acceso: 18/02/2015
- Diez, O.A., G.J. Cárdenas y L.F. Mentz. 2010. Poder calorífico superior de bagazo, médula y sus mezclas, provenientes de la caña de azúcar de Tucumán, R. Argentina. *Revista industrial y agrícola de Tucumán* 87(1):29-38. ISSN 1851-3018.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2014. Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2014-2018. Secretaría de Gobernación. México. [En línea]
- http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5343244&fecha=02/05/2014. Fecha de acceso: 15/02/2015
- Emsley, A.M. 2008. Cellulosic ethanol re-ignites the fire of cellulose degradation. *Cellulose* 15:187-192.
- Escoto G., T. 2009. Manual maestro para la evaluación de pulpas a través de la curva de refinación. Universidad de Guadalajara. Ediciones de la noche, Guadalajara, Jalisco, México. 93 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2008. Anuario de productos forestales, periodo 2002-2006. Estadística No. 195. Roma. 331 p.
- Fengel, D. y G. Weneger. 1984. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter. Berlin. 626 p.
- Flores, R., R. Muñoz-Ledo, B. Flores y K.I. Cano. 2008. Estimación de la generación de energía a partir de biomasa para proyectos del programa de mecanismo de desarrollo limpio. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 7(1):35-39.
- Franklin, G. 1937. Permanent preparations of macerated wood fibres. *Tropical Woods* 49:21-22.
- Freitas Andrade, M. y J.L. Colodette. 2014. Dissolving pulp production from sugar cane bagasse. *Industrial Crops and Products* 52:58-64.
- Garcia-Kirchner, O. y C. Huitron. 1996. Saccharification of native sugar cane bagasse pith by the cross-synergistic action of cellulases from *Penicillium* sp. CH-M-001 and *A. terreus* CH-M-O 13. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 57/58:253-265.
- Ghose, T.K. 1987. Measurement of cellulose activities. *Pure and Applied Chemistry* 59(2):257-268.
- Gilfillan, W., L. Moghaddam y W.O.S. Doherty. 2014. Preparation and characterization of composites from starch with sugarcane bagasse nanofibre. *Cellulose* 21(4):39 p. DOI 10.1007/s10570-014-0277-4.
- González, I., S. Boufi, M.A. Pélach, M. Alcalá, F. Vilaseca y P. Mutjé. 2012. Nanofibrillated cellulose as paper additive in eucaliptus pulps. *BioResources* 7(4):5167-5180.
- Gorres, J., R. Amiri, J.R. Wood y A. Karnis. 1996. Mechanical pulp fines and sheet structure. *Journal of Pulp and Paper Science* 22(12):J490-J496.
- Hegbom, L. 1992. Structural aspects of sugar-cane bagasse from a paper-making point of view a light microscopic study. In: Proc. 2nd Int. Non-wood fiber pulping and papermaking conf., Int. Trade Centre, Shanghai. p:657-672.
- Hernández-Salas, J.M., M.S. Villa-Ramírez, J.S. Veloz-Rendón, K.N. Rivera-Hernández, R.A. González-César, M.A. Plascencia-Espinosa y S.R. Trejo-Estrada. 2009. Comparative hydrolysis and fermentation of sugarcane and agave bagasse. *Bioresource Technology* 100:1238-1245.
- Howard, R.C. y W. Bichard. 1992. The basic effects of on pulp properties recycling. *Journal of Pulp and Paper Science* 18(4):151-159.
- Htun, M. y A. De Ruvo. 1978. The implications of the fines fraction for the properties of bleached kraft sheet. *Svensk Papperstidning* 81(16):507-510.



- Isaac, A., F. Sketc, C. Driemeierb, G.J.M. Rocha. 2013. 3D imaging of sugarcane bagasse using X-ray microtomography Industrial. *Crops and Products* 49:790-793.
- ISO (International Organization for Standardization).1979. ISO 5264/3. Pulps-laboratory beating- part 3: Jokro mill method. 1979.
- ISO (International Organization for Standardization).1999. ISO 5267-1. Pulps-Determination of drainability-Part 1: Schopper-Riegler method.
- Jain, R.K., V.V. Thakur, D. Pandey, D.K. Adhikari, A.K. Dixit y R.M. Mathur. 2011. Bioethanol from bagasse pith a lignocellulosic waste biomass from paper/sugar industry. *Indian Pulp and Paper Technical Association* 23:169-173.
- Jayme G. 1944. Mikro-Quellungsmessungen an Zellstoffen. *Wochenblatt für Papierfabrikation* 6:187-194.
- Kordsachia, O., S. Roßkopf y R. Patt. 2004. Production of spruce dissolving pulp with the prehydrolysis-alkaline sulfite process (ph-asa). *Lenzinger Berichte* 83:24-34.
- Lee, S.C. y M. Mariatti. 2008. The effect of bagasse fibers obtained (from rind and pith component) on the properties of unsaturated polyester composites. *Materials Letters* 62:2253-2256.
- Miller, G.L. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugars. *Analytical Chemistry* 31(3):426-428.
- Minor, J.L., C.T. Scott y H. Atalla. 1993. Restoring bonding strength to recycled fibers. Proceedings recycling symposium. Tappi Press. Atlanta, GA. p:379-385.
- Misman M., S.R. Wan Alwi y Z.A. Manan. 2008. State-of-the-art for paper recycling. International Conference on Science and Technology (ICSTIE) 12-13. Universiti Teknologi MARA, Pulau Pinang, Malasia.
- Nakagaito, A.N. y H. Yano. 2005. Novel high-strength biocomposites based on microfibrillated cellulose having nano-order-unit web-like network structure. *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 80(1):55-159.
- Novaes, R.C., F.M. Teixeira, C.C. Perrone, C. Sant'Anna, W. de Souza, Y. Abud, E.P. da Silva Bon y V. Ferreira-Leitao. 2012. Structural evaluation of sugar cane bagasse steam pretreated in the presence of CO₂ and SO₂. *Biotechnology for Biofuels* 5(36):1-8.
- Paavilainen, L. 1993. Conformability-flexibility and collapsibility-of sulphate pulp fibres. *Paperi Ja Puu* 75(9-10):689-702.
- Page, D.H. 1969. A theory for the tensile strength of paper. *Tappi Journal* 52(4):674-681.
- Pandey, A., C.R. Soccol, P. Nigam y V.T. Soccol. 2000. Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: sugarcane bagasse. *Bioresource Technology* 74:69-80.
- Rainey, T.J., I.M. O'Hara, A.P. Mann, C.H. Bakir y F. Plaza. 2013. Effect of depithing on the safety and environmental aspects of bagasse stockpiling. *Process Safety and Environmental Protection* 91:378-385.
- Rasul, M.G., V. Rudolph y M. Carsky. 1999. Physical properties of bagasse. *Fuel* 78:905-910.
- Rivera J.J., J. Anzaldo, B. Becerra, J. Ramos, R. Sanjuán y J.L. Colodette. 2008. Procesos de blanqueo a base de oxígeno aplicados a pulpa obtenida del cartón corrugado reciclado (OCC). V Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel, Ciadicyp. Guadalajara, Jalisco, México.
- Rutiaga Quiñones, J.G., J. Anzaldo Hernández, J.J. Vargas Radillo y R. Sanjuán Dueñas. 2002a. Propiedades de resistencia de una pulpa *kraft* de pino mezclada con médula del bagazo de caña de azúcar. *Madera y Bosques* 8(2):17-26.
- Rutiaga Quiñones, J.G., J.J. Rivera Prado y R. Sanjuán Dueñas. 2002b. Blanqueo del parénquima de la caña de azúcar mediante la secuencia OD₁E_pD₂. *Ciencia Nicolaita* 13:139-145.
- Ruzin, S.E. 1999. Plant microtechnique and microscopy. Oxford University Press. Oxford, Nueva York. 322 p.
- Sanjuán, R., J. Anzaldo, J. Vargas, J. Turrado y R. Patt. 2001. Morphological and chemical composition of pith and fibers from Mexican sugarcane bagasse. *Holz als Roh- und Werkstoff* 59:447-450.
- Scallan, A.M. y A.C. Tydeman. 1992. Swelling and elasticity of the cell walls of pulp fibres. *Journal of Pulp and Paper Science* 18(5):J188-J193.
- TAPPI Test Methods 2002-2003, Tappi Press, Atlanta, GA, USA.
- Teixeira, E.D.M., T.J. Bondancia, K.B.R. Teodoro, A.C. Correa, J.M. Marconcini y L.H.C. Mattoso. 2011. Sugarcane

- bagasse whiskers: extraction and characterizations.
Industrial Crops and Products 33(1):63-66.
- Triana, O., M. Leonard, F. Saavedra, N. Fernández, G. Gálvez y E. Peña. 1990. Atlas del Bagazo de la Caña de Azúcar. Cuba-9. Ed. GEPLACEA/PNUD/ICIDCA, México, D.F. 143 p.
- Wagberg, L. 2005. Wood material science. Finnish-Swedish research programme, 2003-2007 year book.
- Zheng, Y., Z. Pan y R. Zhang. 2009. Overview of biomass pre-treatment for cellulosic ethanol production. *International Journal of Agriculture and Biology* 2(3):51-68.

Manuscrito recibido el 16 de agosto de 2014.
Aceptado el 27 de febrero de 2015.

Este documento se debe citar como:

Vargas-Radillo, J. J., E. Salazar-Ríos, L. Barrientos-Ramírez, A. Pérez-Centeno, M. Rentería-Urquiza, A. Rodríguez-Rivas, F. Navarro-Arzate y J. Rutiaga-Quiñones. 2015. Pasta blanqueada y azúcares fermentables a partir de médula de bagazo de caña. *Madera y Bosques* 21(2): 117-130.