

Aprovechamiento integral de los residuos generados en la industria del henequén (*Agave fourcroydes*) en la generación de materiales y energía

G. Canché-Escamilla^{a,*}, L- Guin-Aguillon, I. Forero Sandoveal, S. Duarte-Aranda^a

^a)Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Calle 43 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, 97205 Mérida, Yuc., México.*gcanche@cicy.mx

Resumen:

En este trabajo se presenta un esquema de aprovechamiento integral de los residuos generados en la producción de fibras de henequén para la obtención de materiales, así como producción de biocombustibles mediante pirólisis. Se evaluaron dos métodos de obtención de celulosa a partir del bagazo de henequén. El proceso de extracción alcalina (AEP) mostró una mayor eficiencia de recuperación de celulosa (43%) y una mayor relación de aspecto ($L/D = 73$) en comparación con el proceso hidrotérmico de extracción alcalina (AHTP). La celulosa obtenida mediante AHTP presentó una mayor cristalinidad (66%), con una estructura predominantemente de celulosa I, mientras que la celulosa extraída mediante AEP presentó una cristalinidad del 44%, con conversión parcial a celulosa II. En la pirólisis de los residuos agrícolas de henequén (tallos y varejón), obtenidos a diferentes temperaturas y con una velocidad de calentamiento de 30 °C/min, se observó que independiente del residuo y la temperatura se obtiene una fracción sólida (biocarbón), una fracción líquida (bio-oil) y una fracción gaseosa (gas de síntesis o syngas). El mayor rendimiento de bioaceite se obtuvo en muestras de tallo, hasta un 43%, probablemente debido a su mayor contenido de holocelulosa. La fracción de carbón se mantuvo entre el 19% y el 28%, y la del gas, entre el 34% y el 47%. Se demostró que el esquema propuesto es factible para la obtención de materiales y biocombustibles, que se podría aplicar en la industria productora de licores a partir de agaves

Introducción.

Durante la explotación de los agaves que se cultivan en México, ya sea para la obtención de fibras duras (fibras de henequén de *A. Fourcroydes*, fibras de ixtle de *A. Lechuguilla*, etc.) o para la producción de licores (Tequila de *A. tequilana*, Mezcal de Agaves mezcaleros, etc.) se genera una gran cantidad de residuos tanto sólidos (bagazo de henequén, bagazo de agave, etc.) como líquidos (vinazas) [Saucedo-Luna et al., 2011; Forero-Sandoval et al., 2025]. Los residuos generados en la explotación de las agaváceas, son actualmente una fuente de contaminación en los campos y en los terrenos aledaños de las fábricas de licores o de las desfibradoras, por lo que su aprovechamiento en productos que presenten un valor agregado contribuirá a fortalecer la cadena productiva de los agaves. Los residuos sólidos también se conocen como residuos lignocelulósicos debido a que sus componentes principales son polisacáridos como celulosa y hemicelulosa, así como

compuestos aromáticos como la lignina. Aunque se han realizado estudios encaminados al uso de estos residuos para la generación de celulosa, biocombustibles por métodos biológicos o térmicos, composta, materiales compuestos, etc. (Rosli et al., 2013; Fonseca-Prieto et al., 2014; Robles et al., 2018; Acosta Sotelo et al., 2023; González García et al., 2025); sin embargo, hasta el momento no se tiene un proceso a nivel industrial en que se utilice la gran cantidad de residuos que se generan en estas agroindustrias.

Para el caso particular del aprovechamiento de la planta de henequén, éste se circunscribe actualmente a la obtención de la fibra contenida en las hojas y que representa un 5% del peso de la planta. En la obtención de las fibras mediante el desfibrado de las hojas, quedan como residuos el bagazo y el jugo de henequén. Se ha reportado que por cada kg de fibra obtenida se generan 2.33 kg de bagazo de henequén (López Cobá y col.,

(2005), el cual se acumula en las zonas aledañas a las desfibradoras y una fuente de contaminación. También se generan residuos en el campo, ya que al final del tiempo de aprovechamiento de la planta (15 años) quedan los troncos secos y las piñas (sección verde de la planta con hojas) así como el varejón (Fonseca-Prieto et al., 2014). Para la revalorización de los residuos que se generan en la cadena productiva del henequén, es necesario evaluar tanto sus propiedades físicas y químicas, su disponibilidad y lo pretratamientos necesarios para su uso en las aplicaciones propuestas.

En este trabajo se presenta un esquema de aprovechamiento integral de los residuos generados en la producción de fibras de henequén para la obtención de celulosa y biocombustibles a partir de los residuos agroindustriales y agrícolas del cultivo de henequén.

Parte experimental.

Materiales.

Se usó bagazo de henequén (Figura 1) proporcionado por la Desfibradora San Carlos situada en Baca, Yucatán, México para la obtención de celulosa. Los residuos del tronco y varejón se obtuvieron de la Hacienda Santa Teresa ubicada en el municipio de Telchac Pueblo, Yucatán, México (Figura 2). El ácido sulfúrico (>95 % peso) y el hidróxido de sodio fueron grado reactivo de Sigma-Aldrich. El hipoclorito de sodio (6% de cloro libre) fue grado comercial.

Caracterización de los residuos lignocelulosicos del henequén

Se determinó la composición química de las fibras de bagazo de henequén, del tronco y del varejón. Para la determinación de extraíbles con solventes orgánicos se usó un equipo Soxhlet de acuerdo al método T-204 cm-07 de la TAPPI. Se pesaron de 2 g de residuo lignocelulósico seco y se colocaron en cartuchos previamente elaborados con papel filtro y puestos a peso constante. Se colocaron los cartuchos en la cámara de extracción del Soxhlet y se extrajo por un período de 5 horas con una mezcla de etanol benceno (2:1). El cartucho se filtró y se secó hasta peso constante primero dejándolo solamente en la

campana con extractor, luego se secaron utilizando una estufa a 100 °C. Se repitió el proceso de extracción, pero utilizando sólo etanol como disolvente.



Figura 1. Hojas o pencas de henequén (a), desfibrado de la hoja (b), bagazo de henequén obtenido en las desfibradoras (c) y fibras de bagazo de henequén (d).

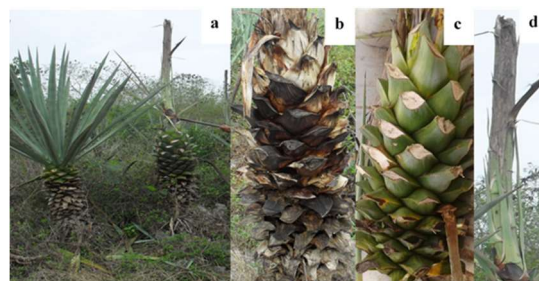


Figura 2. Residuos de plantaciones de henequén. A) Planta en producción y planta la final de su producción, b) parte seca del tronco, c) parte verde del tronco y d) varejón.

Para la determinación de extraíbles con agua se empleó el método T-207 cm-99 de la TAPPI. Se vertieron las muestras libres de extraíbles orgánicos en matraces con 900 ml de agua destilada y se procedió a calentarlo a ebullición durante una hora, se filtró y los sólidos se extrajeron dos veces más con agua caliente. Los sólidos se secaron utilizando una estufa a 100 °C hasta peso constante. El porcentaje de extraíbles en cada etapa, se calculó de la relación de peso perdido (peso antes y después de la extracción) con respecto al peso inicial de muestra.

Se determinó el contenido de lignina del residuo lignocelulósico libre de extraíbles de

acuerdo a la técnica T222 de la TAPPI, con algunas modificaciones. Se pesó 1g de material libre de extraíbles y se sometieron a una hidrólisis ácida con 15 ml de H₂SO₄ al 72 % (p/p), la muestra se mantuvo en agitación en un baño de temperatura constante durante 2 horas a temperatura de 15 °C. Posteriormente la suspensión se diluyó con agua hasta alcanzar una concentración de ácido del 4% y se calentó a ebullición durante 4 horas. Después se filtró la solución en un filtro de vidrio poroso tipo "F", previamente llevados a peso constante y el residuo insoluble (lignina Klason) se secó hasta peso constante. El contenido de holocelulosa se calculó de la diferencia al 100% del porcentaje de extraíbles y de lignina.

El análisis elemental o análisis de CHON se realizó con un analizador elemental Thermo Scientific FLASH 2000. Se colocaron de 2 a 3 g de material en cápsulas de estaño, según se indica en la técnica, para su análisis automático. Los resultados obtenidos se utilizaron para calcular los valores calóricos de las muestras mediante la fórmula de Dulong [32]. La fórmula, expresada como el valor calorífico máximo, se muestra a continuación:

$$\text{Poder calorífico máximo [KJ/kg]} = [33823 \times \%C + (144250 \times \%H - ((\%O)/8)) + 9419 \times \%S] (2)$$

donde C, H, N, S y O son el contenido (%) de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno en la muestra, respectivamente.

Obtención de celulosa de bagazo de henequén.

Se obtuvo la celulosa a partir de la fibra de bagazo de henequén mediante los siguientes métodos:

Método desarrollado en el CICY (PEA). Este proceso consiste en cuatro pasos: hidrólisis ácida, cloración, tratamiento alcalino y blanqueo (Canché-Escamilla et al., 2005). 20 gramos de fibras se sometieron a reflujo en una solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 2 % durante una hora. Posteriormente, las fibras se lavaron y neutralizaron hasta alcanzar un pH neutro; las fibras se sumergieron en una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) al 3.5 % hasta alcanzar un pH de 9.2, se filtraron y lavaron con agua hasta pH neutro. Las fibras se agitaron mecánicamente en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 20% durante

una hora a temperatura ambiente. La pulpa celulósica obtenida se lavó con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro y se sometió a agitación mecánica en una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) al 0.5% durante una hora, seguido de lavados repetidos hasta alcanzar un pH neutro. Finalmente, las fibras se secaron a temperatura ambiente y luego se introdujeron en un horno hasta alcanzar un peso constante a 100 °C.

Método de pulpeo a la sosa (PHTA). En este proceso, se sumergieron 20 g de fibra en 400 ml de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 6% y se calentaron con agitación mecánica a 160 °C durante 3 horas. La pulpa y el licor se separaron por filtración y el residuo se lavó con agua destilada hasta obtener un pH neutro. La pulpa celulósica obtenida, se sometió a un proceso de blanqueo mediante agitación mecánica durante una hora con una solución que contenía 240 ml de hipoclorito de sodio (NaClO) al 0.5%. Las fibras se lavaron varias veces con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro. Finalmente, se secaron a temperatura ambiente y posteriormente en horno hasta alcanzar un peso constante a 100 °C.

Caracterización de la celulosa.

La morfología de la celulosa y de las CMF se obtuvieron usando microscopía electrónica de barrido (SEM). Se usó un microscopio electrónico de la marca JEOL modelo JM6300. Se depositaron unas gotas de una suspensión de las fibras (celulosa o CMF) sobre un portamuestras, se secaron a temperatura ambiente y se recubrieron con una capa de oro para evitar la degradación de la CFM y mejorar el contraste. Se obtuvieron los difractogramas de las muestras usando un difractómetro Siemens D5000 provisto de una fuente de radiación Cu-K α

Obtención y caracterización de biocombustibles mediante pirólisis

Para las pruebas de pirólisis se utilizó un horno tubular Thermo Fisher Scientific con controlador de temperatura, sistema de refrigeración y sistema de recolección de bioaceite. Las muestras se colocaron dentro de un tubo de cuarzo de 2,5 cm de diámetro y se colocaron dentro del horno. La pirólisis se realizó a temperaturas máximas de 600, 700,

800 y 900 °C, utilizando un flujo de N₂ de 10 mL/s y una velocidad de calentamiento de 30 °C/min. Las fracciones líquida (bioaceite) y sólida se cuantificaron gravimétricamente, mientras que la fase gaseosa se calculó por diferencia del 100 %.

La caracterización de los productos de pirólisis, líquidos y sólidos, se realizó mediante la determinación de su composición elemental con un analizador elemental Thermo Scientific FLASH 2000, siguiendo el procedimiento antes inidcado y el poder calorífico se calculó usando la ecuación de Dulong.

Resultados y discusión.

Se puede observar que las fibras obtenidas del bagazo contienen un alto contenido de holocelulosa y bajo contenido de lignina (Tabla 1) lo que lo hace una materia prima adecuada para la obtención de celulosa. Por otro lado, el alto contenido de extraíbles y de lignina del varejón y el tronco son más adecuados para la obtención de biocarbón mediante pirólisis. Esto último se confirma por el mayor contenido de carbono en el análisis elemental y más alto poder calorífico de estos residuos.

Obtención y caracterización de celulosa.

Se obtuvo celulosa a partir de la desestructuración de las fibras del bagazo de henequén y la remoción de los componentes no celulósicos (Figura 3). Se obtuvieron rendimientos de 43.4 y 36.3% para los procesos PEA y PHTA, respectivamente, lo que se podría deber a que el tratamiento PHTA es más agresivo al realizarse a altas temperatura y remueve también parte de la celulosa (Tabla 2). La celulosa PEA tuvo diámetros promedio del orden de 15 micras, lo que resultó en valores promedio de L/D mayores (73) que los de la celulosa PHTA (55).

Tabla 1. Rendimiento y dimensiones de celulosa obtenida de bagazo de henequén

Residuo	Composición química (%)			Análisis elemental (%)			Poder calorífico (J/kg)
	Extraíbles	Lignina	Holo-celulosa	C	H	O	
Varejón	17.8	23.1	59.1	47.0	6.0	47.0	16.09
Fibras bagazo	8.3	11.1	80.6	41.6	5.6	52.7	12.70
Tronco	22.5	28.1	49.4	43.2	5.3	51.4	13.02

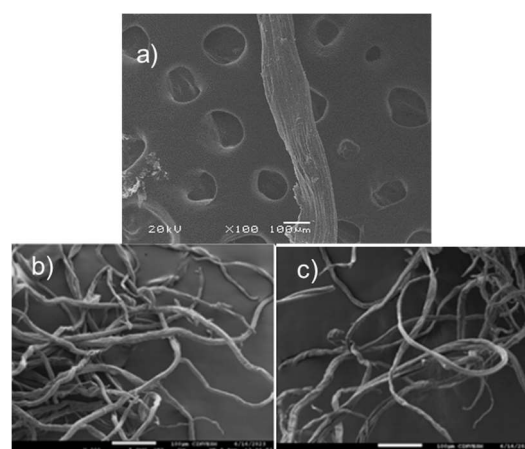


Figura 3. Morfología de las fibras de bagazo de henequén (a), celulosa PEA (b) y celulosa PHTA (c)

Tabla 2. Rendimiento y dimensiones de celulosa obtenida de bagazo de henequén

Proceso	Rendimiento (%)	Longitud (micras)	Diámetro (micras)	Relación (L/D)
PEA	43.4	1093.2	15.0	73.0
PHTA	36.7	1100.0	20.0	54.9

En la figura 4 se muestran los difractogramas de rayos X (DRX) de las celulosas obtenidas con diferentes tratamientos. La celulosa PHTA muestra un pico bien definido a 22.8 y un pico ancho a 15-17 2θ, característicos de una celulosa tipo I; mientras que La celulosa PEA presenta la estructura cristalina de celulosa tipo II con la presencia de un pico agudo en 22

un hombro a 20 2θ; también presentan un doblete en 15-18 2θ. Este comportamiento se atribuye al tratamiento alcalino (proceso de mercerización) de las fibras en el proceso PEA.

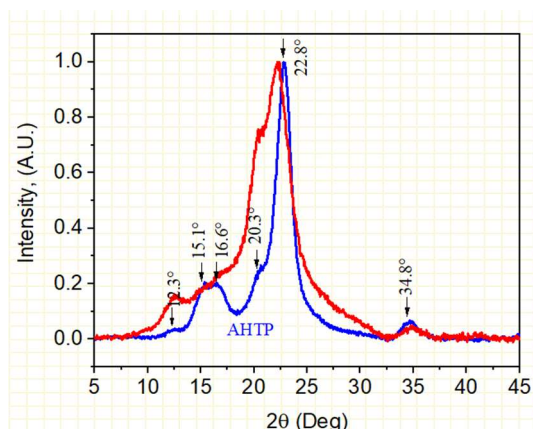


Figura 4. Difractogramas de rayos X de las celulosas obtenidas.

Obtención y Caracterización de biocombustibles.

Se observó que independientemente del residuo y de la temperatura se obtuvo una fracción sólida (biocarbón), una fracción líquida (bioaceite) y una fracción gaseosa. Los rendimientos de bioaceite (Tabla 3) mostraron ligeros incrementos al aumentar la temperatura a 800 °C lo que podría deberse a una mayor pérdida de masa por descomposición de los metabolitos secundarios y holocelulosa; por lo tanto, se obtienen mayores cantidades de volátiles condensables a temperaturas cercanas a 500 °C. A temperaturas más altas, sólo la fracción carbonosa contribuye a la producción de gases condensables y no condensables, como se ve en la disminución del rendimiento de la fracción carbonosa al aumentar la temperatura y el ligero aumento en los rendimientos de bioaceite y gas de síntesis. El mayor rendimiento de bioaceite se obtuvo para las muestras de varejón (hasta 43%) y probablemente se debió a su mayor contenido de holocelulosa. La fracción de biocarbón se mantuvo entre el 20 y el 24% y la de gas entre el 36 y el 46%.

Tabla 3. Rendimiento de los productos de pirólisis de los residuos de varejón y tronco del henequén.

Residuo	Temperatura de pirólisis (°C)	Productos de pirólisis (%)		
		Biochar	Bioaceite	Gas
Varejón	700	21.7	41.9	36.4
	800	20.2	43.2	36.6
	900	19.9	37.4	42.7
Tronco	700	24.3	29.3	46.3
	800	23.5	35.1	41.4
	900	23.7	40.0	36.3

No se observó un efecto de la temperatura de pirólisis sobre el análisis elemental y poder calorífico del bioaceite (Tabla 4), aunque se obtuvo un incremento del contenido de carbono de 43% a 59% y del poder calorífico de 14,462 a 20,500 J/kg para el tronco y el bioaceite, respectivamente. Para el biocarbón se observó un efecto de la temperatura de pirólisis sobre el contenido de carbón y el poder calorífico, los que aumentaron al incrementar la temperatura. Este comportamiento se puede atribuir a la remoción de grupos oxigenados como grupos ácidos, OH fenólicos entre otros, como se puede apreciar de la disminución del contenido de oxígeno y de hidrógeno al aumentar la temperatura. Se obtuvo un incremento del poder calorífico del 66% con respecto al del tronco cuando la pirólisis de llevó a cabo a 900°C.

Conclusiones

Se obtuvo celulosa a partir del bagazo de henequén y las propiedades de la misma dependen del método de obtención. Se obtuvieron biocombustibles sólidos (biocarbón), líquidos (bioaceite) y gaseosos (gases incondensables) a partir de residuos obtenidos en el cultivo del henequén. A temperaturas de pirólisis altas se obtiene un carbón con mayor poder calorífico.

Tabla 4. Análisis elemental y poder calorífico del tronco del henequén.

Temperatura de pirólisis (°C)	Análisis elemental (%)				Poder calorífico (J/kg)
	C	H	O	N	
Tronco	43.2	5.3	51.4	0.0	14,462
700	65.6	1.6	32.3	0.4	21,851
800	69.0	1.3	29.1	0.5	23,011
900	72.2	0.9	25.6	1.5	24,031

Agradecimientos.

Los autores agradecen a la SECIHTI por el apoyo brindado al proyecto CBF2023-2024-3289. Uno de los autores (IYFS) agradece al SECIHTI por la beca posdoctoral.

Referencias.

Acosta Sotelo L.L., Zamora Natera J.F., Rodríguez Macías R., Jiménez Plascencia C., Gallardo Lancho J.F., Salcedo Pérez E. Bagazo y composta de bagazo de agave tequilero en suelos contrastantes: 2. Dinámica de mineralización del carbono y nitrógeno, *Biotechnia* 2023, 5-1125

Fonseca-Prieto, F.V., Canché-Escamilla, G., Chavarria-Hernandez, J.C. et al. Characterization of lignocellulosic residues of henequen and their use Isolation and Characterization of Cellulose Nanocrystals from Agave angustifolia Fibreas a bio-oil source. *Biomass Conv. Bioref.* 2014. 4, 95–104.

Forero-Sandoval, I.Y., Duarte-Aranda, S. & Canche-Escamilla, G. Valorization of henequen bagasse via cellulose extraction:

influence of the extraction method on the properties of cellulose-reinforced composite films. *Cellulose* 2025, 32, 8343–8357.

González-García A.P., Hernández S.C., Díaz Jiménez L. Agave lechuguilla waste can be applied as biochar-adsorbent to remove arsenic from water. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2025; 22, 9193–9208.

Huerta-Cardoso O., Durazo-Cardenas I., Longhurst P., Simms N.J., Encinas-Oropesa A. Fabrication of agave tequilana bagasse/PLA composite and preliminary mechanical properties assessment, *Ind. Crops Produc.* 2020, 152, 112523.

López Cobá, E.H.; Ancona Méndez L.; Medina Peralta, S. Cultivo de *Pleurotus djamor* en condiciones de laboratorio y en una casa rural tropical. *Rev. Mex. Micol.* 2005, 21, 93-97.

Ríos-González, L.J., Morales-Martínez, T.K., Rodríguez-Flores, M.F., Rodríguez-De la Garza, J.A., Castillo-Quiroz, D., Castro-Montoya, A.J., Martínez, A., Autohydrolysis pretreatment assessment in ethanol production from agave bagasse, *Bioresource Technology* (2017), doi:

Robles E., Fernández-Rodríguez; Barbosa, A.M., Gordobil O., Carreño N.L.V., Labidi J. Production of cellulose nanoparticles from blue agave waste treated with environmentally friendly processes, *Carbohydr. Polym.* 2018, 183, 294-302.

Rosli N.R., Ahmad I., Isolation and Characterization of Cellulose Nanocrystals from Agave angustifolia Fibre. *Bioresour.* 2013, 8, 1893-1908

Saucedo-Luna, J.; Castro-Montoya, A.J.; Martínez-Pacheco, M.M.; Sosa-Aguirre, C.R. Campos-García, J. Efficient chemical and enzymatic saccharification of the lignocellulosic residue from Agave tequilana bagasse to produce ethanol by *Pichia Caribbica*, *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 2011, 38, 725-732.