CIENCIAS EXACTAS

CARACTERIZACIÓN Y PROPIEDADES DE MATERIALES SUSTENTABLES DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum* L.) SIN ADITIVOS QUÍMICOS

CHARACTERIZATION AND PROPERTIES OF SUSTAINABLE MATERIALS FROM SUGARCANE BAGASSE (*Saccharum officinarum* L.) WITHOUT CHEMICAL ADDITIVES

Autores:

González, Nélida [1*]
ORCID: 0000-003-4238-077X

Araque, Carmen[1]
ORCID: 0009-0004-7592-0669

Vasquez, Jennifer[1]
ORCID: 0009-001-6342-3479

Arias, Angélica[1]
ORCID: 0009-0008-1568-0500

Carrero, Yván[2]
ORCID: 0009-0000-2738-5244

Bautista, Luis[3]
ORCID: 0009-0007-4636-0924

Quintero, América[1]
ORCID: 0000-0001-9377-7086

Valero, María[1]
ORCID: 0009-0000-9640-3952

[1] Laboratorio de Fitoquímica, Decanato de Investigación, Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), Venezuela
[2] Laboratorio de Conformado de Materiales, Decanato de Docencia, UNET, Venezuela
[3] Laboratorio de Control Microbiológico, Decanato de Investigación, UNET, Venezuela

***Corresponding Author:** Nelida_c@yahoo.com

Palabras clave: *Saccharum officiarum,* termoprensados, sostenible, propiedades

Key words: *Saccharum officinarum*, thermopressed, sustainable, properties

RESUMEN

El residuo agroindustrial de la caña de azúcar tiene un impacto global por los beneficios ambientales y socioeconómicos. La Federación Nacional de Cañicultores de Venezuela (Fesoca) indicó que la zafra 2026, procesará 5,4 toneladas de caña y el bagazo oscilará entre 25 % a 40 % no se utiliza para fabricar subproductos sostenibles novedosos en Venezuela, una alternativa es elaborar materiales prensados sin aditivos químicos de alta densidad, duros, aislantes, bio-sostenibles, amigables con el ambiente y sin riesgos para la salud. El objetivo de la investigación fue la evaluación de las características químicas de partículas de 250 µm y 2 mm, así como también las propiedades de materiales termoprensados con partículas de bagazo de caña de azúcar (PBCA) de 2 mm, 750 µm y 250 µm, entre 100 ºC a 180 °C y 1000 lb a 1600 lb de presión. Los resultados obtenidos para PBCA (250 µm y 2 mm) fueron: celulosa (50,75 % y 37,86 %), lignina (16,30 % y 13,68 %) hemicelulosas (48,46 % y 32,85 %) y nutrientes (N, Cu, Fe, Mn, Zn, Ca, Mg, P, K, Na). Las mejores propiedades se obtuvieron con los materiales de 2 mm: densidad (1321,7 Kg/m^3), dureza Shore (62-59), resistencia al peso (472,31kg/cm^2), absorción y aumento del espesor por inmersión en agua durante 24 horas (8,12 % y 5,02 %), respectivamente. La degradación aeróbica (9,20 %) y anaeróbica (34,25 %) se realizó con PBCA de 2 mm, valores coherentes con la transformación natural de la materia lignocelulósica. La obtención y propiedades de los materiales con PBCA sin aditivos químicos le confieren potencial aplicación industrial de insumos densos, duros, resistentes al peso y a exposiciones de humedad. Estos resultados constituyen un aporte al conocimiento y representa un incentivo para continuar investigando sobre las aplicaciones del bagazo de caña de azúcar en Venezuela.

ABSTRACT

Agro-industrial sugarcane residue has a global impact due to its environmental and socio-economic benefits. The National Federation of Sugarcane Growers of Venezuela (Fesoca) indicated that the 2026 harvest will process 5.4 tons of cane, with bagasse accounting for 25% to 40% of the output; however, this residue is not currently used in Venezuela to manufacture innovative, sustainable by-products. One alternative is the production of high-density, hard, insulating, bio-sustainable, and eco-friendly pressed materials that pose no health risks. The research aimed to evaluate the chemical characteristics of 250 µm and 2 mm particles, as well as the properties of materials hot-pressed from sugarcane bagasse particles (SCBP) of 2 mm, 750 µm, and 250 µm, processed at temperatures between 100°C and 180°C and pressures between 1000 lb and 1600 lb. The results obtained for SCBP (250 µm and 2 mm) were: cellulose (50.75% and 37.86%), lignin (16.30% and 13.68%), hemicellulose (48.46% and 32.85%), and nutrients (N, Cu, Fe, Mn, Zn, Ca, Mg, P, K, Na). The best properties were obtained with the 2 mm particle materials: density (1321.7 kg/m³), Shore hardness (62–59), load resistance (472.31 kg/cm²), and—following 24-hour water immersion—water absorption (8.12%) and thickness swelling (5.02%). Aerobic (9.20%) and anaerobic (34.25%) degradation tests were conducted using 2 mm SCBP, yielding values consistent with the natural transformation of lignocellulosic matter. The production process and properties of PBCA-based materials—free of chemical additives—suggest potential industrial applications for dense, hard products capable of withstanding heavy loads and exposure to moisture. These results contribute to the body of knowledge and serve as an incentive for further research into applications for sugarcane bagasse in Venezuela.

Recibido: 23/07/2026 **Aprobado:** 10/10/2026

INTRODUCCIÓN

El bagazo es el principal residuo fibroso industrial, obtenido tras prensar (triturar) los tallos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L), para extraer el jugo. Al procesar una tonelada de caña de azúcar, se obtienen entre 0,25 y 0,30 toneladas de bagazo (Clauser *et al*., 2016). El material resultante tiene tres aplicaciones principales, se deja en un campo para su transformación en abono, se vende como materia prima para la industria papelera, o se aprovecha como combustible; teniendo para estas aplicaciones un valor añadido bajo, además que su uso como combustible, fundamentalmente en las calderas de los procesos industriales de la misma industria azucarera, produce gases contaminantes y cenizas volantes (Reinosa *et al*., 2018).

Entretanto, una cantidad significativa de bagazo se elimina de forma incontrolada, en forma de montones de residuos directamente en terrenos abiertos (Bhat *et al*., 2016), lo que inevitablemente conduce a la contaminación ambiental, debido a la liberación de olores desagradables que atraen insectos y otras plagas, y a veces la ocurrencia accidental de incendios (Ungureanu *et al*., 2022).

Ante este panorama de generación de riesgos ambientales y sanitarios, diversos países productores de caña de azúcar le dan al bagazo usos alternativos, Mubarak *et al* (2024) menciona usos para la generación de energía eléctrica, térmica y mecánica en Brasil. En India se ha utilizado ampliamente en la industria del papel y la pasta de papel, y recientemente han puesto su atención hacia el desarrollo del biogás y el bioetanol (Hiranobe *et al*., 2024), mientras que en China invierten fuertemente en tecnologías de vanguardia, como el uso de bagazo para producir nanocelulosa, biocarbón y biohidrógeno (Mann, 2016).

En Egipto producen tableros de partículas de bagazo de caña de azúcar agregando resinas epoxi, fenólicas, poliuretanos, formaldehído como adhesivos, (Salatein *et al.,* 2024). Estas resinas presentan riesgos para la salud como congestión de la garganta, dolor de cabeza y ardor de los ojos, (Hermawan *et al*., 2009). Sun *et al* (2003) exponen las propiedades adhesivas de las hemicelulosas presentes en residuos agrícolas (caña, maíz, trigo, arroz), en base a la red de enlaces covalentes y puentes de hidrógeno entre los polisacáridos de las hemicelulosas y las unidades fenólicas de la lignina generando nuevos biopolímeros a partir de recursos renovables. Salatein *et al* (2024) compararon las propiedades mecánicas de tableros de partículas de bagazo de caña de azúcar con y sin resinas adhesivas y concluyeron que la producción de citados tableros es técnicamente factible a escala industrial.

Últimamente, para contribuir al desarrollo sostenible, cada vez más fábricas intentan encontrar soluciones para poner en práctica los principios del concepto de bioeconomía circular, que se refiere a la producción de energía, alimentos, productos químicos y otros biomateriales y compuestos a partir de biomasa de forma sostenible e integrada/en cascada (biorrefinería), generando cero residuos (Ungureanu *et al*., 2022).

La Federación Nacional de Cañicultores de Venezuela (Fesoca), informó que para la zafra azucarera de 2025 a 2026 se procesarán 5,4 millones de toneladas de caña de azúcar (Banca y Negocios, 2025). El residuo de la molienda o bagazo oscilaría entre 25 % a 40 %, el cual sería desechado o usado como fuente de producción energética, para la transformación del jugo de caña en azúcar, en panela y melaza; siendo descartado como materia prima fibrosa, abundante y económica para la fabricación de otros subproductos sostenibles, que generen empleo.

Entre los desafíos que enfrenta Fesoca, se destacan el insuficiente presupuesto para la investigación y extensión agrícola, un limitado desarrollo en biotecnología, la falta de estudios e investigación para la producción de subproductos, a partir del bagazo de caña de azúcar.

Para que el bagazo de caña de azúcar, sea considerado una materia prima apropiada, para elaborar materiales y subproductos sostenibles pero también degradables, debe cumplir con la caracterización química, las propiedades establecidas en ensayos y en normas internacionales, que garanticen el desarrollo de las industrias en esta área; que al presente no existen en Venezuela, por lo cual el objetivo de la investigación fue la evaluación de las características y propiedades de las partículas de bagazo de caña de azúcar (PBCA), con el propósito de fomentar el espectro de aplicaciones del PBCA, para elaborar materiales prensados sin aditivos químicos de alta densidad, duros, aislantes, bio-sostenibles y amigables con el ambiente y sin riesgos para la salud.

MÉTODO

Material botánico

El bagazo de caña de azúcar de la variedad P.O.J.2878, procede del central panelero J.G. Carrero, ubicado en el Municipio Sucre del estado Táchira, Venezuela. La caña se trituró en un molino 10D JM Estrada, con 61 % capacidad de extracción; el bagazo resultante se secó al aire bajo techo, previo al traslado al Laboratorio de Fitoquímica de la Universidad Nacional del Táchira (UNET).

Etapas para la obtención de materiales prensados con partículas de bagazo de caña (PBCA)

1. De la zona antes señalada se colectaron 8 kg de bagazo, los cuales fueron dispuestos en bolsas plásticas cerradas.
2. El bagazo (8 kg) se sumergió y lavó con suficiente agua potable, a temperatura ambiente, para excluir polvo, sedimentos u otros materiales adheridos a la fibra inicial; seguidamente se escurrió al ambiente por 24 h y se secó en una estufa (Lab-instrument. Inc Model N° 3513, 120V, 13,3 amp, Hertz 50/60, Watts 1600, serial 0601-0201) por 24 h a 70 °C.
3. El bagazo seco fue pasado por un molino de martillo (marca Magtron modelo M-670, con una potencia de 1,5 HP, 120 V) y provisto con una malla de 2 mm de poro.
4. Las partículas molidas fueron pasadas por tamiz (marca Thomas USA), con abertura en malla de 750 µm. El producto obtenido fue nuevamente llevado a estufa, por 2 h a 105 °C; seguidamente, fue pulverizado, por 1 min, en molino de cuchillas (32000 rpm). El material resultante fue filtrado (en tamiz n°60 de 250 µm), humedecido (30 %) y tratado con vapor a presión en Autoclave (All American de 25 L, a 15 lb, 121 °C) por 30 min, para activar las propiedades adhesivas de la lignina, Moreno *et al* (2021); el heteropolímero fenólico del tejido vascular de las plantas, Maceda *et al* (2021).

Caracterización de partículas de bagazo de caña de azúcar (PBCA)

Los análisis sobre la composición de PBCA de 2 mm y 250 µm, se realizaron en el Laboratorio de Fitoquímica de la Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), introduciendo ligeras modificaciones justificadas en la norma TAPPI citada por Leal *et al* (2011). Se midieron por triplicado el contenido de humedad, las cenizas no extraíbles en agua a 90 °C, la lignina Klason insoluble en ácido T222om-21, (Toscano *et al*., 2015), celulosa y hemicelulosa. (Sun *et al*., 003).

En los Laboratorios de Suelos y Bioambiental de la UNET, se determinó la concentración de los elementos (cobre, hierro, manganeso, zinc, calcio, magnesio, potasio y sodio) por absorción atómica, en un espectrofotómetro Perkin Elmer, (modelo AAnalyst 100). El nitrógeno total por Micro Kjeldhal, de acuerdo a la Norma ISO 1871 (2009). La materia orgánica y el carbono orgánico, en mufla (Thermoline modelo 2000) a 750 °C durante 4 horas, según la Norma EN 15935:(2021).

Propiedades de los materiales PBCA termoprensados con partículas de 2 mm, 750 µm y 250 µm Prensado de PBCA

El ensayo se realizó en el equipo Speed Pres II del Laboratorio de materiales UNET, empleado para prensar probetas de baquelita siguiendo el procedimiento de la Norma ISO 14526-3:1999 que regula el prensado del polvo de baquelita y de compuestos fenólicos moldeables.

Las PBCA de esta investigación, contienen lignina polímero fenólico y hemicelulosa (tabla 1), con actividad adhesiva (Morsali 2021 y Sun *et al* 2003).

Para el prensado se utilizó un portamuestra de 5 cm de diámetro y se aplicó temperatura entre 100 °C a 180 °C y 1000 lb a 1500 lb de presión.

Dureza Shore

Los ensayos por triplicado, se realizaron prensando el PBCA de 2 mm, 750 µm y 250 µm, en un equipo Speed Press II, del laboratorio de materiales de la UNET; usando un portamuestra de 5 cm de diámetro, a una temperatura que oscila entre 100 °C a 180 °C y las 1000 lb a 1500 lb de presión, para prensar el polvo de baquelita, por cuanto no existe norma internacional específica para el PBCA.

Las muestras cilíndricas resultantes de pesos y medidas determinados, se experimentaron según el método Brinell (Norma ISO 6506:2014). Con un durómetro alemán W-lestor, penetrador de acero templado de 5 mm, una presión de carga de 125 kgf, durante 10 a 30 seg, para marcar la huella sobre el material sin ocasionar una fractura, y medir el diámetro de la huella en la lupa estereoscópica, Wild M3 Heerbrugg con un ocular 10x y un objetivo 40x, que permite medir el diámetro de la huella con la reglilla graduada, con una apreciación de 0,1 mm. Se registró el promedio de dos medidas perpendiculares del diámetro.

El método Brinell, se utilizó para medir y comparar la dureza Shore de los materiales PBCA, termoprensados de esta investigación con las correspondientes a maderas prensadas comerciales tipo MDF.

Mediante la tabla 1 de equivalencia de durezas, se relaciona el diámetro de la huella impresa en el material, con el valor de la dureza en la escala Shore de las muestras experimentadas.

Tabla 1. Equivalencia entre Durezas Brinell, Rockwell, Vickers y Shore.

Brinell Diámetro Huella	Brinell Dureza HB[a]	Brinell Dureza Ha[b]	Rockwell Dureza HRb[c]	Rockwell Dureza HRc[d]	Vickers Dureza Hv[e]	Shore
2,35	682,00	64,00	-	65,00	885,00	91,00
2,40	652,00	83,00	-	63,00	820,00	87,20
2,45	627,00	81,50	-	61,00	765,00	
2,50	600,00	80,50	-	29,00	633,00	
2,55	578,00	79,50	-	59,00	717,00	81,50
2,60	555,00	79,00	120,00	57,00	675,00	78,50
2,65	534,00	78,00	119,00	54,00	598,00	71,50
2,70	514,00	77,00	119,00	52,00	567,00	71,00
2,75	495,00	76,50	117,00	51,00	540,00	68,50
2,80	477,00	75,50	117,00	49,00	515,00	66,70
2,85	461,00	74,40	116,00	48,00	494,00	65,00
2,90	444,00	73,50	115,00	46,00	472,00	63,00
2,95	429,00	73,00	115,00	45,00	454,00	61,00
3,00	415,00	72,50	114,00	44,00	437,00	59,00
3,05	401,00	71,50	113,00	42,00	420,00	57,20
3,10	388,00	71,00	112,00	41,00	404,00	65,80
3,15	375,00	70,50	112,00	40,00	389,00	54,00
3,20	363,00	70,00	110,00	39,00	375,00	57,20
3,25	352,00	69,50	110,00	38,00	363,00	50,50
3,30	341,00	68,50	109,00	36,00	350,00	49,20
3,35	331,00	68,00	109,00	35,00	339,00	48,00
3,40	321,00	67,50	108,00	34,00	327,00	46,70
3,45	311,00	67,00	108,00	33,00	316,00	45,20
4,50	183,00	-	91,00	10,00	183,00	28,50
4,55	174,00	-	90,00	9,00	179,00	28,00

a = dureza Brinell para metales blandos o heterogéneo, b = dureza Brinell para plásticos y cauchos, c = dureza Rockwell para aceros blandos, d = dureza Rockwell para aceros duros, e = dureza Vickers para piezas metalizas delgadas.
Fuente Normas ISO 1865:2013. Conversión de valores de tabla de dureza

Densidad de PBCA
Esta propiedad está vinculada con la calidad, resistencia y aplicaciones de los materiales, maderas, tableros, prensados y similares.

La densidad de los materiales elaborados con PBCA, se realizó en el Laboratorio de Fitoquímica de la UNET, y se determinó pesando las muestras en una balanza analítica (Ohaus), mostrando el resultado en gramos (g) se dividió entre su volumen cilíndrico. Las medidas del radio (r) y la altura (h), se realizaron con un vernier milimétrico, los datos se incorporaron a las siguientes ecuaciones.

Ecuación 1: $V=\pi.r^2.h$ (cm^3)

r = radio de la muestra cilíndrica (cm)
h = altura de la muestra cilíndrica (cm)

Ecuación 2: $d = \frac{m(g)}{V\,(cm^3)}$

m= peso de la muestra (g)
V= volumen de la muestra (cm^3)

Las densidades de prensados o tableros de bagazo, madera y chapados de maderas se expresan en kg/m^3. En tal sentido, la densidad en g/cm^3 se multiplica por 10^3 para la conversión de unidades.

Resistencia al peso de materiales termoprensados de PBCA
La citada propiedad, se realizó en el laboratorio de componentes constructivos UNET, con el equipo marca Control M 66 con un software acoplado, que controla con precisión la fuerza aplicada y proporciona datos sobre la capacidad del material, para soportar cargas comprensivas (Kg) o ceder a la carga, creando deformaciones en la superficie, lo cual sugiere un potencial uso de los materiales.
Las cargas compresivas resultantes se incorporan a la siguiente ecuación:

Ecuación 3: $Rp = \frac{Ca\,(kgf)}{A\,(cm^2)}$

Rp= resistencia al peso
Ca= carga aplicada (kgf)
A= área (cm^2)

Absorción por inmersión total en agua
Este ensayo se realizó en el Laboratorio de Fitoquímica de la UNET, durante 2 y 24 horas, según el manual de los derivados de la caña de azúcar de Carvajal y Martínez (2000), además de las normas ASTMD1037 y COVENIN 847-91; según las cuales los materiales de partículas lignocelulósicas, y maderas enchapadas expuestas a condiciones drásticas de humedad, deben tener bajos valores de absorción de agua.
Las muestras termoprensadas, elaboradas con diferentes tamaños de partícula PBCA se sumergieron en agua destilada, contenidas en cápsulas de Petri a temperatura ambiente. Después de 2 horas y 24 horas de inmersión, cada muestra se extrajo del agua y se secó suavemente sobre tela absorbente, antes de pesarla en la balanza analítica, para luego medir su diámetro y espesor, con un vernier milimétrico.

El porcentaje de agua absorbida se calculó mediante la ecuación siguiente.

Ecuación 4: $\%\ de\ agua\ absorbida = \frac{mf-mi}{mi} x100$
mf = masa de la muestra seca después de la inmersión.
mi = masa de la muestra antes de la inmersión.

El porcentaje de aumento del espesor se calculó por medio de la siguiente ecuación:

Ecuación 5: $\%\ aumento\ de\ espesor = \frac{Ef-Ei}{Ei} x100$
Ef= Espesor de la muestra seca después de la inmersión
Ei= Espesor de la muestra antes de la inmersión en agua

Biodegradación de materiales elaborados con PBCA

La degradación al ambiente, se realizó por triplicado en un biorreactor, construido a partir de una bolsa plástica blanca con entrada de aire, un plato con borra de café y cáscaras de papa, al mezclarse fue que se añadió a las tres muestras, elaboradas con partículas de 2 mm, para determinar la biodegradación durante los 4 meses, por diferencia de pesos.

La biodegradación de materiales similares de bagazo de caña, enterrados en suelo, se ensayó por triplicado en tres hoyos de 20 cm x 20 cm x 20 cm, en el terreno de franco arcilloso en bolsa de malla nylon. Pasados los 4 meses, las muestras fueron extraídas y pesadas, para determinar la disminución del peso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2, se reseña la composición de los macro y micro constituyentes de las partículas de bagazo de caña de azúcar (PBCA), de entre 250 µm y 2 mm. Las variaciones en la composición de ambas, pueden atribuirse al procesamiento aplicado al bagazo para obtenerlas (Cabrera *et al* 2016). En tal sentido, los porcentajes de humedad (5,52 % y 8,63 %), son favorables al disminuir la posibilidad de proliferación de microorganismos, que degradan los materiales elaborados con el bagazo de caña, en esta investigación (Resano *et al* 022).

Tabla 2. Caracterización de PBCA

Constituyente	Tamaño gránulo 250 µm (%)	Tamaño gránulo 2 mm (%)
Humedad	5,520	8,63
No extraíbles en agua 90°C	81,98	69,50
Lignina	16,30	13,68
Celulosa	50,75	37,86
Hemicelulosa	32,85	48,46
Cenizas	43,00	12,22
Materia Orgánica (MO)	57,00	87,79
Carbono Orgánico (CO)	31,66	48,77
Nitrógeno (mg)	0,40	0,22
Cobre (mg)	0,42	0,34
Hierro (mg)	3,43	21,10
Manganeso (mg)	0,47	1,50
Zinc (mg)	0,49	3,95
Calcio (mg)	0,44	28,58
Magnesio (mg)	3,31	15,27
Fósforo	0,76	1,30
Potasio (mg)	0,01	60,18
Sodio (mg)	No Detectado	1,36

Los no extraíbles en agua a 90 ºC, son los compuestos orgánicos de lignina, celulosa, hemicelulosa, así como también las sales minerales que se cuantifican en las cenizas (43,00 % y 12,22 %), que se utilizan como fertilizantes (Chandini *et al* 2019; Arias *et al* 2021).

Los valores de lignina (16,30 % - 13,68 %), celulosa (50,75 % - 37,86 %) y hemicelulosa (32,85 % - 48,46 %), están dentro de los rangos publicados por Murphy (2017) y Triana - Hernández *et al* (2014).

La lignina es un polímero fenólico sin estructura definida, que sometido a calentamiento alrededor de los 70 °C a 130 °C, se ablanda y aumenta su potencial adhesivo (Morsali 2021); evidenciado en la densidad, las propiedades de dureza, resistencia al peso e inmersión en el agua de los materiales que la contengan.

La cantidad significativa de hemicelulosas (32,85 % -48,46 %), añade un potencial adhesivo (Sun *et al* 003), a la fibra lignocelulósica presente en las PBCA, con las cuales se elaboraron los materiales termoprensados en esta investigación.

Relacionado con la composición los micronutrientes de las partículas de 250 µm y 2 mm (tabla 2), se destaca que solamente el nitrógeno (0,40 mg) y el cobre (0,42 mg) están en mayor cantidad en las partículas de 250 µm; sin embargo, ambas contienen Mn, Zn, Ca, Mg, F y K, reportados en extractos de subproductos agroindustriales, que colocados en ambientes agrícolas, pueden servir como nutrientes para los cultivos; lo que puede resultar en un ahorro en el uso de fertilizantes convencionales (Castillo *et al* 23).

Dureza Shore

La figura 1, presenta por triplicado las muestras termoprensadas con PBCA de 2 mm, 750 µm y 250 µm; las cuales resultaron compactas, de color marrón-beige, con matizados visualmente atractivas, lisas, duras, brillantes y sin asperezas.

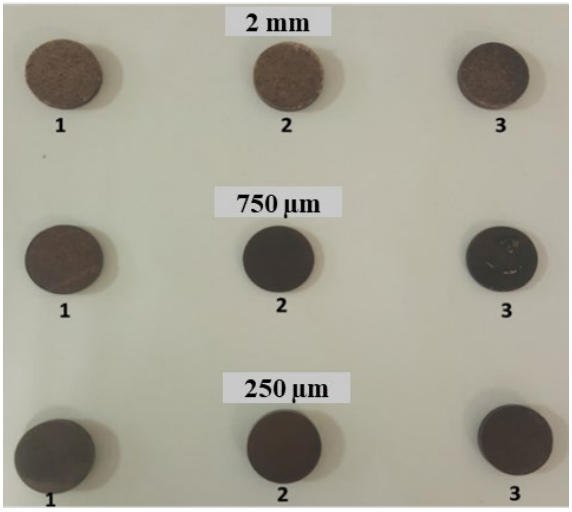

Figura 1. Materiales PBCA sin aditivos químicos

La dureza Shore de los materiales PBCA, resultó después de relacionar el diámetro (mm) de la huella Brinell, impresa sobre ellos con el durómetro W-lestor, con el valor de la dureza Shore, reportado en la tabla 1, sobre la equivalencia de las durezas

En la tabla 3, se registran los pesos de la muestra de diferentes gránulos, así como las muestras de maderas comerciales MDF, el diámetro de la huella Brinell y en los valores promedio de la dureza Shore.

Tabla 3. Dureza Shore de muestras con PBCA

Muestra (partículas)	Peso (g)	Diámetro huella Brinell (mm)	Shore	Dureza Shore	Promedio de Dureza
2 mm	8,10	3,00 3,10	59,00 65,80	62,40	60,80
	8,50	3,00 3,00	59,00 59,00	59,00	
	8,70	2,90 3,00	63,00 59,00	61,00	

Tabla 3. Dureza Shore de muestras con PBCA (continuación)

Muestra (partículas)	Peso (g)	Diámetro huella Brinell (mm)	Shore	Dureza Shore	Promedio de Dureza
750 µm	4,60	4,00 4,00	35,00 35,00	35,00	31,40
	4,70	4,50 4,50	28,00 28,00	28,00	
	4,60	4,20 4,30	32,00 30,20	31,10	
250µm	10,20	3,90 3,80	36,50 38,50	35,80	38,70
	9,30	4,00 3,90	35,00 36,50	35,80	
	8,70	3,50 3,50	44,50 44,50	44,50	
Madera MDF 1	17,70	3,00 3,10	59,00 65,80	62,40	62,40
Madera MDF 2	39,35	3,30 3,30	49,20 49,20	49,20	49,20

La dureza Shore 60,8 de los materiales termoprensados de PBCA de 2 mm sin resina, ni aglomerante, es similar a 62,4 de la madera MDF 1. La dureza Shore de 31,4, corresponde a materiales blandos y flexibles, la de dureza Shore 60,8, en cambio se parece a los materiales que resisten el hundimiento, y a maderas tratadas con elevadas temperaturas o incluso presiones, como las condiciones experimentadas en esta investigación.

Adicionalmente, Sun *et al* (2003) exponen las propiedades adhesivas de las hemicelulosas, presentes en residuos agrícolas mediante enlaces covalentes y puentes de hidrógenos, con la lignina generando nuevos biopolímeros, a partir de recursos renovables no tóxicos.

Densidad de muestras elaboradas con PBCA

En la tabla 4, se reseñan las densidades de las muestras logradas; el promedio de las densidades de las muestras de 2 mm (1321,7 kg/m^3), es superior a las de maderas livianas de 100 a 350 kg/m^3 Gutiérrez *et al* (2010), y supera la densidad de 850 kg/m^3 de tableros de bagazo de caña, (Carvajal y Rodríguez., 2000), y a las correspondiente a las maderas comerciales MDF1 y MDF2.

Tabla 4. Densidad de materiales por tamaño de PBCA

Muestra	Tamaño de la partícula (mm)	Masa (g)	Espesor (mm)	Diámetro (mm)	Volumen (cm^3)	Densidad (Kg/m^3)	Densidad Promedio (Kg/m^3)
1	2 mm	8,10	5,20	38,00	5,90	1372,90	1321,70
2		8,50	5,80	38,00	6,58	1291,80	
3		8,70	5,90	38,00	6,69	1300,40	
1	750 µm	4,91	4,00	38,00	4,54	1081,50	1160,10
2		4,43	3,00	38,00	3,40	1302,90	
3		4,23	3,40	38,00	3,86	1095,90	
1	250 µm	9,88	6,94	38,00	7,87	1255,40	1247,40
2		9,43	6,63	38,00	7,52	1254,00	
3		8,84	6,32	38,00	7,17	1232,90	
MDF 1	---	17,70	1,20	---	26,88	658,48	658,48
MDF 2	---	39,35	1,30	---	66,56	591,19	591,19

Resistencia al peso

En la tabla 5 se muestra, que la mayor resistencia al peso resultó de los materiales elaborados, con las de partículas más pequeñas, porque esta propiedad depende del tamaño y la orientación de las partículas dentro de los materiales (Resano *et al* 2022).

Es notable que las resistencias de las 9 muestras logradas en la investigación, superan a las correspondientes a las 2 maderas comerciales MDF1 y MDF2.

Tabla 5. Resistencia al peso

Muestra	Área (cm^2)	Peso aplicado (t)	Resistencia al peso (Kg/cm^2)	Promedio de resistencia al peso (Kg/cm^2)
2 mm	28,89	13,72	474,90	472,31
	29,85	12,66	424,12	
	29,85	15,46	517,92	
750 µm	27,46	14,47	526,95	512,79
	26,26	14,71	560,17	
	26,26	11,85	451,25	
250 µm	31,04	16,96	546,39	537,69
	31,04	15,85	510,63	
	29,96	16,66	556,07	
MDF 1	24,11	6,84	283,70	283,70
MDF 2	24,23	6,02	248,45	248,45

Absorción por inmersión total en agua

Los mejores resultados se lograron con materiales elaborados con PBCA de 2 mm, como se muestra en la tabla 6 a las 24 horas, con un 8,12 % de absorción de agua y 15,83 % aumento en el espesor, estos son valores favorables con respecto a tableros de bagazo de caña, en el rango de 10 % a 30 % para la absorción de agua y 15 % a 20 % para el aumento del espesor, durante el mismo tiempo (Carvajal y Martínez, 2000).

Tabla 6. Absorción de agua y aumento del espesor de materiales elaborados con PBCA

Muestra	Tamaño de la partícula	Absorción de H_2O 2 horas (%)	Absorción de H_2O 24 horas (%)	Aumento espesor 2 horas (%)	Aumento espesor 24 horas (%)
1	2 mm	0,86	8,52	0,00	15,38
2		2,59	9,76	28,26	30,43
3		0,80	6,09	0,00	1,69
	Promedio	1,42	8,12	9,42	15,83
1	750 µm	7,54	10,39	0,00	10,00
2		10,61	16,03	10,00	36,67
3		9,69	12,53	0,00	14,71
	Promedio	9,28	12,98	3,33	20,46
1	250 µm	3,14	9,31	0,86	6,63
2		5,30	11,03	4,07	5,58
3		3,73	7,69	1,27	2,85
	Promedio	4,06	9,34	2,07	5,02

Biodegradación aeróbica y anaeróbica de material prensado con partículas de 2 mm de bagazo caña de azúcar

Las partículas PBCA sin aditivos químicos evaluadas, contienen macro y micro compuestos (tabla 2), generalmente están presentes en el proceso químico de degradación biológica de los residuos lignocelulósicos (Grijalba, 2013). La acción conjunta de macro y micronutrientes, las enzimas hidrolíticas, oxidativas sintetizadas por microorganismos u hongos en condiciones aeróbicas y anaeróbicas, transforman el material orgánico en dióxido de carbono, hidrógeno y agua (Grijalba., 2013 y Sánchez 2008), lo que se traduce en disminución del peso de las muestras durante los 4 meses de ensayo como se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Degradación aeróbica de materiales elaborados con PBCA de 2 mm

Muestra	Peso inicial (g)	Peso final secado a 105°C/1h (g)	Disminución (g)	Degradación %
1	17,52	15,98	1,54	8,70
2	14,52	12,89	1,63	11,22
3	26,00	24,00	2,00	7,69
			Promedio	9,20

Tabla 8. Degradación anaeróbica de muestras elaboradas con PBCA de 2 mm

Muestra	Peso inicial (g)	Peso final secado a 105 °C 1h (g)	Disminución (g)	Degradación %
1	21,40	12,30	9,10	42,52
2	23,67	16,00	7,67	32,40
3	12,32	8,89	3,43	27,84
			Promedio	34,25

La condición anaeróbica, favorece la degradación de las muestras (34,25 %) con respecto a la degradación aeróbica (9,20 %). Valores coherentes con el mecanismo natural, que transforma la materia lignocelulósica, en compuestos amigables con el entorno y microcompuestos que no afecten el ambiente Norma ISO 17088 (2021), esta norma certifica que un material de biomasa vegetal, como el bagazo de caña es compostable y biodegradable sin dejar residuos tóxicos.

CONCLUSIÓN

Los materiales sustentables termoprensados de partículas de bagazo de caña de azúcar, obtenidos sin aditivos químicos, cuyas características y propiedades, compiten con las propiedades de las maderas comerciales prensadas con resinas tóxicas, además de sus valores de densidad, resistencia al peso, dureza, exposición drástica a la humedad. Referentes que propician bases para continuar investigando, sobre las propiedades y aplicación del residuo lignocelulósico de la industria azucarera nacional, que generen empresas, empleos, bienestar social y la disminución de la dependencia sobre materiales importados.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo de Decanato de Investigación y a los investigadores de los laboratorios de la UNET, citados por el apoyo técnico a la investigación.

REFERENCIAS

Arias, Q., Lopéz, R., Saing, L. R., Vendería, M. V. Y Eichler, B. (2021). Potencial fertilizante de cenizas de bagazo de caña de azúcar de industrias azucareras. *Revista Cubana de Química,* 33(3), 452-466. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-54212021000300452

Bhat, S., Singh, J. y Vig, A. (2016). Gestión de residuos industriales del azúcar mediante la vermitecnología. *International Letters of Natural Sciences*. https://doi.org/10.56431/p-jh3zmh. 55: 35–43

Cabrera, E., León, V., Montano, A.D.L.C Y Dopico, D. (2016). Caracterización de residuos agroindustriales con vista a su aprovechamiento. *Centro Azúcar*. 43(4), 27-35. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612016000400003

Carvajal, O., Martínez, M. (2000). Capítulo 3. Tableros de fibra de bagazo. En ICIDCA (Ed.), *Manual de los derivados de la caña de azúcar*. (3.ª ed., pp. 141). Instituto Cubano de Investigaciones de los derivados de caña de azúcar. https://www.academia.edu/10912163/MANUAL_DE_LOS_DERIVADOS_DE_LA_CA%C3%91A

Carvajal, O., Rodríguez L. (2000). Capítulo 3. Tableros de fibra de densidad media (MDF). En ICIDCA (Ed.), *Manual de los derivados de caña de azúcar*. (3.ª ed., pp. 149-151). Instituto Cubano de Investigaciones de los derivados de caña de azúcar. https://www.academia.edu/10912163/MANUAL_DE_LOS_DERIVADOS_DE_LA_CA%C3%91A

Castillo, M., Guzmán, M., Aberilla, J. (2023). Environmental Sustainability assessment of banana waste utilization into food packaging and liquid fertilizer. *Elsevier*, 37, 356-368. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352550923000568

Chandini, R. K., Kumar, R., Om, P. (2019). The Impact of Chemical Fertilizers on our Environment and Ecosystem. *Research Trends in Environmental Sciences*. (2nd ed., pp. 71–86). https://www.researchgate.net/publication/331132826

Clauser, N., Gutiérrez, S., Área, M., Felissia, F. y Vallejos, M. (2016). Biorrefinerías de tamaño reducido como estrategia para añadir valor al bagazo de caña de azúcar. *Chemical Engineering Research and Design* 107, 137–146. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.050

Fesoca: molienda de caña de azúcar de 2025 superará en 9,63% la del año pasado - Banca y Negocios. *Banca y Negocios*.
https://www.bancaynegocios.com/fesoca-molienda-de-cana-de-azucar-de-2025-superara-en-9punto63-porciento-la-del-ano-pasado/

Grijalba, V N. (2013). Biodegradación de residuos vegetales mediante la inoculación con cepas microbianas. *Enfoque UTE*, 4(1), 1-13. https://www.redalyc.org/pdf/5722/572260838001.pdf

Gutiérrez, B. N., Gómez, M., Valencia, S., Cornejo, E. H.; Prieto, J. A., Gutiérrez, M. H. (2010). Variación de la densidad de la madera en poblaciones naturales de *Pinus Oocarpa* Schiede ex Schltdl. del estado de Chiapas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(4): 75-78.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802010000500015

Hermawan, A., Ohuchi, T., Fugimoto, N., Murase, Y. (2009). Manufacture of composite boards using wood prunings and waste porcelain stone. *Journal of Wood Science*, 55(1): 74-79. https://www.researchgate.net/publication/225378803_Manufacture_of_composite_board_using_wood_prunings_and_waste_porcelain_stone

Hiranobe, C., Gomes, A., Paiva, F., Tolosa, G., Paim, L., Dognani, G., Cardim, G., Cardim, H., dos Santos, R. y Cabrera, F. (2024). Sugarcane Bagasse: Challenges and Opportunities for Waste Recycling. *Clean Technol*. 2024, 6(2):662–699. https://doi.org/10.3390/cleantechnol6020035

Leal, L. E., Juárez, V., Terán, M. (2011). Composición química de la madera de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden procedente de finca Las Maravillas, Departamento de Orán, Salta. *Quebrancho – Revista de Ciencias Forestales*, 19(1,2), 75-83.
https://www.redalyc.org/pdf/481/481222070008.pdf

Maceda, A., Soto, M., Peña, C.B. (2021). Liqnina: composición, síntesis y evolución. *Madera y Bosques* 27(2), 1-16. https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137.

Mann, A. (2016). Cogeneration of sugarcane bagasse for renewable energy production. In Sugarcane-Based Biofuels and Bioproducts (eds I.M. O'Hara and S.G. Mundree). https://doi.org/10.1002/9781118719862.ch9.

Moreno, A., Morsali, M., Sipponer, M. (2021). Catalyst-Free Synthesis of lignin vitrimers with tunable mechanical properties: Circular Polymers and Recoverable Adhesives. ACS Appl. Mater Interfaces 13: 57952-57961.

https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.1c17412.

Morsali, M. (2021). Nuevo material a base de lignina para sustituir a los plásticos y adhesivos fósiles. *Química.es*. https://www.quimica.es/noticias/1173694/nuevo-material-a-base-de-lignina-para-sustituir-a-los-plasticos-y-adhesivos-fosiles.html.

Mubarak, A., Ilyas, R., Nordin, A., Ngadi, N. y Alkbir, M. (2024). Recent developments in sugarcane bagasse fibre-based adsorbent and their potential industrial applications: A review. *Int. J. Biol. Macromol.* 277, 134-65. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134165

Murphy, R. (2017). Sugarcane Production Systems, Uses and economic importance. Nova Publisher. New York, USA. https://www.econbiz.de/Record/sugarcane-production-systems-uses-and-economic-importance-murphy-rachel/10011616360?sid=1549821590

Norma ASTMD, 1037 Método de ensayo estándar para evaluar las propiedades de los materiales de paneles de fibra y partículas a base de madera. https://www.intertek.com/building/standards/astm-d1037/

Norma COVENIN 847-91 Tableros aglomerados tableros aglomerados tableros aglomerados de partículas de caña brava de partículas de caña brava (*Gynerium sagittatum*) y adhesivo urea–formaldehído. https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_68_19267.pdf

Norma EN 15935:2021. Suelo, residuos, biorresiduos tratados y lodos: determinación de la pérdida por ignición. https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/04a0cbb3-843f-466a-bb39-39217af45d51/en-15935-2021?srsltid=AfmBOor9OqiflYhvET21TirP5GQVB4NQxZfBtyKUXHuvLArBZz19C6lH

Norma ISO 1871:2009. Productos alimenticios y piensos: directrices generales para la determinación de nitrógeno mediante el método Kjeldahl. https://www.iso.org/standard/41320.html

Norma ISO 14526-3:1999. Plásticos — Compuestos de moldeo en polvo fenólico (PF-PMC) — Parte 3: Requisitos para compuestos de moldeo seleccionados. https://www.iso.org/standard/24611.html

Norma ISO 17088:2021. Plásticos — Reciclaje orgánico — Especificaciones para plásticos compostables.https://www.iso.org/standard/74994.html

Norma ISO 6506-1:2014. Materiales metálicos: prueba de dureza Brinell. Parte 1: Método de prueba.https://www.iso.org/standard/59671.html ISO 18265:2013

Normas ISO 18265:2013. Materiales metálicos: conversión de valores de dureza. https://www.iso.org/standard/53810.html

Norma TAPPI T222 om-02(2016). Lignina insoluble en ácido en madera y pulpa. https://es.scribd.com/document/564723861/T222-en-es

Reinosa, M., Canciano, J., Hernández, A., Ordoñez, Y. y Figueroa, I. (2018). Huella de carbono en la industria azucarera. Caso de estudio, *Tecnología Química*. 38(2), 516-526. https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/3808/3324

Resano, D., Guillen, O. W., Ubillús, F. D. R. y Barranzuela, J. L. (2022). Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción. *Información Tecnológica* 33 (2), 247-258. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642022000200247

Salatein, N., Rana, A., Fahim, I (2024). Sustainable utilization of sugarcane bagasse for wood-based panels: A promising approach for waste management in Egypt. *Journal of Engineering Research*. 14(1), 1-10. https://www.researchgate.net/publication/380910099_Sustainable_utilization_of_sugarcane_bagasse_for_wood-based_panels_A_promising_approach_for_waste_management_in_Egypt.

Sánchez, C. (2008). Lignocelulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnology Advances*, 27(2), 185-194. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19100826/

Sun, X., F. Sun., J. Tomkinson. (2003). Hemicelluloses and Their Derivatives. Gatenholm, P. y Tenkanen, M. (Ed.), Hemicelluloses: Science and Technology: 2-22. ACS Symposium Series; American

Chemical Society. https://pubs.acs.org/isbn/9780841238428.

Toscano, L., Ayala, A. G., Montero, G., Cervantes, L., Torres, R.; Romero, E., Amado, M. G., García, A. (2015). Determinación simplificada del contenido de lignina en paja de trigo por método volumétrico y su caracterización química. *Ciencia y Tecnología*, (15), 113-124. https://www.palermo.edu/ingenieria/pdf2015/15/CyT_15_08.pdf

Triana, O., León, T. S., Céspedes, M. I., Cámara, A. (2014). Caracterización de los residuos de la cosecha de la caña de azúcar almacenados a granel. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*, 48(1), 65-70. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223131337010

Ungureanu, N., Vlâdut, V.; Biris, S. (2022). Sustainable Valorization of Waste and By-Products from Sugarcane Processing. *Sustainability*, 14(17),11089. https://doi.org/10.3390/su141711089.



NELIDA GONZÁLEZ. Lic. Química UCV, MSc Química IVIC, Profesora Titular Emeritus LUZ, Profesora Honoris UNET. Publicaciones nacionales e Internacionales en productos naturales, aceites esenciales, prácticas agronómicas en plantas aromáticas, plaguicidas en vegetales y suelos y utilización de desechos cítricos.



CARMEN ARAQUE. Ingeniero Agroalimentario. T.S.U en Tecnología de Alimentos. Asistente del Laboratorio de Fitoquímica. Coautora Publicaciones nacionales en aceites esenciales y plaguicidas. Facilitadora de talleres sobre aceites esenciales.



JENNIFER VASQUEZ. T.S.U en Tecnológica de Alimentos IUTAIRLA. Esp. Técnico en Tecnología de Alimentos UNET. T.S.U en Informática IUFRONT. Asistente de Laboratorio de Fitoquímica UNET. Publicaciones Nacionales e Internacionales en aceites esenciales y plaguicidas. Participación en congresos y facilitadora en Talleres sobre aceites esenciales.



ANGÉLICA ARIAS. Ing. Químico Universidad de Los Andes. Magister en Docencia Virtual UNET. Profesor categoría agregado. Investigadora del Laboratorio de Fitoquímica. Coordinación de Ciencias Exactas de UNET. Actual Responsable del Laboratorio de Fitoquímica.



YVAN CARRERO. Ing. Mecánico UNET, Msc Comportamiento de Materiales Universidad de Málaga. Profesor Asociado UNET Ciencia de los Materiales, Procesos Metalmecanicos, Calderas. Miembro del grupo de investigación en Caña de Azúcar con fines paneleros.



LUIS BAUTISTA. Ing. Agr. UNET, MSc Agronomía UCV, Dr. Ciencias Agrícola UCV. Profesor titular UNET Microbiología Agrícola, Fitopatología, Protección Vegetal. Responsable del Laboratorio Control Microbiológico.



AMÉRICA QUINTERO. Ingeniero Químico UCV, Doctora Ingeniero Industrial Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid. Profesora titular jubilada UNET. Responsable del Laboratorio de Fitoquímica (2024 - 2026). Publicaciones nacionales e internacionales en aceites esenciales y plaguicidas en vegetales.



MARÍA VALERO. Ingeniera Química (USB-2001). Profesora Agregado UNET, adscrita al Departamento de Química. Responsable y corresponsable de proyectos de investigación en el área de aceites esenciales y plaguicidas. Investigadora del Laboratorio de Fitoquímica en la Coordinación de Ciencias Exactas y Naturales del Decanato de Investigación.