

## ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN LA REGIÓN SURESTE DE MÉXICO Y SU VALORIZACIÓN

Estimation of the potential of agro-industrial waste in the southeast region of Mexico and its valorization

Iván Yecid FORERO-SANDOVAL, Gonzalo CANCHÉ-ESCAMILLA\*  
y Santiago DUARTE-ARANDA

Centro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43 núm. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, 97205 Mérida, Yucatán, México.

\*Autor para correspondencia: [gcanche@cicy.mx](mailto:gcanche@cicy.mx)

*(Recibido: julio de 2025; aceptado: diciembre de 2025)*

Palabras clave: biomasa residual, economía local, sostenibilidad ambiental, economía circular, biomasa lignocelulósica.

### RESUMEN

Los residuos sólidos agroindustriales son materiales lignocelulósicos que incluyen restos de cultivos, tallos, cáscaras y otros subproductos, los cuales se generan tanto en las actividades agrícolas como en el aprovechamiento de los cultivos en las agroindustrias. La eliminación inadecuada de estos residuos plantea graves problemas ambientales, afecta negativamente los ecosistemas y genera riesgos para la salud humana. En este estudio se estima el potencial de los residuos agroindustriales en la región sureste de México y se presentan ejemplos de su uso para la obtención de productos de valor agregado. Se analizaron datos de producción agrícola entre 2010 y 2021 por estado y para la región en general, obtenidos del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México (SAGARPA). La cantidad de residuos se calculó utilizando cocientes de producción-residuos reportados en la literatura para los principales cultivos de la región: henequén, coco, arroz, cítricos, palma aceitera, plátano, maíz-sorgo y caña de azúcar, abarcando el periodo 2010-2021. De los ocho cultivos presentados, la caña de azúcar y el plátano generan la mayor cantidad de residuos, con alrededor de 2500 kt cada uno. Finalmente, a partir de la composición química y estructura de estos residuos, se revisaron diversos productos que pueden obtenerse, tales como materiales compuestos y biocombustibles, entre otros.

Key words: residual biomass, local economy, environmental sustainability, circular economy, lignocellulosic biomass.

### ABSTRACT

Agro-industrial solid waste comprises lignocellulosic materials, including crop residues, stalks, husks and other by-products. It is generated in both agricultural and agro-industrial contexts. The improper disposal of these wastes has significant environmental consequences, negatively impacting ecosystems and posing potential risks to human health. This study estimates the potential of agro-industrial residues in the southeast

region of Mexico and presents examples of their use in the production of value-added products. The data on agricultural production between 2010 and 2021, by state and for the region as a whole, obtained from the Agri-Food and Fisheries Information and Statistics Service (SIACON, for its Spanish acronym), were subjected to analysis. The quantity of residues was calculated using production-residue ratios documented in the literature, with a particular focus on the principal crops cultivated in the region: sisal, coconut, rice, citrus, oil palm, banana, maize-sorghum, and sugar cane, spanning the period from 2010 to 2021. Of the eight crops presented, sugar cane and banana generate the highest amount of waste, with approximately 2500 kt each. Finally, based on the chemical composition and structure of these residues, various products that can be obtained, such as composite materials and biofuels, among others, were reviewed.

## INTRODUCCIÓN

La producción agrícola es una de las actividades económicas más importantes en la región sureste de México, la cual abarca los estados de Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán. Esta región se caracteriza por su diversidad climática y geográfica, lo que permite el cultivo de una amplia variedad de productos agrícolas que contribuyen significativamente a la economía local y nacional. En general, en términos de producción agrícola, se destacan los cultivos de caña de azúcar, granos, plátano, cítricos, palma de coco y hortalizas. Resultado de las actividades agrícolas y las involucradas en la producción de los diversos productos agrícolas, se genera una gran cantidad de residuos sólidos en forma de tallos, hojas, cogollos, cáscaras, bagazos etc., los cuales quedan en los campos de cultivo o se depositan en zonas cercanas a las agroindustrias. El manejo y disposición inadecuada de estos residuos están asociados a problemas de salubridad y medioambientales (Prasad et al. 2023, Ufitikirezi et al. 2024). La acumulación de estos residuos en tiraderos es fuente de generación de fauna nociva y de lixiviados que pueden contaminar mantos freáticos, así como de producción de metano debido a la degradación anaeróbica de los compuestos orgánicos, con su impacto como gas de efecto invernadero (Awogbemi y Kallon 2022, Muñoz et al. 2022). Por otro lado, prácticas tradicionales como la quema de residuos agrícolas generan contaminantes a la atmósfera e inciden en el cambio climático (Lemieux et al. 2004, Gupta 2019). Un aspecto relevante en el estudio de la producción agrícola es la generación de residuos lignocelulósicos, que pueden constituir una valiosa fuente de materia prima para diversas aplicaciones industriales. La estimación del potencial de residuos de los cultivos más importantes permite evaluar la viabilidad de proyectos de aprovechamiento de estos residuos y de esta forma

contribuir a la sostenibilidad y diversificación de la economía rural (Forero-Sandoval et al. 2023)

La generación y cantidad de residuos agrícolas que se producen en la obtención de los productos agrícolas están directamente relacionadas con el tipo de cultivo, la parte de la planta utilizada y el nivel de aprovechamiento industrial en las distintas regiones productoras. En la producción de azúcar a partir de caña de azúcar, se estima que los residuos agrícolas compuestos por hojas secas, hojas verdes y cogollo representan el 28 % del peso de la planta y la caña procesable el 72 % restante; de esta última se obtiene como residuo el bagazo de caña que representa aproximadamente el 26-29 % del peso de la caña procesada (León et al. 2013). Con base en estos datos, la relación residuo/producción de caña se estima en 1:2. Para el caso de los cultivos de plátano, la relación entre residuo y producción es de 4:1, donde el pseudotallo, las hojas y el raquis representan el 80 % del peso de la planta (Kumar et al. 2013a). El pseudotallo y las hojas permanecen en el área de cultivo tras la cosecha, mientras que el raquis se genera como residuo durante las operaciones de empaquetado de los manojos de plátano en las plantas de procesamiento.

Por otro lado, la estructura de la pared secundaria de las plantas se puede considerar como un material compuesto natural, en el que las microfibrillas de celulosa están embebidas en una matriz de lignina y hemicelulosa (componentes principales de los residuos vegetales), por lo que también se conocen como materiales lignocelulósicos (Soni et al. 2019, Awogbemi y Kallon 2022). Así, a partir de los residuos lignocelulósicos se pueden obtener fibras lignocelulósicas, celulosa y nanocelulosa, así como lignina, hemicelulosa y otros compuestos, incluidos los metabolitos secundarios. Se ha reportado que estos materiales pueden utilizarse para la producción de energía, materiales compuestos y productos químicos, entre otros, con aplicaciones en diferentes

industrias (Soni et al. 2019, Amran et al. 2021, Okolie et al. 2021, Borrero-López et al. 2022).

En este artículo se presenta un análisis de la producción agrícola en la región sureste de México, a partir de los datos más recientes disponibles, con el fin de elaborar un inventario técnico del potencial de generación de residuos lignocelulósicos y explorar sus posibles aplicaciones de valorización. Se describe la producción por estado, se analiza la distribución de los cultivos principales y se estima el volumen de residuos agrícolas generados mediante coeficientes residuo/producto obtenidos de la literatura. Si bien existen estudios aislados sobre residuos agroindustriales a nivel nacional o por cultivo específico, no se encontraron investigaciones actualizadas y comparativas que integren estimaciones de generación, caracterización composicional y rutas de valorización específicas para esta región. Esta brecha limita el diseño de estrategias tecnológicas y de política pública adaptadas al contexto del sureste mexicano. Por tanto, el presente estudio ofrece una visión integral basada en datos técnicos que combina el volumen disponible, la composición de residuos y el potencial de valorización, con el propósito de aportar insumos para iniciativas de economía circular y de desarrollo sostenible en el ámbito agroindustrial regional.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio del potencial de residuos lignocelulósicos en la región sureste se utilizaron las bases de datos agrícolas del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON 2025). Se consideró la información de producción agrícola desde 2010 hasta 2021. Los datos de producción agrícola y de superficie sembrada fueron recopilados, depurados y procesados, incluyendo tareas de limpieza, agrupamiento por cultivo e incorporación de información geográfica complementaria.

Para simplificar el análisis, se reunieron en tres grupos aquellos cultivos con características similares: hortalizas, granos y cítricos. En hortalizas se agruparon los siguientes cultivos: berenjena, ejote, rábano, elote, okra, col, lechuga, cilantro, chile seco, chayote, calabaza, chile verde, calabacita, pepino, tomate rojo, jícama, calabaza semilla, camote, pimienta y tomate verde. En granos: maíz en grano, arroz, frijol, sorgo en grano, soya y frijol pelón. En cítricos: lima, mandarina, naranja, toronja y limón. El cultivo de pastos y praderas no se incluyó en este estudio, dado que la producción de residuos agrícolas suele reportarse como cero (IPTS 2015).

Con base en la información recolectada de las bases de datos agrícolas del SIACON (2025), se seleccionaron los cultivos que aportan la mayor contribución a la producción agrícola de la región o que, por su importancia socioeconómica, son susceptibles de incrementar su producción a corto plazo. Entre ellos se incluyen henequén (cultivo de importancia en Yucatán), coco (representativo de las zonas costeras), arroz, cítricos, palma aceitera, plátano, maíz-sorgo y caña de azúcar, que destacan por su amplia superficie cultivada y alto volumen de producción.

Posteriormente, se aplicaron coeficientes residuo/producto (R/P) obtenidos de la literatura científica—relacionados con la generación de residuos lignocelulósicos— para estimar el potencial de residuos generados por tipo de cultivo, como se muestra en el **cuadro I**. Es importante señalar que el uso de factores R/P no calibrados localmente introduce cierto grado de incertidumbre, ya que la proporción residuo/producto puede variar según el cultivar, las condiciones climáticas y las prácticas agrícolas. Para posibles aplicaciones, se revisó la literatura para que, con base en la composición química, la estructura y la facilidad de obtención, se presentaran propuestas implementables para la valorización de los residuos seleccionados.

**CUADRO. I.** FACTORES DE RESIDUO/PRODUCCIÓN PARA LOS PRINCIPALES CULTIVOS DE LA REGIÓN.

Cultivo	Residuos	Producto agrícola	Factor residuo/producción
Caña de azúcar	Cogollo, hojas secas y verdes, y bagazo	Tallos de caña de azúcar	0.52 (León et al. 2013)
Plátano	Pseudotallo, hojas y raquis	Fruto	4.00 (Kumar et al. 2013b)
Maíz-sorgo	Tallos y paja	Grano	0.53 (Macedo 2000)
Cítricos	Cascaras, semillas y pulpa	Fruto	0.55 (Marín et al. 2007)
Palma aceitera	Racimo de Fruta Vacío	Aceite de palma	0.42 (Santos 2007)
Arroz	Tallo, cascarilla	Grano	1.45 (Kumar et al. 2015)
Palma de coco	Cáscara (mesocarpio) y nuez (endocarpio)	Fruto coco	0.56 (Arrieta 2019)
Henequén	Bagazo	Fibra	2.33 (López et al. 2005)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

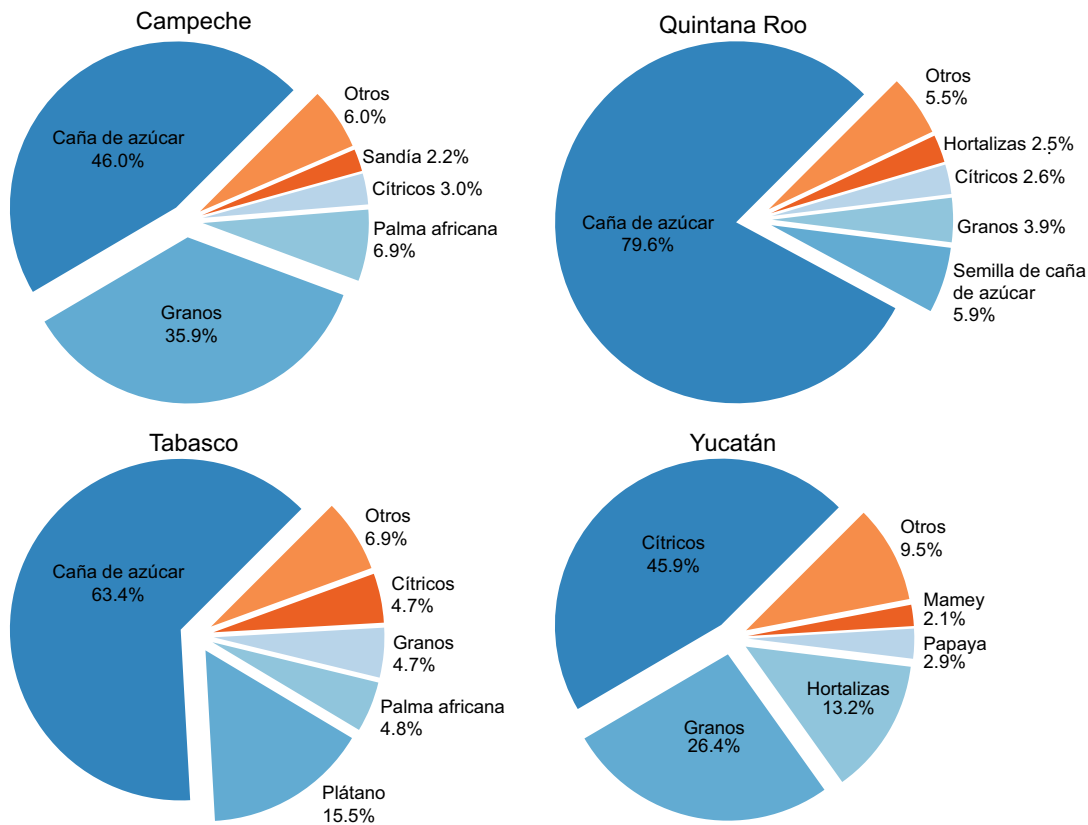
### Producción agrícola

El SIACON reporta 36 tipos de cultivos para el estado de Campeche, 25 para Quintana Roo, 44 para Tabasco y 53 para Yucatán, lo que refleja la notable diversidad agrícola de la región sureste. La **figura 1** muestra la producción agrícola promedio de los cuatro estados, estimada a partir de los cinco registros anuales más recientes disponibles hasta 2021. La producción agrícola total alcanzó 8375 kt, distribuida en 2010 kt para Campeche, 3889 kt para Tabasco, 559 kt para Yucatán y 1929 kt para Quintana Roo. Estos valores indican que Tabasco concentra cerca del 46 % de la producción regional, seguido por Campeche (24 %), Quintana Roo (23 %) y Yucatán (7 %).

Entre los cultivos principales, la caña de azúcar se posiciona como el producto más relevante en Tabasco, Quintana Roo y Campeche, con producciones promedio de 2465, 1536 y 924 kt, respectivamente.

Este cultivo constituye la base del sector agroindustrial regional. A nivel nacional, los mayores productores de caña de azúcar son Veracruz (21 279 kt) y Jalisco (7283 kt). En contraste, Yucatán muestra un patrón productivo distinto, orientado principalmente a los cítricos, con una producción promedio de 257 kt. A nivel nacional, los mayores productores de cítricos son Veracruz (2628 kt) y Tamaulipas (758 kt), en tanto que Yucatán ocupa el sexto lugar.

En cuanto a los cultivos secundarios, se observan diferencias significativas entre los estados del sureste. En Campeche predominan los granos, que representan el 35.9 % (722 kt) de la producción estatal, seguidos por la palma africana o de aceite (6.9 %, 139 kt) y los cítricos (3.0 %, 60 kt). Esta composición productiva refleja la coexistencia de sistemas tradicionales de cultivo de granos básicos con la expansión de cultivos industriales de alto valor. A nivel nacional, los granos registran su mayor producción en Sinaloa (6015 kt) y Jalisco (4156 kt), impulsados principalmente por el cultivo de maíz



**Fig. 1.** Producción agrícola por estado, para la región sureste de México (promedio de los cinco registros anuales más recientes disponibles hasta 2021). Los totales promedio de producción por estado son los siguientes: Campeche, 2010 kt; Tabasco, 3889 kt; Yucatán, 559 kt; y Quintana Roo, 1929 kt.

con sistemas de riego. En el caso de la palma africana o de aceite, la producción en Campeche supera ampliamente la registrada en otras regiones fuera del sureste, como Veracruz, que alcanzó solo 77 kt en 2021. Este contraste confirma la concentración regional del cultivo en el sureste mexicano, donde las condiciones climáticas cálidas y húmedas favorecen un mayor desarrollo del fruto y una alta eficiencia en la extracción de aceite.

En Tabasco, los cultivos secundarios más relevantes son el plátano, que aporta el 15.5 % (603 kt) de la producción total, la palma africana (4.8 %, 187 kt) y los granos (4.7 %, 183 kt). Este patrón refleja una economía agrícola diversificada, donde los cultivos frutales y oleaginosos complementan la fuerte presencia de la caña de azúcar. El plátano constituye un cultivo estratégico para el sureste, al ser una de las principales fuentes de ingresos agrícolas y de empleo rural. A nivel nacional, los mayores productores de plátano son Chiapas (670 kt), Tabasco (621 kt) y Veracruz (298 kt), que en conjunto concentran más del 75 % de la producción nacional. Con este volumen, Tabasco se ubica como el segundo productor nacional, favorecido por las condiciones tropicales y los suelos fértiles del estado. La cercanía geográfica entre Chiapas y Tabasco, junto con su conexión logística con los mercados del Golfo y del centro del país, consolida un corredor bananero de alta productividad. Adicionalmente, la expansión de la palma africana en Tabasco y Campeche posiciona al sureste como el núcleo de producción de aceite vegetal del país.

Por su parte, en Quintana Roo sobresale la semilla de caña de azúcar, con el 5.9 % (114 kt) de la producción estatal, cuya propagación vegetativa mediante tallos explica su peso relativo en el sistema agrícola local. También destacan los granos (3.9 %, 75 kt) y los cítricos (2.6 %, 50 kt), que complementan la producción agropecuaria del estado. A nivel nacional, los principales productores de semilla de caña de azúcar en 2021 fueron Veracruz (358 kt), Jalisco (171 kt) y Tamaulipas (151 kt), que concentraron aproximadamente el 60 % de la producción nacional. En este contexto, Quintana Roo ocupa el cuarto lugar nacional, con una contribución cercana al 18 %, lo que refuerza su papel estratégico en el suministro de material de plantación y en su integración en la cadena cañera del sur-sureste mexicano.

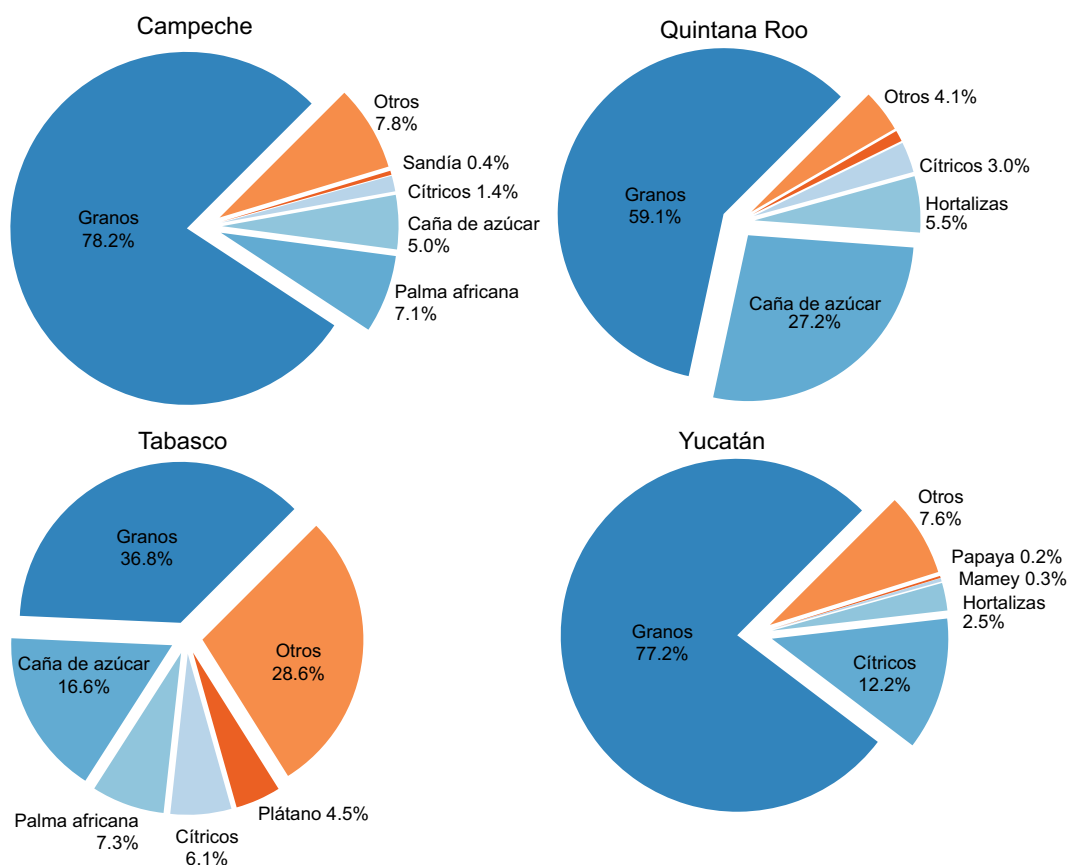
Finalmente, en Yucatán, los cultivos secundarios más importantes corresponden a los granos (26.4 %, 148 kt), seguidos de las hortalizas (13.2 %, 74 kt) y de la papaya (2.9 %, 16 kt). Esta estructura refleja un sistema agrícola más diversificado, orientado tanto

al autoconsumo como a mercados especializados de alto valor.

La **figura 2** muestra el porcentaje de la superficie sembrada en cada estado respecto del área total cultivada para los cinco cultivos de mayor producción. Se puede observar que los granos son los cultivos con mayor extensión en todos los estados de la región sureste, con 562 000 ha del total del área agrícola de la región, siendo el cultivo de maíz el que contribuye con mayor extensión, con 436 000 ha. Respecto a los cultivos de mayor producción con menor superficie, podemos observar que, para Campeche y Tabasco, los cultivos de caña de azúcar, palma africana y cítricos representan el 13.5 % (47 000 ha) y el 30 % (77 000 ha), respectivamente. Por otra parte, en Quintana Roo los cultivos de caña de azúcar, hortalizas y cítricos representan el 35.7 % (43 000 ha), mientras que en Yucatán los cultivos de cítricos y hortalizas representan el 14.7 % (20 000 ha). El total de superficie cultivada fue de 884 000 ha, distribuida de la siguiente manera: Campeche, 347 000 ha; Quintana Roo, 120 000 ha; Tabasco, 255 000 ha; y Yucatán, 162 000 ha.

Un parámetro adicional de interés es el rendimiento, que puede estimarse dividiendo la producción total entre la superficie cultivada (t/ha). En Campeche, Quintana Roo y Tabasco, los dos cultivos de mayor producción —los granos y la caña de azúcar— presentan características contrastantes. Los granos, a pesar de ser los más producidos en términos de volumen, exhiben los rendimientos más bajos entre los cinco principales cultivos, con valores que fluctúan entre 1 y 2.6 t/ha. En contraste, estados del norte y occidente, como Sinaloa (9.1 t/ha) y Jalisco (8.4 t/ha), alcanzan productividades tres a cuatro veces mayores gracias al uso de sistemas de riego presurizado, la mecanización y las variedades híbridas. Este contraste evidencia la brecha tecnológica entre las regiones productoras del país.

Por su parte, la caña de azúcar muestra rendimientos notablemente superiores, entre 47 y 58 t/ha en Campeche, Tabasco y Quintana Roo, muy cercanos a los obtenidos en Veracruz (60 t/ha) y Jalisco (63 t/ha), que lideran la producción nacional. Además, otros cultivos destacan por su alto rendimiento: la caña de azúcar destinada a semilla, utilizada para su propagación vegetativa mediante tallos, alcanza un rendimiento de 87 t/ha. En comparación, el plátano también exhibe altos rendimientos, con promedios de 52 t/ha en Tabasco, 55 t/ha en Chiapas y 43 t/ha en Veracruz. En cuanto a los cítricos, los rendimientos se sitúan entre 12 y 14 t/ha en Yucatán, Campeche y Quintana Roo, ligeramente por debajo de los obtenidos en Veracruz (16 t/ha) y Tamaulipas (15 t/ha).



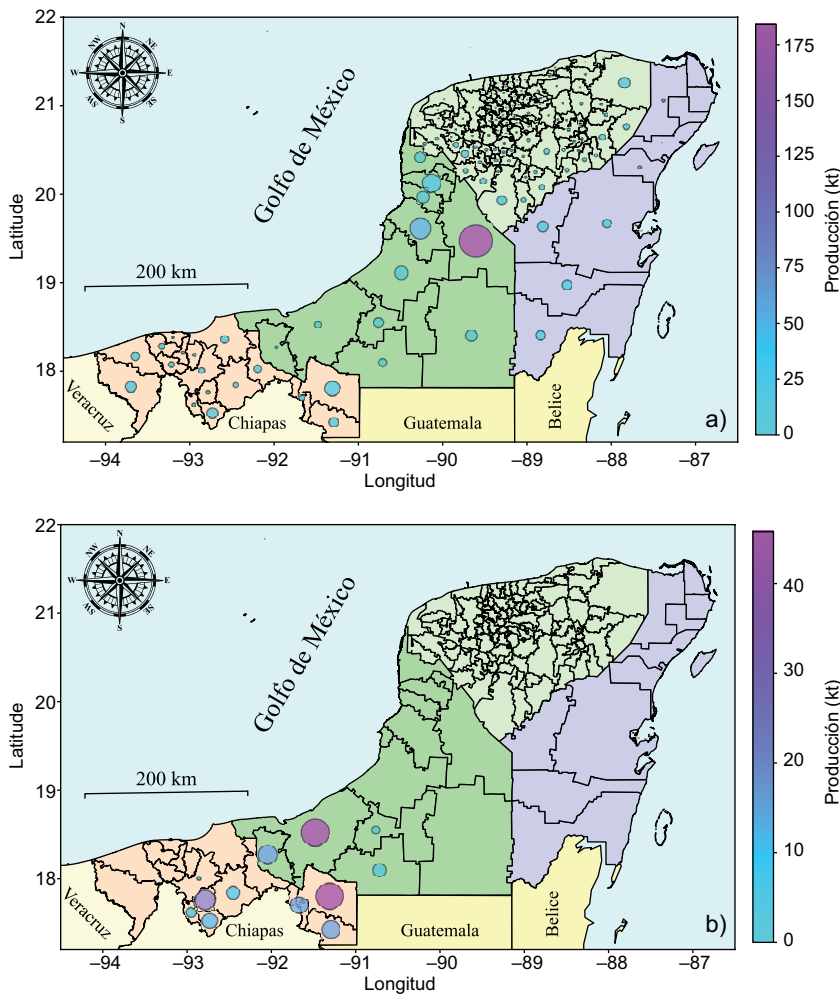
**Fig. 2.** Superficie sembrada de los cinco cultivos de mayor producción por estado en la región sureste de México. Los valores promedio de superficie sembrada por estado son los siguientes: Campeche, 347 000 ha; Tabasco, 255 000 ha; Yucatán, 162 000 ha; y Quintana Roo, 120 000 ha.

### Distribución y temporalidad de la producción agrícola

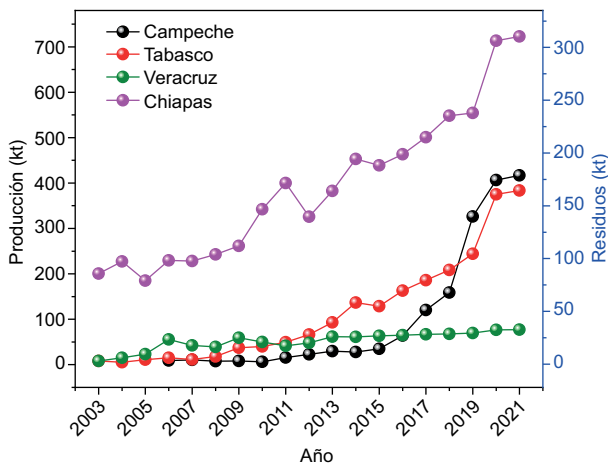
De los cultivos estudiados, algunos se cultivan en la mayoría de los municipios de la región sureste, como el maíz (**Fig. 3a**), que se cultiva en 144 de 147 municipios (98 %) de esta región, siendo Hopelchén el municipio con mayor producción, con un promedio anual de 184 kt. Por otro lado, hay cultivos que, debido a sus características y requerimientos, se siembran en pocos municipios, como es el caso de la palma aceitera (**Fig. 3b**), que se cultiva en 12 municipios de los estados de Campeche y Tabasco. En este caso, los dos municipios con mayor producción anual son Carmen (Campeche) y Balancán (Tabasco) con 45 y 43 kt, respectivamente. En la **figura 3**, tanto el tamaño como el color de los marcadores indican el valor de la producción en cada municipio. Estas características de la distribución son importantes para la revalorización, ya que la distribución geográfica de los residuos afecta la logística de recolección, transporte y procesamiento. Una distribución

concentrada facilita la recolección eficiente y reduce los costos de transporte, mientras que una distribución dispersa puede incrementar dichos costos y complicar la logística. Además, una alta producción en una región pequeña permite procesar a mayor escala, lo cual está garantizado por un flujo constante de residuos agrícolas.

Otro aspecto importante es la evolución temporal de la producción agrícola, que es directamente proporcional a la producción de residuos. Tomando como referencia 2010 y el último año reportado (2021), los cultivos con mayor crecimiento en producción fueron la palma africana o de aceite y el coco fruta. En el caso de la palma africana o de aceite, los incrementos más notables entre 2010 y 2021 se registraron en Campeche, cuya producción pasó de 6 a 417 kt (+6555.70 %), seguida de Tabasco (40 a 384 kt, +856.77 %) y Chiapas (342 a 723 kt, +111.28 %). Fuera de la región, en Veracruz la producción aumentó de 50 a 77 kt (+55.25 %; **Fig. 4**). Cabe destacar que estos cuatro estados —Chiapas,



**Fig. 3.** Distribución de la producción agrícola en la región sureste. Se muestran dos cultivos: a) maíz, con distribución en la mayoría de los municipios, y b) palma de aceite, con distribución menor en el sureste de México.



**Fig. 4.** Evolución temporal de la producción y de los residuos de 2003 a 2021 del cultivo de palma de aceite.

Tabasco, Campeche y Veracruz— son los únicos del país donde se reporta la producción de palma africana o de aceite, lo que evidencia su carácter regional y la concentración productiva en el sureste mexicano, donde las condiciones climáticas cálidas y húmedas, junto con la infraestructura agroindustrial disponible, favorecen su desarrollo.

Por su parte, el coco fruta mostró un crecimiento significativo en varios estados del país, destacando tanto dentro como fuera de la región de estudio. En el sureste mexicano, Quintana Roo presentó el incremento más pronunciado, al pasar de 3.9 a 34.7 kt (+795.24 %), mientras que en Yucatán el aumento fue más moderado, de 10.2 a 14.6 kt (+43.31 %), lo que refleja un comportamiento más estable del cultivo. Fuera de la región, los estados de Sinaloa (5.9 a 39.7 kt; +567.55 %), Jalisco (22.9 a 64.2 kt; +180.98 %) y

Nayarit (7.0 a 13.3 kt; +90.52 %) también registraron incrementos importantes. Estas entidades, ubicadas en la vertiente del Pacífico mexicano, se incluyen únicamente como referencia comparativa, ya que representan las principales zonas productoras de coco fuera del sureste. En conjunto, los resultados reflejan una expansión nacional del cultivo, impulsada por la rehabilitación de plantaciones tradicionales y la creciente demanda de productos derivados del coco tanto en el mercado nacional como en el internacional.

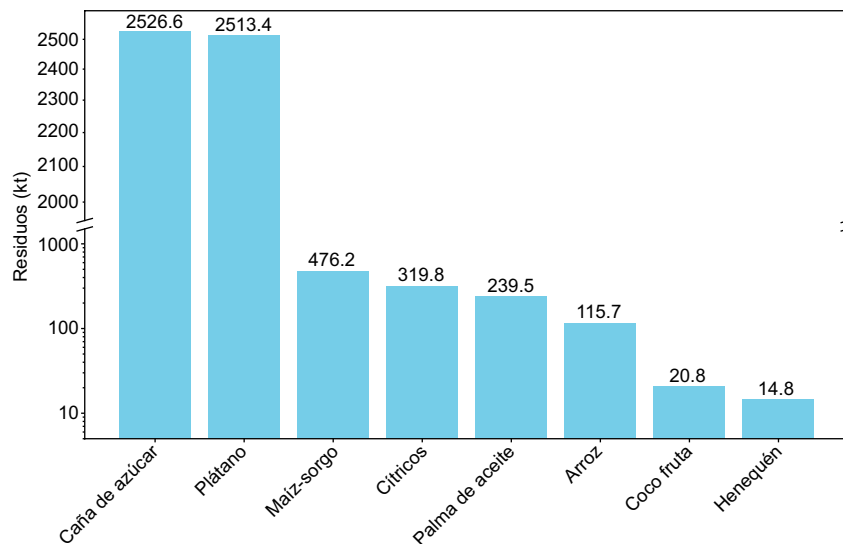
### Estimación del potencial de residuos

Con base en los rendimientos por hectárea, la distribución y la temporalidad de los cultivos en la región, así como la importancia económica en el estado, se seleccionaron los cultivos de caña de azúcar, plátano, maíz, cítricos, palma aceitera, arroz, coco y henequén para la estimación del potencial de residuos. Se usaron los datos de la producción (**Fig. 1**) y la cantidad de residuos generados con base en los índices de producción-residuo reportados en la literatura (estos índices se conocen como *residuo-product ratio*), presentados en el **cuadro I**. Con base en los datos del Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos (SEMARNAT, 2020), la generación total de biomasa residual agrícola a nivel nacional fue de aproximadamente 52 102 kt en 2012. Esta cifra incluye tanto cultivos perennes como temporales y representa una estimación integral del potencial residual de agroproductividad en México.

De acuerdo con los datos disponibles, la región sureste contribuyó con una fracción relativamente menor del total nacional, al generar aproximadamente 1107 kt, lo que equivale al 2.1 % del volumen total del país. Aunque no existen estudios actualizados sobre la participación actual de esta región en el total nacional, a nivel regional se observa que el total de residuos estimado para los cultivos presentados en la **figura 5** rebasa el valor reportado para 2012, lo que sugiere un aumento en la generación de biomasa en los últimos años.

En este sentido, la **figura 5** muestra que la caña de azúcar y el plátano son los cultivos que producen la mayor cantidad de residuos, con alrededor de 2500 kt cada uno, lo que representa el 81 % del total generado por los cultivos seleccionados. En el caso de la caña de azúcar, la distribución por estado es la siguiente: Tabasco, 50.1 %; Quintana Roo, 31.2 %; y Campeche, 18.8 %. Respecto del plátano, el 97.9 % de los residuos proviene de Tabasco, seguido por Quintana Roo (1.5 %) y Yucatán (0.3 %).

Por otra parte, los cultivos de maíz-sorgo, cítricos, palma de aceite y arroz generan residuos por un total estimado de 1151 kt, equivalentes al 18 % del total de los cultivos considerados. Para el maíz-sorgo, la generación se concentra en Campeche (60.1 %), seguida por Tabasco (18.6 %), Yucatán (13.6 %) y Quintana Roo (7.6 %). En cuanto a los cítricos, destaca Yucatán, con 46.7 %, seguido por Tabasco (33.0 %), Campeche (11.0 %) y Quintana Roo (9.3 %).



**Fig. 5.** Potencial de residuos anuales de los principales cultivos en la región sureste de México.

Respecto a la palma de aceite, Tabasco genera el 57.1 % y Campeche el 42.9 %. Para el arroz, Campeche representa el 86.5 % de los residuos y Tabasco el 13.5 %.

Finalmente, una contribución menor de residuos corresponde a los cultivos de coco fruta y henequén, que en conjunto producen alrededor de 36 kt. El coco fruta se concentra en Quintana Roo (70.4 %) y Yucatán (29.6 %), mientras que los residuos del proceso de desfibrado de henequén para la región sureste se producen exclusivamente en Yucatán, con 14.8 kt.

### Revalorización de residuos agroindustriales

Los residuos agrícolas y agroindustriales representan una fuente valiosa de materia prima para diversas aplicaciones, gracias a su composición química rica en polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa) y lignina. En términos generales, los residuos agrícolas contienen entre 35 y 50 % de celulosa, 20 y 35 % de hemicelulosa y 15 y 20 % de lignina (Awogbemi y Kallon 2022). Estos materiales pueden aprovecharse mediante diferentes tecnologías para la generación de energía, la obtención de biocombustibles, el desarrollo de materiales compuestos o la producción de derivados químicos (Saini et al. 2015, Ajala et al. 2021, Batista et al. 2022). Sin embargo, en la mayoría de los casos, es indispensable aplicar pretratamientos físicos, químicos o enzimáticos para mejorar su procesabilidad y la eficiencia en los procesos de transformación (Awogbemi y Kallon 2022, Batista et al. 2022).

Entre las aplicaciones energéticas, destacan la combustión directa en calderas y la producción de biocarbón mediante procesos de pirólisis (Sukiran et al. 2009, Canché-Escamilla et al. 2022). En las agroindustrias de caña de azúcar y de palma aceitera, se usan el bagazo de caña y la cáscara dura o cuesco, respectivamente, para satisfacer las demandas energéticas internas (García-Culqui et al. 2023, Jeguirim et al. 2023). Asimismo, debido al alto contenido de polisacáridos (celulosa y hemicelulosa), que varía desde el 40 % en la fibra de coco hasta valores cercanos al 100 % en el algodón, los residuos lignocelulósicos pueden usarse en la producción de biocombustibles líquidos. La caña de azúcar y el rastrojo de maíz se han usado en la producción de bioetanol y biobutanol, previa hidrólisis de los polisacáridos a azúcares simples y posterior fermentación (Kadam y McMillan 2003, Natalense y Zouain 2013). Otra ruta prometedora de aplicación de estos residuos lignocelulósicos es su uso, en su forma entera o en sus componentes estructurales, en el desarrollo de materiales. Los residuos pueden utilizarse, mediante

tratamientos de secado y molienda previos, en la obtención de tableros aglomerados o como refuerzo en materiales compuestos con matrices plásticas para la obtención de productos en la industria de la construcción y la automotriz, entre otras (Puerta et al. 2021, Baharuddin et al. 2023). También pueden usarse en matrices cementicias para la obtención de elementos de construcción, como bloques y ladrillos (Hernández-Olivares et al. 2020, Kiamahalleh et al. 2024). Además, la alta proporción de celulosa permite su extracción y uso en la fabricación de papel, empaques biodegradables, biotextiles o incluso materiales avanzados como nanocelulosa (Bolio-López et al. 2011, Kumar et al. 2013a, Chopra y Manikanika 2022, Jeetah y Jaffur 2022).

El **cuadro II** muestra la composición de diversos residuos agrícolas y agroindustriales de la región estudiada, así como ejemplos de productos potenciales. Esta información, junto con el volumen de residuos generados por cultivo, permite identificar oportunidades de valorización diferenciadas según la disponibilidad del recurso. Por ejemplo, la caña de azúcar y el plátano sobresalen por la elevada generación de residuos. Esta magnitud permite plantear procesos de valorización a escala industrial o regional, tales como la obtención de biocombustibles (bioetanol, biogás y biobutanol) (Vivekanand et al. 2014, Kannahí y Megala 2017, Narayanasamy et al. 2020) y de celulosa o de materiales compuestos, plásticos o cementicios (Cuebas et al. 2020, Hernández-Olivares et al. 2020, Kiamahalleh et al. 2024). En el caso del bagazo de caña, su composición (**Cuadro II**) muestra una proporción equilibrada de celulosa, hemicelulosa y lignina, ideal para aplicaciones térmicas, biocombustibles o producción de pulpas (Rabelo et al. 2011, Vivekanand et al. 2014, López-Velázquez et al. 2020, Narayanasamy et al. 2020, Monroy et al. 2024). El plátano, además de sus hojas (con 21 % de celulosa), cuenta con tallos ricos en celulosa (48 %) y hemicelulosa (21 %), lo que lo hace adecuado para la elaboración de papel, empaques biodegradables y fibras textiles no tejidas (Cuebas et al. 2020, Farhana et al. 2023, Ruangnarong et al. 2024).

El grupo intermedio en volumen —maíz-sorgo (476 kt), cítricos (320 kt), palma de aceite (239 kt) y arroz (116 kt)— puede aprovecharse para desarrollar proyectos regionales de menor escala o cooperativas. En estos casos, la viabilidad de las aplicaciones dependerá también de la proximidad a centros de acopio, apoyo institucional y mercados. Por ejemplo, las hojas de maíz presentan un contenido considerable de celulosa (32.1 %), por lo que resultan útiles para la elaboración de tableros ligeros o de materiales com-

**CUADRO II.** RESIDUOS AGRÍCOLAS Y AGROINDUSTRIALES, SU COMPOSICIÓN Y ALGUNOS PRODUCTOS QUE PUE-  
DEN OBTENERSE DE ELLOS.

Cultivo	Residuos	Composición química (%)			Producto/material
		Lignina	celulosa	hemicelulosa	
Caña de azúcar	Bagazo	~25.0	~38.0	~23.0	Bioetanol y biometano (biogás) (Rabelo et al. 2011); biobutanol (Narayanasamy et al. 2020); biometano (Vivekanand et al. 2014); celulosa y biocompuestos (Monroy et al. 2024); materiales cementicios (Hernández-Olivares et al. 2020, Kiamahalleh et al. 2024)
	Paja	14.1	45.1	25.6	Celulosa y microcelulosa (López-Velázquez et al. 2020)
Plátano	Pseudotallo				Carbón activado (Ab et al. 2016); fibras textiles (Farhana et al. 2023, Ruangnarong et al. 2024); bioetanol (Kannahi y Megala, 2017); alimento para ganado (Manju et al. 2015); biocompósitos (Cuebas et al. 2020)
	Hoja	24.3	20.7	8.6	Fertilizante para cultivos (Mannan et al. 2020)
	Raquis	~6.0	~35.3	~17.9	Lignina organosolv (Florian et al. 2019); celulosa (Canché-Escamilla et al. 2005); nanocelulosa (Bolio-López et al. 2011)
Maíz	Rastrojo	~12.0	~35.0	~20.0	Bioetanol (Saha et al. 2013); alimento para ganado (Zhang et al. 2022); biocompuestos (Guo et al. 2021, Lenhani et al. 2021); concreto asfáltico (Chen et al. 2019); compuestos cementicios (He et al. 2025)
	Hoja de maíz	15.0	44.1	—	Papel (Rahmayanti y Asma 2022); celulosa, películas biocompuestas (Lenhani et al. 2021)
	Olote	31.4	39.6	14.0	Películas biocompuestas (Gairola et al. 2022)
Cítricos	Cáscaras, semilla y pulpa	2-0	22	11.0	Aceites esenciales, pectinas, etanol, metano (Patsalou et al. 2019)
	Cáscaras	7.0	37.0	25.0	Fibra dietética soluble (Zhang et al. 2020); aceites esenciales (Yang y Park 2025); pectina, compuestos bioactivos (Zannini et al. 2025)
	Racimo vacío de frutas	22.0	38.0	35.0	Hidrógeno (Kelly-Yong et al. 2007); bioaceite, biocarbón y biogás (Sukiran et al. 2009);
Palma aceitera	Troncos	26.0	34.0	32.0	Biocarbón (Rusdi et al. 2020); butanol (Ezzatzadegan et al. 2021); bioetanol (Sitinjak et al. 2023); bioetanol y azúcar (Hossain y Jalil, 2017)
	Cáscara fibrosa	28.0	34.0	26.0	Materiales cementicios (Danso 2017); tableros aglomerados (Boonsombuti et al. 2023); materiales compuestos plásticos (Huisken et al. 2022); celulosa y nanocelulosa (Abu et al. 2022)
	Cuesco	50.7	20.8	22.7	Materiales cementicios (Nadh et al. 2021); materiales compuestos plásticos (Alfatah et al. 2022)

**CUADRO II.** RESIDUOS AGRÍCOLAS Y AGROINDUSTRIALES, SU COMPOSICIÓN Y ALGUNOS PRODUCTOS QUE PUEDEN OBTENERSE DE ELLOS.

Cultivo	Residuos	Composición química (%)			Producto/material
		Lignina	celulosa	hemicelulosa	
Arroz	Cáscara	26.0-25.0	26.0-35.0	18.0-21.0	Bioetanol (Chavan et al. 2024); abono orgánico (Thiyageshwari et al. 2018)
	Pecíolo	18.0	34.0	27.0	Papel (Forero-Sandoval et al. 2024)
Palma de coco	Mesocarpio (cáscara fibrosa)	40.0	24.0	12.0	Bioetanol (Santos et al. 2016); compuestos bioactivos (Singh et al. 2024)
	Endocarpio (cáscara dura)	32.0	31.0	31.0	Productos de pirólisis (Borel et al. 2021); compuestos fenólicos (Rodrigues y Pinto 2007)
Henequén	Tronco o piña	28.0	49.0 Celulosa + hemicelulosa		Bioetanol (Martínez-Torres et al. 2011); azúcares y productos alcohólicos (Rendón-Salcido et al. 2009); materiales compuestos plásticos (Balam-Cocom et al. 2006)
	Bagazo	11.1	80.7 Celulosa + hemicelulosa		Alimento para ganado (Gutiérrez et al. 2018, 2020); materiales compuestos (Can-Canul 2023, Forero-Sandoval et al. 2025)
	Tallo floral (varejón)	23	59 Celulosa + hemicelulosa		Bioaceite, biocarbón y biogás (Canché-Escamilla et al. 2022)

puestos de bajo costo (Guo et al. 2021, Lenhani et al. 2021). Las cáscaras de cítricos, con alta proporción de celulosa (37 %) (**Cuadro II**), ofrecen oportunidades para la producción de nanocelulosa, pectinas o fibras funcionalizadas (Zannini et al. 2025), mientras que el tronco de palma aceitera, con niveles de celulosa de hasta 34 %, es prometedor para la producción de bioetanol o aglomerados lignocelulósicos (Hossain y Jalil 2017, Rusdi et al. 2020, Ezzatzadegan et al. 2021, Sitinjak et al. 2023). Por su parte, la cascarilla de arroz, rica en lignina y sílice, es adecuada para la fabricación de materiales refractarios o aislantes térmicos (Alsaed y al-Mufti 2024).

Finalmente, cultivos de bajo volumen, pero de alta calidad estructural, como el coco fruta (21 kt) y el henequén (15 kt), pueden orientarse hacia aplicaciones de nicho o de valor agregado. Las fibras del coco, con un contenido de lignina de hasta 31 % y alta resistencia, pueden aprovecharse en productos como geotextiles, paneles acústicos o compuestos plásticos reforzados (Chiranthika et al. 2021, de Souza et al. 2022). El henequén, especialmente el varejón y el vástago, posee una estructura fibrosa rica en celulosa (29 %) y hemicelulosa (30-34 %), por lo que es ideal para la producción de papel artesanal, biotextiles o filamentos para impresión 3D de base biológica (Parra et al. 2010, Figueroa-Velarde et al. 2021, Trujillo-Ramírez et al. 2023).

En síntesis, en la valorización de residuos agrícolas debe considerarse tanto su composición química como el volumen disponible, las condiciones logísticas y la demanda del mercado. Mientras que los residuos abundantes permiten escalas industriales, los residuos más escasos, pero estructuralmente ricos, pueden destinarse a productos especializados, de alto valor añadido y con menores requerimientos de infraestructura.

## CONCLUSIONES

Este estudio presenta una estimación detallada del potencial de generación de residuos agroindustriales en la región, a partir del procesamiento de datos agrícolas obtenidos del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México (SAGARPA). La información fue recopilada, depurada y organizada por tipo de cultivo, e integrada con cocientes residuo/producto (R/P) tomados de la literatura especializada, los cuales se aplicaron directamente a los datos procesados. De esta manera, se obtuvieron estimaciones propias de la cantidad de residuos generados por cultivo.

Los cultivos de caña de azúcar y plátano son los que generan la mayor cantidad de residuos en

la región, con aproximadamente 2500 kt cada uno. Otros cultivos significativos incluyen henequén, coco, arroz, cítricos, palma aceitera y maíz-sorgo. La revisión de la composición química y estructura lignocelulósica de estos residuos permite identificar múltiples rutas de valorización, destacando la producción de materiales compuestos, biocombustibles y pulpa celulósica, entre otros productos de valor añadido.

La valorización efectiva de estos residuos debe considerar no solo su cantidad y composición química, sino también factores como la logística de recolección, la proximidad a centros de transformación y el potencial de mercado. En particular, los residuos de alto volumen, como los generados por la caña de azúcar y el plátano, son más adecuados para aplicaciones a escala industrial o regional, como la producción de bioenergía, compuestos lignocelulósicos o celulosa. En contraste, cultivos con volumen intermedio (maíz-sorgo, cítricos, palma y arroz) podrían aprovecharse en proyectos cooperativos o locales, dependiendo de factores logísticos. Finalmente, residuos con bajo volumen, pero alto valor estructural, como los del coco fruta y el henequén, se orientan preferentemente a nichos de mercado mediante productos como geotextiles, papel artesanal o biotextiles. Esta diferenciación permite plantear estrategias de aprovechamiento adaptadas a las condiciones productivas y sociales del sureste de México, promoviendo un modelo de economía circular viable a nivel territorial.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la SECIHTI por el apoyo brindado al proyecto CBF2023-2024-3289. I.Y. Forero-Sandoval agradece a SECIHTI por su beca de investigación posdoctoral.

## REFERENCIAS

- Ab Ghani Z., Yusoff M.S. y Andas J. (2016). Development of activated carbon from banana pseudo-stem via single step of chemical activation. *Memorias. AIP Conference Proceedings* 1774, 0200071-0200076. <https://doi.org/10.1063/1.4965055>
- Abu Bakar N.F., Abd Rahman N., Mahadi M.B., Mohd Zuki S.A., Mohd Amin K.N., Wahab M.Z. y Wuled Lenggoro I. (2022). Nanocellulose from oil palm mesocarp fiber using hydrothermal treatment with low concentration of oxalic acid. *Memorias. Materials Today: Proceedings* 48, 1899-1904. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.357>
- Ajala E.O., Ighalo J.O., Ajala M.A., Adeniyi A.G. y Ayanshola A.M. (2021). Sugarcane bagasse: A biomass sufficiently applied for improving global energy, environment and economic sustainability. *Bioresources and Bioprocessing* 8 (1), 87. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00440-z>
- Alfatah T., Mistar E.M., Syabriyana M. y Supardan M.D. (2022). Advances in oil palm shell fibre reinforced thermoplastic and thermoset polymer composites. *Alexandria Engineering Journal* 61 (6), 4945-4962. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.061>
- Alsaed M.M. y al-Mufti R.L. (2024). The effects of rice husk ash as bio-cementitious material in concrete. *Construction Materials* 4 (3), 629-639. <https://doi.org/10.3390/constrmater4030034>
- Amran M.A., Palaniveloo K., Fauzi R., Satar N.M., Mohidin T.B.M., Mohan G., Razak S.A., Arunasalam M., Nagappan T. y Sathiya Seelan J.S. (2021). Value-added metabolites from agricultural waste and application of green extraction techniques. *Sustainability* 13 (20), 11432. <https://doi.org/10.3390/su132011432>
- Arrieta Aguilar N.E. (2019). Estudio de la generación y manejo de los residuos de la comercialización de coco en el municipio de Xoxocotla, Morelos. Tesis de Especialidad. Centro de Investigación en Biotecnología, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México, 65 pp.
- Awogbemi O. y Kallon D.V. Von. (2022). Pretreatment techniques for agricultural waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 6, 100229. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100229>
- Baharuddin M.N.M., Zain N.M., Harun W.S.W., Roslin E.N., Ghazali F.A. y Md Som S.N. (2023). Development and performance of particleboard from various types of organic waste and adhesives: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 124, 103378. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103378>
- Balam-Cocom R.J., Duarte-Aranda S. y Canché-Escamilla G. (2006). Obtención y caracterización de materiales compuestos de fibras de la «piña» de henequén y polipropileno. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 5 (1), 39-44.
- Batista Meneses D., Montes de Oca-Vásquez G., Vega-Baudrit J.R., Rojas-Álvarez M., Corrales-Castillo J. y Murillo-Araya L.C. (2022). Pretreatment methods of lignocellulosic wastes into value-added products: Recent advances and possibilities. *Biomass Conversion and Biorefinery* 12 (2), 547-564. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00722-0>
- Bolio-López G.I., Valadez-González A., Veleza L. y Andreeva A. (2011). Whiskers de celulosa a partir de

- residuos agroindustriales de banano: obtención y caracterización. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 10 (2), 291-299.
- Boonsombuti A., Phinichkha N., Supansomboon S. y Luengnaruemitchai A. (2023). The use of lignin from palm kernel shell (PKS) to fabricate oil palm mesocarp fiber (OPMF) particleboards. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 125, 103425. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103425>
- Borel L.D.M.S., de Lira T.S., Ataíde C.H. y de Souza Barrozo M.A. (2021). Thermochemical conversion of coconut waste: Material characterization and identification of pyrolysis products. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 143 (1), 637-646. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09281-y>
- Borrero-López A.M., Valencia C. y Franco J.M. (2022). Lignocellulosic materials for the production of biofuels, biochemicals and biomaterials and applications of lignocellulose-based polyurethanes: A review. *Polymers* 14 (5), 881. <https://doi.org/10.3390/polym14050881>
- Can-Canul A.B. (2023). Caracterización de las fibras de bagazo de henequén y su uso en la obtención de materiales compuestos con polipropileno. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, México, 68 pp.
- Canché-Escamilla G., de los Santos-Hernández J.M., Andrade-Canto S. y Gómez-Cruz R. (2005). Obtención de celulosa a partir de los desechos agrícolas del banano. *Información Tecnológica* 16 (1), 83-88. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642005000100012>
- Canché-Escamilla G., Guin-Aguillón L., Duarte-Aranda S. y Barahona-Pérez F. (2022). Characterization of bio-oil and biochar obtained by pyrolysis at high temperatures from the lignocellulosic biomass of the henequen plant. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 24 (2), 751-762. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01361-5>
- Chavan S., Mitra D. y Ray A. (2024). Harnessing rice husks: Bioethanol production for sustainable future. *Current Research in Microbial Sciences* 7, 100298. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100298>
- Chen Z., Chen Z., Yi J. y Feng D. (2019). Preparation method of corn stalk fiber material and its performance investigation in asphalt concrete. *Sustainability* 11 (15), 4050. <https://doi.org/10.3390/su11154050>
- Chiranthika N.N.G., Janarny G., Hettiarachchi H.A.C.O. y Gunathilake K.D.P.P. (2021). Waste valorization of coconut products for food and non-food uses. En: *The coconut palm (Cocos nucifera): Production, cultivation and uses* (Ghosh P.K., Ed.). Nova Science Publishers, Nueva York, EUA, pp. 325-346.
- Chopra L. y Manikanika. (2022). Extraction of cellulosic fibers from the natural resources: A short review. *Memorias. Materials Today: Proceedings* 48, Part 5, 1265-1270. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.267>
- Cuebas L., Bertolini Neto J.A., Pereira de Barros R.T., Cordeiro A.O.T., dos Santos D.R. y Martins C.R. (2020). The incorporation of untreated and alkali-treated banana fiber in SEBS composites. *Polímeros* 30 (4), e2020040. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.07520>
- Danso H. (2017). Properties of coconut, oil palm and bagasse fibres: As potential building materials. *Procedia Engineering* 200, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.002>
- De Souza M.J.C., de Melo R.R., Guimarães Junior J.B., Mascarenhas A.R.P., de Oliveira Paula E.A., Pedrosa T.D., Maskell D., Mensah P. y Rodolfo Junior F. (2022). Eco-friendly particleboard production from coconut waste valorization. *Environmental Science and Pollution Research* 30 (6), 15241-15252. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23273-5>
- Ezzatzadegan L., Yusof R., Morad N.A., Shabanzadeh P., Muda N.S. y Borhani T.N. (2021). Experimental and artificial intelligence modelling study of oil palm trunk sap fermentation. *Energies* 14 (8), 2137. <https://doi.org/10.3390/en14082137>
- Farhana Iqbal S.M., Humaun Kabir M., Iftakharul Muhib M. y Rupok M.M.H.K. (2023). Prospect of waste banana fiber use in industry: A narrative review. *International Journal of Science and Research Archive* 10 (2), 828-839. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.10.2.1045>
- Figuroa-Velarde V., Díaz-Vidal T., Cisneros-López E.O., Robledo-Ortiz J.R., López-Naranjo E.J., Ortega-Gudiño P. y Rosales-Rivera L.C. (2021). Mechanical and physicochemical properties of 3d-printed agave fibers/poly(lactic) acid biocomposites. *Materials* 14, 3111. <https://doi.org/10.3390/ma14113111>
- Florian T.D.M., Villani N., Aguedo M., Jacquet N., Thomas H.G., Gerin P., Magali D. y Richel A. (2019). Chemical composition analysis and structural features of banana rachis lignin extracted by two organosolv methods. *Industrial Crops and Products* 132, 269-274. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.022>
- Forero-Sandoval I.Y., Canche-Escamilla G., Duarte-Aranda S. y Macías-Ramírez A.S. (2023). Potencial de residuos agroindustriales y sus aplicaciones para la región maicera en el estado de Yucatán. *Experiencias Científicas Tecnológicas y de Innovación* 3 (1), 191-195.
- Forero-Sandoval I.Y., Duarte-Aranda S. y Canche-Escamilla G. (2024). Valorization of waste from coconut palm cultivation as source of cellulose to papermaking. *International Journal of Environmental Science and Technology* 22, 9303-9318. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06270-8>

- Forero-Sandoval I.Y., Duarte-Aranda S. y Canche-Escamilla G. (2025). Valorization of henequen bagasse via cellulose extraction: Influence of the extraction method on the properties of cellulose-reinforced composite films. *Cellulose* 32, 8343-8357. <https://doi.org/10.1007/s10570-025-06715-4>
- Gairola S., Naik T.P., Sinha S. y Singh I. (2022). Corn cob waste as a potential filler in biocomposites: A decision towards sustainability. *Composites Part C: Open Access* 9, 100317. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100317>
- García-Culqui R., Jácome-Pilco C., Guevara-Narváez L. y Moreta-Guangasi T. (2023). Revalorización del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) como residuo importante para la agroindustria. *593 Digital Publisher CEIT* 8 (3), 134-148. <https://doi.org/10.33386/593dp.2023.3.1661>
- Guo J., Tsou C.-H., De Guzman M.R., Wu C.-S., Zhang X., Chen Z., Wen Y.-H., Yang T., Zhuang Y.-J., Ge F., Chen Z. y Wang Z. (2021). Preparation and characterization of bio-based green renewable composites from poly(lactic acid) reinforced with corn stover. *Journal of Polymer Research* 28 (6), 199. <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02559-1>
- Gupta S. (2019). Agriculture crop residue burning and its consequences on respiration health of school-going children. *Global Pediatric Health* 6, 1-8. <https://doi.org/10.1177/2333794X19874679>
- Gutiérrez G.D., Aguirre L., Ortiz B., Lima R., Rodríguez Z., González A. y Elías A. (2020). Valoración nutricional del bagazo de *Agave fourcroydes* (henequén) para uso en la alimentación animal. *Bosques Latitud Cero* 10, 29-38.
- Gutiérrez G.D., Elías A., Lima O.R., Tuero O., Monteagudo F. y Medina L.B. (2018). Degradabilidad rumial in situ de la materia seca del bagazo de henequén (*Agave fourcroydes*). *Cuban Journal of Agricultural Science* 52 (1), 19-23.
- He Z., Hong D., Jiang Y., Zhai W., Wu R., Tang W. y Liu B. (2025). Utilization of modified corn stover powder as sustainable binder into eco-friendly mortar. *Results in Engineering* 26, 104785. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104785>
- Hernández-Olivares F., Elizabeth Medina-Alvarado R., Burneo-Valdivieso X.E. y Rodrigo Zúñiga-Suárez A. (2020). Short sugarcane bagasse fibers cementitious composites for building construction. *Construction and Building Materials* 247, 118451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118451>
- Hossain N. y Jalil R. (2017). Sugar and bioethanol production from oil palm trunk (OPT). *Asia Pacific Journal of Energy and Environment* 4 (1), 13-16.
- Huisken Mejouyo P.W., Tchémou G., Tagne N.R.S., Ndapeu D. y Njeugna E. (2022). Effect of the addition of oil palm mesocarp fibers on the physical and mechanical properties of a polyester matrix composite. *International Journal of Polymer Science* 2022 (1), 1-12. <https://doi.org/10.1155/2022/3399986>
- IPTS (2015). EUR 27291. DataM – Biomass estimates (v3): A new database to quantify biomass availability in the European Union. Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre Institute, Sevilla, España, 28 pp. <https://doi.org/10.2791/650215>
- Jeetah P. y Jaffur N. (2022). Coconut husk, a lignocellulosic biomass, as a promising engineering material for non-wood paper production. *Journal of Natural Fibers* 19 (13), 5622-5636. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1889428>
- Jeguirim M., Khiari B. y Jellali S. (2023). Palm trees and fruits residues: Recent advances for integrated and sustainable management. Elsevier Science, Londres, Reino Unido, 498 pp. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01131-X>
- Kadam K.L. y McMillan J.D. (2003). Availability of corn stover as a sustainable feedstock for bioethanol production. *Bioresource Technology* 88 (1), 17-25. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00269-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00269-9)
- Kannahi M. y Megala R. (2017). Bio ethanol production using banana pseudo stem by fungal consortium. *International Journal of Recent Scientific Research* 8 (1), 14960-14966.
- Kelly-Yong T.L., Lee K.T., Mohamed A.R. y Bhatia S. (2007). Potential of hydrogen from oil palm biomass as a source of renewable energy worldwide. *Energy Policy* 35 (11), 5692-5701. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.017>
- Kiamahalleh M.V., Gholampour A., Ngo T.D. y Ozbakkaloglu T. (2024). Mechanical, durability and microstructural properties of waste-based concrete reinforced with sugarcane fiber. *Structures* 67, 107019. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107019>
- Kumar A., Singh B.P., Jain R.K. y Sharma A.K. (2013a). Banana fibre (*Musa sapientum*): A suitable raw material for handmade paper industry via enzymatic refining. *International Journal of Engineering Research and Technology* 2 (10), 1338-1350.
- Kumar A., Singh B., Jain R. y Sharma A. (2013b). The use of alternate ligno-cellulosic raw materials banana (*Musa sapientum*) anka (*Calotropis procera*) and pineapple (*Ananas comosus*) in handmade paper and their blending with waste paper. *American Journal of Engineering Research* 2 (09), 171-189.
- Kumar P., Kumar S. y Joshi L. (2015). The extent and management of crop stubble. En: *Socioeconomic and environmental implications of agricultural residue burning*. SpringerBriefs in Environmental Science, Nueva Deli, India, 13-34. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2014-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2014-5_2)

- Lemieux P.M., Lutes C.C. y Santoianni D.A. (2004). Emissions of organic air toxics from open burning: A comprehensive review. *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (1), 1-32. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.08.001>
- Lenhani G.C., dos Santos D.F., Koester D.L., Biduski B., Deon V.G., Machado Junior M. y Pinto V.Z. (2021). Application of corn fibers from harvest residues in biocomposite films. *Journal of Polymers and the Environment* 29 (9), 2813-2824. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02078-6>
- León Martínez T.S., Dopico Ramírez D., Triana Hernández O. y Medina Estévez M. (2013). Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar 47 (2), 13-22.
- López Cobá E.H., Ancona Méndez L.M. y Peralta S. (2005). Cultivo de *Pleurotus djamor* en condiciones de laboratorio y en una casa rural tropical. *Revista Mexicana de Micología* (21), 93-97.
- López-Velázquez L.Y., Salgado-García S., Turrado-Saucedo J., Hidalgo-Moreno C.I., Ortiz-García C.F., Córdova-Sánchez S., Saucedo-Corona A.R. y Canché-Escamilla G. (2020). Celulosa y microcelulosa de residuos del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *Agro Productividad* 13 (4). <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1591>
- Macedo Barragán R.J. (2000). Análisis del sistema de alimentación pecuario rastrojo de maíz (*Zea mays* L.)-pasto estrella (*Cynodon plectostachyus* P.) en la zona norte del estado de Colima. Tesis de doctorado. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad de Colima, Colima, México, 126 pp.
- Manju Wadhwa M.W., Bakshi M.P.S. y Makkar H.P.S. (2015). Waste to worth: Fruit wastes and by-products as animal feed. *CABI Reviews* 10 (031), 1-26. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201510031>
- Mannan M.A., Hashem M.A., or Rashid M.H.-, Rahman M.S., Talukder F.U. y Kaisar N. (2020). Influence of banana leaves in association with inorganic potassium fertilizer on the nutrient content and uptake of BRRI dhan49. *Acta Scientifica Malaysia* 5 (1), 05-09. <https://doi.org/10.26480/asm.01.2021.05.09>
- Marín F.R., Soler-Rivas C., Benavente-García O., Castillo J. y Pérez-Álvarez J.A. (2007). By-products from different citrus processes as a source of customized functional fibres. *Food Chemistry* 100 (2), 736-741. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.04.040>
- Martínez-Torres J., Barahona-Pérez F., Lappe-Oliveras P., Colunga García-Marín P., Magdub-Méndez A., Vergara-Yoisura S. y Larqué-Saavedra A. (2011). Ethanol production from two varieties of henequen (*Agave fourcroydes* Lem). *GCB Bioenergy* 3, 37-42. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01081.x>
- Monroy A.F., Caicedo G.A., Martínez J.J. y Romanelli G.P. (2024). Utilization of deep eutectic solvents in the production of high-value compounds from biomass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 18 (5), 1821-1865. <https://doi.org/10.1002/bbb.2651>
- Muñoz O., Canepa A. y Peñafiel J. (2022). Enseñanzas para el manejo de los desechos agrícolas del cantón Montalvo mediante charlas en gestión ambiental. *Revista Conrado* 18 (88), 141-150.
- Nadh V.S., Krishna C., Natrayan L., Kumar K., Nitesh K.J.N.S., Raja G.B. y Paramasivam P. (2021). Structural behavior of nanocoated oil palm shell as coarse aggregate in lightweight concrete. *Journal of Nanomaterials* 2021 (1), 1-7. <https://doi.org/10.1155/2021/4741296>
- Narayanasamy S., Chan K.L., Cai H., Abdul Razak A.H. Bin, Tay B.K. y Miao H. (2020). Biobutanol production from sugarcane bagasse by *Clostridium beijerinckii* strains. *Biotechnology and Applied Biochemistry* 67 (5), 732-737. <https://doi.org/10.1002/bab.1865>
- Natalense J.C. y Zouain D.M. (2013). Technology roadmapping for renewable fuels: Case of biobutanol in Brazil. *Journal of Technology Management and Innovation*, 8(4), 143-152. <https://doi.org/10.4067/S0718-27242013000500012>
- Okolie J.A., Nanda S., Dalai A.K. y Kozinski J.A. (2021). Chemistry and specialty industrial applications of lignocellulosic biomass. *Waste and Biomass Valorization* 12, 2145-2169. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01123-0>
- Parra Negrete L.A., del Villar Quiñones P. y Prieto Rodríguez A. (2010). Extracción de fibras de agave para elaborar papel y artesanías. *Acta Universitaria* 20 (3), 77-83.
- Patsalou M., Samanides C.G., Protopapa E., Stavrinou S., Vyrides I. y Koutinas M. (2019). A citrus peel waste biorefinery for ethanol and methane production. *Molecules* 24 (13), 2451. <https://doi.org/10.3390/molecules24132451>
- Prasad B.R., Padhi R.K. y Ghosh G. (2023). A review on key pretreatment approaches for lignocellulosic biomass to produce biofuel and value-added products. *International Journal of Environmental Science and Technology* 20, 6929-6944. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04252-2>
- Puerta Cortés C., Jaramillo Zapata L. y Upegui Sosa S. (2021). Valorización de cascarilla de arroz en diferentes sectores industriales. En: Prácticas y herramientas de sostenibilidad (Álvarez Arboleda C.A., Franco Orozco B., Salcedo Hurtado K.N. y Soto D.E. Eds.). Sello Editorial Tecnológico de Antioquia Institución Universitaria, Medellín, Colombia, pp. 45-112.

- Rabelo S.C., Carrere H., Maciel Filho R. y Costa A.C. (2011). Production of bioethanol, methane and heat from sugarcane bagasse in a biorefinery concept. *Bioresource Technology* 102 (17), 7887-7895. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.081>
- Rahmayanti H. y Asma A. (2022). Development and characterization of paper from corn husks as a new material for newsprint. *Memorias. International Conference on Multidisciplinary Studies Towards Creative Industries, (JICOMS 2022)*. Jakarta, Indonesia. 16 de noviembre. <https://doi.org/10.4108/eai.16-11-2022.2326122>
- Rendón-Salcido L.A., Colunga-García Marín P., Barahona-Pérez L.F., Pimienta-Barrios E., Magdub-Méndez A. y Larqué-Saavedra A. (2009). Sugars and alcoholic byproducts from henequen (*Agave fourcroydes*) as influenced by plant age and climate. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32 (1), 39-44.
- Rodrigues S. y Pinto G. (2007). Ultrasound extraction of phenolic compounds from coconut (*Cocos nucifera*) shell powder. *Journal of Food Engineering* 80 (3), 869-872. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.08.009>
- Ruangnarong C., Khojimat S., Srivorradatphisan S., Panyathikun N. y Chonsakorn S. (2024). Evaluation of mechanically extracted banana fibers from pseudostem layers: A sustainable textile raw material. *Heliyon* 10 (21), e39880. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39880>
- Rusdi I., Rauf A., Supriadi S. y Hidayat B. (2020). Application of biochar from palm oil plants residues on physical properties of ultisol. *Agritropica: Journal of Agricultural Sciences* 2 (2), 93-97. <https://doi.org/10.31186/j.agritropica.2.2.93-97>
- Saha B.C., Yoshida T., Cotta M.A. y Sonomoto K. (2013). Hydrothermal pretreatment and enzymatic saccharification of corn stover for efficient ethanol production. *Industrial Crops and Products* 44, 367-372. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.11.025>
- Saini J.K., Saini R. y Tewari L. (2015). Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: Concepts and recent developments. *3 Biotech* 5, 337-353. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0246-5>
- Santos Cabral M.M., de Souza Abud A.K., de Farias Silva C.E. y García Almeida R.M.R. (2016). Bioethanol production from coconut husk fiber. *Ciencia Rural* 46 (10), 1872-1877.
- Santos Ríos G.I. (2007). Diagnóstico y propuesta de gestión de los residuos sólidos generados por el proceso de extracción de aceite crudo de palma africana en Palmas Oleaginosas Bucarelia SA. Tesis de Especialidad. Escuela de Química, Universidad Industrial de Santander, 84 pp.
- SEMARNAT (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México, 272 pp.
- SIACON (2025). Base de datos de la actividad agrícola, pecuaria y pesquera en México. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta, Gobierno de México [en línea]. [https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430\\_12/12/2025](https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430_12/12/2025)
- Singh P., Dubey P., Younis K. y Yousuf O. (2024). A review on the valorization of coconut shell waste. *Biomass Conversion and Biorefinery* 14, 8115-8125. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03001-2>
- Sitinjak E.M., Masmur I., Sitanggang Y., Pratikha R.S., Nainggolan F., Yatasya F.A., Afandi T., Tarigan K., Hutajulu P.E., Destty N.V.M. y Gultom G. (2023). A study on cellulose from oil palm biomass as a source of bioethanol production. *Cellulose Chemistry and Technology* 57 (3-4), 369-375. <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2023.57.32>
- Soni S.K., Parkash O., Manhas R., Tewari R. y Soni R. (2019). Value added products from lignocellulosic agricultural residues: An overview. *International Journal of Food and Fermentation Technology* 9 (2), 101-115. <https://doi.org/10.30954/2277-9396.02.2019.7>
- Sukiran M.A., Bakar N.K.A. y Chin C.M. (2009). Bio-oils from pyrolysis of oil palm empty fruit bunches. *American Journal of Applied Sciences* 6 (5), 869-875. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2009.869.875>
- Thiyageshwari S., Gayathri P., Krishnamoorthy R., Anandham R. y Paul D. (2018). Exploration of rice husk compost as an alternate organic manure to enhance the productivity of blackgram in *Typic haplustalf* and *Typic rhodustalf*. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (2), 358. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020358>
- Trujillo-Ramírez D., Bustos-Vázquez M.G., Martínez-Velasco A. y Torres-de los Santos R. (2023). Integral use of henequen (*Agave fourcroydes*): Applications and trends – A review. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 26 (2), 062. <https://doi.org/10.56369/tsaes.4619>
- Ufitikirezi J. de D.M., Filip M., Ghorbani M., Zoubek T., Olšan P., Bumbálek R., Strob M., Bartoš P., Umurungi S.N., Murindangabo Y.T., Heřmánek A., Tupý O., Havelka Z., Stehlík R., Černý P. y Smutný L. (2024). Agricultural waste valorization: Exploring environmentally friendly approaches to bioenergy conversion. *Sustainability* 16 (9), 3617. <https://doi.org/10.3390/su16093617>
- Vivekanand V., Olsen E.F., Eijssink V.G.H. y Horn S.J. (2014). Methane potential and enzymatic saccharification of steam-exploded bagasse. *BioResources* 9 (1), 1311-1324. <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.1311-1324>

- Yang J. y Park M.-J. (2025). Antioxidant effects of essential oils from the peels of citrus cultivars. *Molecules* 30 (4), 833. <https://doi.org/10.3390/molecules30040833>
- Zannini D., Monteforte M., Gargiulo L., Marino T., Gomez d' Ayala G., Santagata G. y Dal Poggetto G. (2025). Citrus wastes as source of pectin and bioactive compounds extracted via one-pot microwave process: An in situ path to modulated property control. *Polymers* 17 (5), 1-16. <https://doi.org/10.3390/polym17050659>
- Zhang M., Wang R., Wu T., Yang Y., He Z., Ma Z., Tan Z., Lin B. y Wang M. (2022). Comparisons of corn stover silages after fresh- or ripe-corn harvested: Effects on digestibility and rumen fermentation in growing beef cattle. *Animals* 12 (10), 1248. <https://doi.org/10.3390/ani12101248>
- Zhang Y., Liao J. y Qi J. (2020). Functional and structural properties of dietary fiber from citrus peel affected by the alkali combined with high-speed homogenization treatment. *LWT- Food Science and Technology* 128, 109397. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109397>