

# Alternativas ambientales para el aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos agroindustriales provenientes de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*)

**Marcela Michela Montoya Centeno**, Ingeniera Agroindustrial. Instituto de la Paz.

Tutora: Ing. MSc. Lilian Astrith Chaparro Granados. Coordinadora Esp. Gestión Ambiental. Universidad Libre Socorro

ISSN: 2590-6704

## RESUMEN

Actualmente, Colombia, es considerado como el primer productor de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) en América Latina, su cultivo y producción se ha expandido considerablemente en el territorio, a su vez la actividad agroindustrial ha tenido relevancia a nivel ambiental, en donde la generación de residuos sólidos y líquidos ha sido evidente; puesto que el 72% del producto cosechado se convierte en residuo. Por lo tanto, en este artículo de revisión, se presenta una visión general de la cantidad, tipo de residuo y alternativas de tratamiento actuales para el aprovechamiento de la biomasa residual producida por el sector palmero; en donde se pueden obtener diferentes productos de valor agregado, como bioenergía (biogás, biodiesel, bioaceite, bioetanol); biocompuestos (carbón activado, filtros, biopelletes), biofertilizantes, bioactivos y compuestos como la celulosa entre otros; que contribuyan a la producción sostenible, con cero residuos.

**Palabras Clave:** Biomasa residual, bioeconomía circular, palma de aceite, residuos agroindustriales, tratamiento, subproductos, utilización.

## Abstract

Currently, Colombia is considered the first producer of oil palm (*Elaeis guineensis*) in Latin America, its cultivation and production have expanded considerably in the territory, in turn, the agro-industrial activity has had relevance at the environmental level, where the generation of solid and liquid waste has been evident; since 72% of the harvested product becomes waste. Therefore, in this review article, an overview of the amount, type of waste, and current treatment alternatives for the use of residual biomass produced by the palm sector are presented; where different value-added products can be obtained, such as bioenergy (biogas, biodiesel, bio-oil, bioethanol); biocomposites (activated carbon, filters, pellets), biofertilizers, bioactive and compounds such as cellulose, among others; that contribute to sustainable production, with zero waste.

**Keywords:** Residual biomass, circular bioeconomy, oil palm, agro-industrial waste, treatment, by-products, utilization.

## Introducción

A nivel mundial la producción primaria (agropecuaria, forestal y piscícola) ha evolucionado a sistemas más complejos que implican su transformación y la producción de materias primas, conformando la agroindustria (Baruah, 2011), la cual se constituye como un

negocio derivado de la producción agrícola, forestal o pecuaria, en donde interactúan diferentes actores (personas, empresas) y procesos (procesamiento, producción, fabricación, transporte y venta) (Borsellino, 2019), formando una cadena productiva, generadora de beneficios a nivel del sistema económico, como: aumento de productividad agrícola, empleo e incorporación de innovadoras y modernas tecnologías, permitiendo de esta manera la dinamización de la economía (López Macías & Castrillón, 2009). Sin embargo, la agroindustria, origina diferentes impactos a nivel ambiental, relacionados con la pérdida y destrucción de ecosistemas, especies nativas, cambios en la estructura del suelo, contaminación del aire y de cuerpos de agua a causa de productos químicos y procesos de eutrofización (Trevors & Saier, 2010), además de generar importantes cantidades y volúmenes de residuos sólidos agrícolas de carácter orgánico (Andreichenko y otros, 2021).

En este sentido en Colombia se estima que la producción de residuos animales y vegetales derivados de las actividades económicas corresponde a 7'190.182 toneladas, de las cuales el 78,8% fueron empleadas en la cogeneración de energía y sometidas a otros aprovechamientos (DANE, 2022). Por su parte, los cultivos agroindustriales (café, palma de aceite, caña para azúcar, caña para panela, cacao, soya, algodón, caucho, tabaco, fique, entre otros) cuya producción asciende a las 42'208.363 toneladas (DANE, 2020) y en donde su procesamiento a nivel industrial genera una considerable cantidad de los denominados residuos agroindustriales (Cantão Freitas, y otros, 2021) que incluyen fibras, tallos, hojas, cáscaras, pulpa, semillas oleaginosas, legumbres, rastrojos de fruta, bagazo, etc., los cuales pueden reincorporarse al ecosistema, puesto que son recursos renovables y además sirven como materia prima para la fabricación de productos de valor agregado (Mohanty y otros, 2022) y representan un tercio de la producción

agrícola mundial (equivalentes a 1300 millones de toneladas de alimentos para el consumo humano) que no son aprovechados (Yafetto y otros, 2023), adicionalmente otros estudios sugieren la pérdida de alimentos en 361 millones de toneladas al año, en el aspecto relacionado con la industria de producción y comercialización de productos alimenticios (PNUMA, 2021).

En el caso particular de la palma de aceite, se estima que para el año 2021 a nivel nacional el área destinada para su cultivo fue de 595.722 hectáreas, siendo el cuarto mayor productor en el mundo y el primero en América, en donde el 84% de éstas se encontraba en etapa productiva y de las cuales se obtuvieron 7'882.225 toneladas de racimos de fruta fresca (RFF) equivalentes a 1'747.377 y 312.512 toneladas de aceite de palma crudo y palmiste (almendra de palma), respectivamente (Fedepalma, 2022), lo que refleja su alta expansión y el crecimiento de la demanda de sus productos principalmente de aceite de palma, que constituye el 40% de la producción de aceite vegetal en el mundo y es utilizado a nivel industrial en la elaboración de diferentes artículos alimenticios, cosméticos, detergentes, biocombustibles, farmacéuticos entre otros (Anima Antwi y otros, 2023), por lo tanto análogamente un crecimiento y expansión del cultivo de palma de aceite, tiene un impacto directo sobre la generación de residuos sólidos tanto agrícolas como agroindustriales (Coral Medina y otros, 2019).

En contextualización a los residuos agroindustriales provenientes de la palma de aceite, es importante mencionar los procesos durante su cultivo, producción y transformación a nivel industrial, generadores de desechos o residuos. En este sentido, la palma de aceite es una planta oleaginosa (proporciona los mayores rendimientos en producción de aceite), perenne, alcanza una altura aproximada de 30 metros y una vida productiva de 25 años, produce racimos

de frutos compactos de un peso variante entre los 10 y 40 kg (Fedepalma, 2007); en su etapa de desarrollo se remueve biomasa correspondiente a las hojas secas, en la etapa de aprovechamiento y procesamiento surgen residuos como las hojas que se retiran cuando se extraen los racimos de la palma (en campo), racimos de frutas vacíos, fibra de mesocarpio, cáscaras de palmiste (en la extractora) y al final de su vida productiva residuos como tallos y hojas que son talados para realizar la renovación del cultivo (Dirkes, y otros, 2021 ), según se muestra en la figura 1. Adicionalmente, se considera que la actividad agroindustrial de la extracción de palma de aceite, del 100% de los RFF sólo el 24% se convierte en producto, mientras el 76 % se desperdicia en el proceso o sale como residuo (Poku, 2002), otro estudio sugiere que sólo se utiliza el 9% y el 91% es expulsado o es considerado como desecho (Saval, 2012), en este sentido (Romero Peláez y otros, 2022) plantean que sólo del 10% corresponden a aceites y en un 90% a residuos agroindustriales de la extracción de palma de aceite, conformado por líquidos residuales y material lignocelulósico de importancia ambiental, puesto que éstos compuestos pueden ser utilizados en la elaboración de bioproductos.

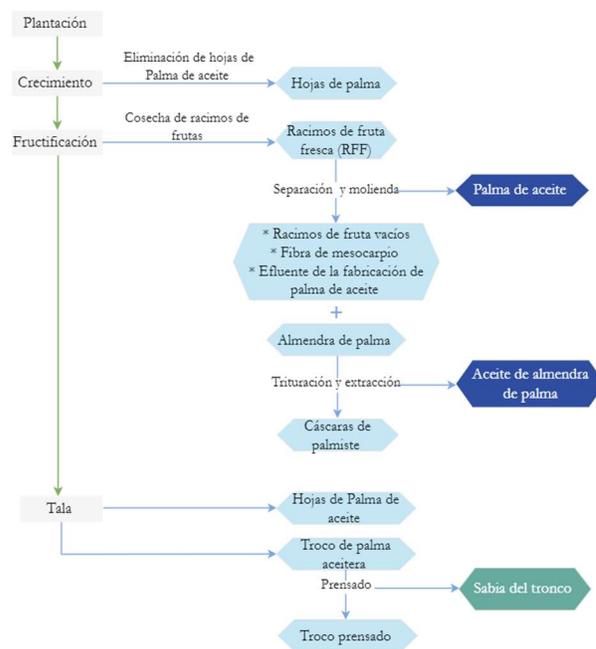


Figura 1. Residuos sólidos generados por la palma de aceite durante su vida productiva, según (Dirkes, y otros, 2021 ). Nota: Los cuadros azules y verde claro representan la biomasa o residuos generados, los azules oscuros son los productos obtenidos a nivel industrial.

La composición de los residuos agroindustriales consta principalmente de tres compuestos conformados por celulosa, lignina y hemicelulosa, interconectados entre sí y que forman una estructura protectora frente a la destrucción celular por hongos o bacterias (Mussatto y otros, 2012), éstos a su vez son compuestos poliméricos, la celulosa es el biopolímero más abundante, se encuentra en las paredes celulares vegetales, su composición corresponde a glucosa exclusivamente; además de ser una de las materias más utilizadas en la fabricación de papel (Isogai, 2014); la hemicelulosa por su parte, es un biopolímero de homo o hetero-polisacáridos formadores de la matriz que soporta las fibras de celulosa, cuyas propiedades le confieren alta solubilidad, asimismo es un componente natural

biodegradable renovable (Ribeiro Martins y otros, 2022); finalmente la lignina es el segundo

biopolímero más abundante en el materia vegetal (Feofilova & Mysyakina, 2016), “es amorfo de unidades heterogéneas de fenilpropano que sirve como aglutinante, proporcionando fuerza y rigidez a las paredes celulares vegetales” (Uraki & koda , 2014) y puede ser utilizada como aditivo de materiales poliméricos, así como también convertida en productos químicos finos (Erfani Jazi y otros, 2019). De manera general, la celulosa, hemicelulosa y lignina componen la biomasa lignocelulósica, la cual posee numerosas aplicaciones como la producción de biocombustibles, productos bioquímicos, biomateriales (tanto de lignina como de celulosa) y materiales de carbono (carbón activado. nanomateriales) (Okolie y otros, 2021), reflejando así la utilidad de las propiedades de los subproductos o residuos agroindustriales y de los desechos de biomasa vegetal.

En relación a la biomasa residual de la actividad agroindustrial de la palma de aceite, se cuantifica que por cada hectárea de plantación anualmente, se genera aproximadamente 21,63 toneladas de residuos, de éstos el 85% consta de residuos sólidos distribuidos porcentualmente de la siguiente manera, un 50,30% corresponde a de hojas de palma de aceite (OPF), el 20,43% a racimos de fruta vacíos (EFB), un 12,53% a fibra de palma prensada (PPF), el 11,65% a troncos de palma (OPT) y un 5,09% a cáscaras de palmiste (OPS); y el 15% restante a residuos líquidos (13,8% al efluente de la fabricación de aceite de palma- POME y un 1.2% a destilado de ácidos grasos de palma- PFAD), los cuales producen efectos negativos a nivel ambiental sino son tratados adecuadamente (Ofori Boateng & Lee , 2013). En cuanto a su composición en la tabla 1, se muestran el contenido porcentual de algunas sustancias presentes en los residuos agroindustriales de la palma de aceite (OPAW)

**Tabla 1.**

*Composición porcentual lignocelulósica de algunos residuos agroindustriales de la palma de aceite.*

Fibras	Extractivo (%)	Holocelulosa (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceniza (%)	Referencias
Racimos de Fruta Vacíos (EFB)	2-4	68-86	43 - 65	17 - 33	13 -37	1- 6	(Dungani y otros, 2018)
Hojas de palma de aceite (OPF)	-----	-----	37.32	31.89	26.05	-----	(Olatunji y otros, 2021)
Troncos de palma aceitera (OPT)	4 - 7	42 – 45	29 - 37	12 -17	18 -23	2 - 3	(Dungani y otros, 2018)
Cáscaras de palma de aceite (OPS)	0,9 - 2	40 – 47	27 - 35	15 - 19	48 - 55	1 - 4	

**Nota:** Según (Dungani y otros, 2018), (Olatunji y otros, 2021).

Según, lo expuesto anteriormente, tanto la producción como la transformación de la palma de aceite, produce un volumen considerable de residuos, constituyéndose como un problema de alta relevancia y para el cual, se han propuesto diferentes alternativas de tratamiento u aprovechamiento, siendo el compostaje y la digestión anaerobia las técnicas más utilizadas (Yahya y otros, 2022). Sin embargo, éstos residuos poseen diferentes características y componentes valiosos que, mediante el uso de tecnologías adecuadas e innovadoras, pueden proporcionar recursos o materias primas útiles para la producción de energía, biofertilizantes y diferentes productos usados en la industria (Handique y otros, 2023), además de biocombustibles, biogás, bioproductos (Samanta y otros, 2023) (Vandamme, 2009), y bioactivos con utilidad funcional para la fabricación de productos alimenticios (Tan y otros, 2007), contribuyendo de esta manera a disminuir la contaminación y al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

Por lo tanto, el presente documento consta de un artículo de revisión, en el cual se plantean los siguientes objetivos.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

- Analizar las alternativas ambientales para el aprovechamiento de residuos sólidos agroindustriales provenientes de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*).

### Objetivos específicos

- Determinar y cuantificar las áreas de producción de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) a nivel nacional.
- Determinar la cantidad de residuos agroindustriales de palma de aceite generados a nivel nacional.

- Indicar los diferentes tipos de tratamiento y/o aprovechamiento de los residuos sólidos y líquidos agroindustriales derivados de la palma de aceite.

## MÉTODOS

Para la elaboración del presente documento, se realizó una revisión bibliográfica, en diferentes bases de datos especializadas y confiables como Science Direct, Scopus, Scielo, Dialnet, Wiley, PNAS, entre otras; así como también, se recopiló información sobre el cultivo y producción de palma de aceite en Colombia, obtenida principalmente de base de datos oficiales de las entidades Fedepalma, Cenipalma y Agronet. A partir de informes de producción se calcularon los residuos generados, por esta actividad tanto en la industria como en campo, los resultados se encuentran contemplados en la siguiente sección.

## RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del análisis de información secundaria, en torno a la producción de palma de aceite, residuos e impactos generados, así como también un análisis del aprovechamiento de los mismos.

### Áreas de producción de aceite de palma en Colombia.

En relación a áreas de producción de palma de aceite, se realizó la espacialización y cuantificación de los municipios que cuentan con cultivo, siendo 156 distribuidos porcentualmente de la siguiente manera el 47% en la zona norte, 28% en la zona centro, 23% en zona oriental y el 2% en la zona suroccidental, como se muestra en la figura 2; las cuales abarcan un total 592,722 hectáreas donde 499,364 ha están en producción y las zonas oriental y centro son las áreas de mayor

producción con 216,672 y 161,402 ha respectivamente. En lo que respecta a plantas de beneficio existen 70, donde la mayor proporción se encuentran en la zona oriental y la central.

Adicionalmente, se realizó una comparación de información de las áreas sembradas con cultivo de palma, a partir de la información presente en el catálogo estadístico de Agronet y la contenida en el anuario estadístico de Fedepalma,

encontrándose diferencias significativas en el área de producción total como se observa en la figura 3; en este sentido para el año 2021 en Agronet, se reportan 636,781.3 ha mientras en Fedepalma 499,364 ha, en donde la diferencia comprende 137,417.3 ha, es decir una diferencia porcentual del 28%; indicando de esta manera que pueden existir áreas que no se encuentran inventariadas o registradas en Fedepalma.

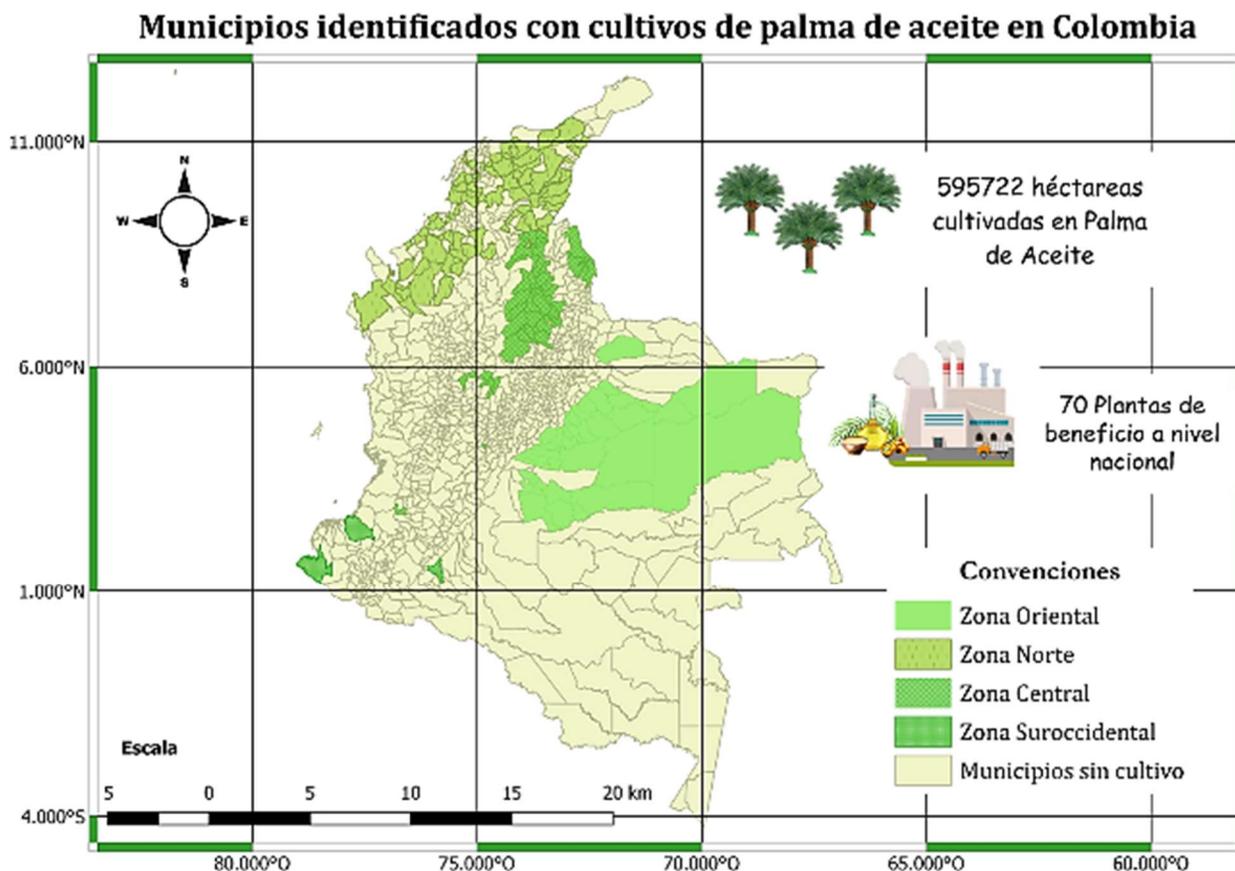


Figura 2. Municipios a nivel nacional que cuentan con cultivo de palma de aceite. Nota: Elaboración propia con base en información según (Sispa, 2021) y (Fedepalma, 2022).

En la figura 3 a, se puede observar que las áreas de producción desde el año 2010 al 2021 ha tenido un incremento del 124%, mientras que a nivel de producción de toneladas de fruto a aumentado el 138% Mientras, en la figura 3 b, se muestra que para el periodo comprendido

entre los años 2017 a 2021, se va mantenido un incremento regulado de las áreas de cultivo siendo del 18%, evidenciándose de ésta manera como el cultivo de la palma de aceite se ha intensificado y a tenido un desarrollo acelerado

Especialización: Gestión Ambiental

Alternativas ambientales para el aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos agroindustriales provenientes de la palma de aceite (Elaeis guineensis).

a nivel nacional, principalmente en las zonas ricas en recurso hídrico y climas tropicales.

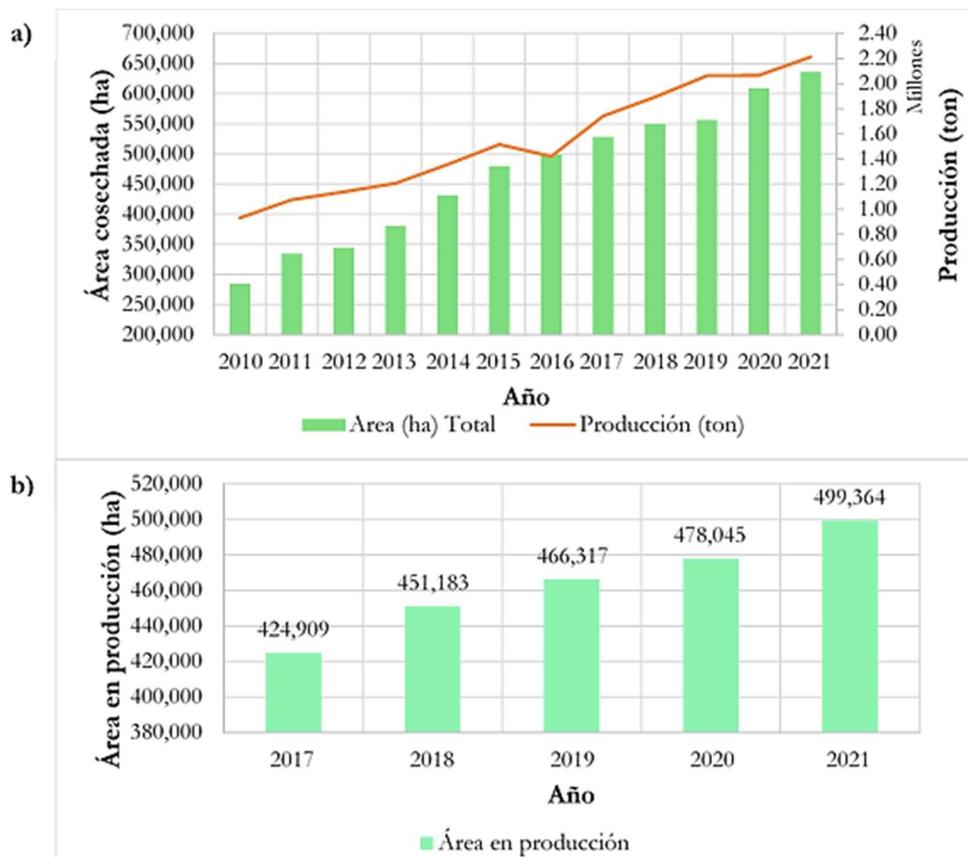


Figura 3. Área de producción y cantidad de fruto producido para el periodo 2017- 2010. Nota: En la figura 3 a, se observan las áreas de producción y su respectiva generación de RFF según (Agronet , 2021). En la figura 3b, se observan las áreas de producción periodo 2017-2021según (Fedepalma, 2022).

**Análisis de los residuos agroindustriales de palma a nivel nacional**

Con la finalidad de cuantificar los residuos agroindustriales derivados del procesamiento de la palma de aceite, a partir de las producciones

de los diferentes productos obtenidos de éstas, se calculó el porcentaje de pérdidas, es decir la proporción que se pierde en el proceso teniendo en cuenta la cantidad en toneladas de racimos de fruta fresca (RFF) que ingresan al proceso, como se observa en tabla

Tabla 2.

Porcentaje de pérdidas en el proceso de extracción de aceite de palma y otros derivados.

Productos	Central	Norte	Oriental	Suroccidental	Promedio
Fruto de palma de aceite (RFF)	2,304,199	1,773,151	3,180,266	228,300	1,871,479
Aceite de palma crudo	22%	21%	22%	21%	21%

Almendra de palma	5%	5%	4%	0%	3%
Aceite de palmiste crudo	2%	2%	1%	0%	1%
Torta de palmiste	3%	3%	2%	0%	2%
<b>Total pérdidas</b>	<b>69%</b>	<b>69%</b>	<b>71%</b>	<b>78%</b>	<b>72%</b>

*Nota:* Elaboración propia con información según (Fedepalma, 2022).

Según la tabla 2, a nivel de producción de derivados de palma de aceite, durante su etapa de extracción se generan diferentes porcentajes de pérdidas que se convierten en productos de desecho tanto sólidos como líquidos, este porcentaje varía en las diferentes zonas de producción, en este punto se muestra que en la zona suroccidental donde solo se produce como producto aceite de palma crudo la generación de

residuos es mayor, puesto que el porcentaje de pérdidas asciende a 78%, mientras que en las otras zonas (central, norte y oriental) en donde además de este producto se obtiene almendra de palma, aceite de palmiste crudo y torta de palmiste las pérdidas en el proceso se reducen al 71% y 69%. Sin embargo, cada proceso adicional trae consigo mayor huella de carbono.

**Tabla 3.**

*Cantidad de residuos generados, a partir del procesamiento de los racimos de fruta fresca (RFF) para el año 2021*

Zona	Área en producción (ha)	Producción de RFF (ton/año)	Porcentaje de pérdidas	Residuos generados (ton/año)
Central	161,402	2,524,394	69%	1,741,831.9
Norte	101,177	1,691,801	69%	1,167,342.7
Oriental	216,672	3,384,753	71%	2,403,174.6
Suroccidental	20,113	281,278	78%	219,396.8
<b>Total</b>	<b>499,364</b>	<b>7,882,226</b>	<b>72%</b>	<b>5,531,746.0</b>

*Nota:* Elaboración propia a partir de información según (Fedepalma, 2022).

En la tabla 3, se muestra la cantidad de residuos sólidos generados en la agroindustria de palma de aceite para el año 2021, calculados a partir de los RFF y el porcentaje de pérdidas, en esta se observa que en las zonas de mayor cultivo de palma de aceite existe una mayor producción de frutos y por siguiente, se genera más cantidad de residuos sólidos en su etapa de procesamiento en las extractoras, originándose 5,531,746.0 toneladas anuales; en donde el 43% corresponde

a la zona oriental, seguida de la zona central con un 31%, reflejando de esta manera el gran volumen de subproductos derivados de ésta actividad que sin un manejo adecuado, ocasionan un impacto negativo no solo en los cuerpos de agua sino también contribuye a la generación de gases de efecto invernadero, puesto que emiten CO<sub>2</sub> almacenado en forma de carbono en el tejido vegetal de los RFF (Henson & Chang, 2010).

**Tabla 4.**

*Cantidad teórica de residuos generados en la agroindustria de palma de aceite para el año 2021.*

Zona	Residuos sólidos (ton/año)	Residuos líquidos (ton/año)	Rácimos de Fruta vacíos- EFB (ton/año)	Cáscaras de Palmiste - OPS (ton/año)	Troncos de Palma- OPT (ton/año)	Fibra de palma prensada- PPF (ton/año)	Hojas de palma de aceite -OPF (ton/año)	Efluente de la fabricación de aceite de palma - POME (ton/año)	Destilado de ácidos grasos- PFAD (ton/año)
Central	2,967,456	523,669	606,251	151,044	351,644	371,822	1,492,631	72,266	6,284
Norte	1,860,190	328,269	380,037	94,684	220,432	233,082	935,675	45,301	3,939
Oriental	3,983,623	702,992	813,854	202,766	472,059	499,148	2,003,762	97,013	8,436
Suroccidental	369,788	65,257	75,548	18,822	43,820	46,334	186,003	9,005	783
<b>Total</b>	<b>9,181,057</b>	<b>1,620,186</b>	<b>1,875,690</b>	<b>467,316</b>	<b>1,087,955</b>	<b>1,150,386</b>	<b>4,618,072</b>	<b>223,586</b>	<b>19,442</b>

**Nota:** Elaboración propia, según (Fedepalma, 2022) y (Ofori Boateng & Lee , 2013)

En el proceso de extracción de aceite de palma y demás derivados, se originan diferentes tipos de biomasa residual que son considerados como corrientes secundarias de desecho, los cuales se muestran en la tabla 4, abarcan tanto residuos sólidos como líquidos; así como también los residuos de la planta que son generados en las plantaciones, como hojas y troncos de palma aceitera.

La información contemplada en la tabla 4, corresponde a un cálculo teórico en donde por cada hectárea de producción se generan 21,63 ton/año de residuos (Ofori Boateng & Lee , 2013), por ende, a partir de las hectáreas en producción actuales se realizaron las estimaciones de los residuos generados en la extracción de la palma de aceite y sus derivados. Según, la información para el año 2021, la cantidad de residuos agroindustriales de la palma aceitera (RPA) fue de 10'801,243 toneladas, donde 9'181,057 toneladas de residuos sólidos (RS) y el restante 1'620,186 ton/año a residuos líquidos (RL), compuestos por el efluente de fabricación de palma de aceite - POME (223,586 ton/año) y destilado de ácidos grasos - PFAD (19,442 ton/año), éstos líquidos corresponden a aguas residuales ácidas; con altas cargas orgánicas y por consiguiente, altas concentraciones de DQO, DBO y sólidos suspendidos (SS), contaminantes de las fuentes hídricas que alteran las características físicas,

químicas y biológicas, si son vertidas sin ningún tipo de tratamiento, adicionalmente estas aguas residuales son fuentes de emisión de gases de efecto invernadero como metano CH<sub>4</sub> y dióxido de carbono CO<sub>2</sub> (Abdurahman y otros, 2013).

En el aspecto de contaminación hídrica, es importante mencionar que la mayor parte de las áreas palmeras nacionales, se encuentran distribuidas en el área de influencia de 5 áreas hidrográficas (AH), principalmente en el AH del Orinoco y Magdalena-Cauca (en un 90%), además en 19 zonas hidrográficas (ZH) y 73 subzonas hidrográficas (SZH) (Fedepalma, 2022), reflejando de ésta manera la importancia y compromiso que tiene el sector palmero en el tratamiento de sus aguas residuales para mitigar los impactos derivados su vertimiento, así como también de optar por la incorporación de procesos más sostenibles y de cero residuos.

A nivel de campo la mayor parte de biomasa corresponde a la hoja de palma con una generación aproximada de 4'618,072 ton/año, mientras que la cantidad de biomasa de troncos de palma es de 1'087,955 ton/año, en donde su composición es en un 50% de agua para el caso de los troncos de palma de aceite, además también posee al igual que las hojas pequeñas proporciones de elementos como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y calcio (Elbersen, 2013). Los residuos de hojas de palma de aceite, son producto de actividades de poda, éstas

generalmente no son utilizadas o sometidas a un proceso de transformación para aprovechar su composición, son depositadas en campo en las calles de la plantación formando lo que se conoce como paleras (Fedepalma & Cenipalma, 2001).

En el proceso de transformación en la planta extractora se obtienen como residuos, los racimos de fruta vacíos (EFB), conocido a su vez como raquis o tusa, para el año 2021 se estima que fueron 1'875.690 ton/año, constituyéndose como el residuo más generado, seguidamente de la fibra prensada (1'150,386 ton/año) y finalmente la cáscara de palmiste o cuesco con una generación de 467,316 ton/año; evidenciándose la variedad de subproductos de desecho que pueden reincorporarse al sistema o ser tratados para la obtención de nuevas materias primas o recuperación de materiales.

**Aprovechamiento o tratamiento de los residuos sólidos y líquidos derivados de la palma de aceite**

En ésta sección para cada uno de los residuos generados en el sector de la palma de aceite, se muestran diferentes investigaciones realizadas sobre los diferentes usos, tratamientos o aprovechamientos que se le pueden aplicar a éstos, con la finalidad de obtener mayor valor agregado y minimizar algunos de los impactos ambientales derivados de la actividad, en la tabla 5, se presentan los productos que se pueden obtener mediante la aplicación de métodos innovadores que dan un mayor valor agregado a los subproductos.

**Tabla 5.**  
*Productos derivados del tratamiento, aprovechamiento de los residuos generados por la actividad palmera*

Residuo	Método	Producto	Referencia
Hojas de palma de aceite (OPF)	Las hojas de palma de aceite preferiblemente maduras y en buen estado se les eliminan los foliolos y la epidermis pasan por un proceso de secado y prensado, obteniéndose un material de alta calidad con buena resistencia física y mecánica.	Tablero compuesto de hojas de palma comprimidas.	(Wahab y otros, 2022)
	Extracción de nutraceuticos con propiedades bioactivas como apigenina glicosilada y luteolina.	Compuestos bioactivos	(Idayu Tahir y otros, 2012)
	Las hojas de palma se cortan en trozos pequeños, se lavan con agua, se someten a secado en horno, posteriormente se trituran y se tamizan en la malla 60, estas partículas se maceración en etanol al 70% en relación 1/10 con agitación cada 6 horas por un día, luego se hacen filtraciones, maceración y evaporaciones hasta obtener un extracto espeso, el cual es mezclado con los productos químicos habituales para la fabricación de jabón.	Jabón sólido antibacteriano que inhibe la bacteria <i>Staphylococcus aureus</i>	(Febriani y otros, 2019)
	Las fibras de hojas de palma previamente cortadas y secadas, se trituran para obtener material fino, medio y grueso, los cuales son ubicados en diferentes proporciones en el espacio filtrante para tratar el POME.	Filtro de fibras de hojas de palma para tratamiento del (POME)	(Djun Lee y otros, 2021)

Residuo	Método	Producto	Referencia
Troncos de hoja de palma (OPT)	Conversión termoquímica de troncos y hojas de palma de aceite	Generación de energía en procesos de, gasificación, combustión y pirolisis	(Umar y otros, 2019)
	El tronco se divide en sus fracciones inferior, media y superior, a las cuales se les retira la corteza, se astillan, se secan; posteriormente son molidas y tamizadas para finalmente ser desmineralizadas en ácido sulfúrico y mezcladas con harinas de corteza de tronco.	Biopellets	(Wistara y otros, 2021)
	Obtención de carbón activado por proceso de pirolisis de troncos de palma de aceite	Biocarbón	(Hassan y otros, 2021)
Racimos de fruta vacíos (EFB)	Obtención de pulpa de papel, por medio de tratamiento mecánico semiquímico	Fibra para la fabricación de papel	(Akpan Sunday, 2022)
	Obtención de hidrógeno mediante, gasificación indirecta de racimos de fruta vacía de palma de aceite	Hidrógeno	(Vargas Mira y otros, 2019)
	Conversión de pirolisis termoquímica de pequeñas fibras de racimos de fruta vacíos (2mm)	Productos bioenergéticos como: biocarbón y bioaceite	(Rahayu y otros, 2021)
	Obtención de nanofibras de celulosa por medio de la hidrólisis de EBF con ácido sulfúrico	Nanofibras de celulosa	(Fahma y otros, 2010)
	Generación de energía por gasificación de EBF	Energía	(Ariffin y otros, 2017)
Cáscaras de palmiste (OPS)	Biocompostaje mediante la aplicación de microorganismos	Biofertilizante	(Shawon Mahmud & Phin Chong, 2021)
	Elaboración de briquetas a partir de una mezcla de aserrín y cáscaras de palmiste trituradas	Briquetas	(Obi, 2015)
	Producción de hidrógeno, por medio de la gasificación utilizando vapor de la cáscara de palmiste	Hidrógeno	(Hussain y otros, 2017)
	Producción de bio-carbono poroso a partir de un proceso de pirolisis auto-sostenible	Biocarbón	(Osman y otros, 2022)
		Combustible	(Umar y otros, 2020)

Alternativas ambientales para el aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos agroindustriales provenientes de la palma de aceite (Elaeis guineensis).

Residuo	Método	Producto	Referencia
	Las cáscaras de palmiste por medio de gasificación son utilizadas como combustible para la producción de gas de síntesis		
	Para la fabricación de concreto de OPS, esta materia prima primero es sometida a un proceso de eliminación de impurezas y se combina con diferentes materiales	Hormigón de (OPS)	(Mannan & Ganapathy, 2004)
	Las cáscaras de palmiste son sometidas a un proceso de pirolisis en un horno anaeróbico a temperaturas entre los 500 a 800 °C durante 5 horas, obteniéndose el carbón insumo para la elaboración de las escobillas, utilizadas a nivel automotriz.	Escobillas de carbón	(Ugwu y otros, 2021)
<b>Fibras de palma prensadas (PFF)</b>	Elaboración de vermicompost con la mezcla del 50% del POME- y las fibras de palma de aceite (PFF)	Vermicompost	(Rupani y otros, 2017)
	Obtención de nanocristales de celulosa usando resina de intercambio catiónico	Nanocristales de celulosa	(Soo y otros, 2021)
<b>Destilado de ácidos grasos (PFAD)</b>	Esterificación del destilado de ácidos grasos de palma de aceite	Aceite base para biolubricante	( Soong Ng y otros, 2022)
	Obtención de biocombustible por reacciones de desoxigenación de destilados de ácidos grasos	Biocombustible	(Lam y otros, 2022)
	Extracción de fitoesteroles de PFAD, por medio de extracción en múltiples etapas extracción sólido-líquido, saponificación, extracción líquido-líquido y cristalización	Mezcla de fitoesteroles	( Nor Faizah y otros, 2020)
<b>Efluente de la fabricación de aceite de palma (POME)</b>	Producción de biogás mediante la digestión anaerobia del POME	Biogás	( Lok y otros, 2020)
	Obtención de biodiesel por ruta metabólica (bio-remediación) utilizando hongos oleaginosos	Biodiesel	(Athoillah & Ahmad, 2022)

**Nota:** Elaboración propia a partir de información artículos científicos.

Según la tabla 5, los residuos resultantes de la actividad agroindustrial de producción de palma de aceite tanto a nivel en campo como en las extractoras, debido a su composición tiene diversos usos y utilidades mediante la aplicación

de diferentes métodos, los cuales pueden proporcionar a esta biomasa un valor agregado y una alternativa de tratamiento diferente al compostaje; en este sentido se puede obtener bioenergía, biocombustibles, biomateriales (nanomateriales, carbón activado, biopellets),

Alternativas ambientales para el aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos agroindustriales provenientes de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*).

así como también extraer tanto de la biomasa como de los efluentes compuestos químicos como los tocoferoles y otros compuestos

utilizados en como insumo para fabricación de vitamina E (Gore & Bhagwat, 2022), además de compuestos lignocelulósicos como la celulosa comúnmente utilizada en la industria del papel.

Respecto a lo mencionado anteriormente, es importante resaltar que en país existe una pequeña proporción correspondiente a un 11% de plantas extractoras que han implementado sistemas de aprovechamiento para la extracción de gas metano liberado por los efluentes líquidos de la planta, que consiste en lagunas anaerobias emisoras de biogás (CH<sub>4</sub>), el cual es recirculado y usado como energía para la misma industria incluso 2 plantas de las 8 producen excedentes de energía, obteniendo de esta manera un ingreso adicional por la venta del mismo. En lo que se refiere a residuos de carácter sólido el 36% de las plantas extractoras presentes a nivel nacional cuentan con sistemas de compostaje, algunas lo comercializan y otras lo aplican como insumo orgánico para sus plantaciones (Fedepalma, 2022). Por lo tanto, se refleja que el sector palmero ha incorporado algunos métodos de tratamiento para sus residuos sólidos y líquidos, como medida para contrarrestar los impactos generados en el sector, pero a su vez todas las plantas de beneficio deberían aplicar el concepto de cero residuos y economía circular, puesto que al ser una de las actividades agrícolas más practicadas a nivel mundial cuentan con información científica suficiente para transformar su industria en una producción autosostenible y sustentable que incorpore nuevas tecnologías de aprovechamiento y tratamiento eficientes e innovadores para los residuos sólidos y líquidos; adicionalmente el uso de nuevas tecnologías debe tener en cuenta el análisis o viabilidad financiera así como también

el análisis de ciclo de vida (Alkarimiah y otros, 2022).

## Conclusiones

En síntesis, el cultivo de palma de aceite, así como también su beneficio en la agroindustria ha tenido una expansión o crecimiento considerable en el país, puesto que existen aproximadamente más de 500 mil hectáreas en producción y más de 600 mil hectáreas en total distribuidas en mayor proporción en la zona oriental, central y norte, en este aspecto es importante indicar que la información respecto a áreas totales y en producción registradas por Fedepalma difieren de otras entidades, por lo tanto se requiere la actualización de la información para tener una cuantificación lo más exacta posible del total de área con cultivos perennes de palma de aceite, en donde se incluya no solo los cultivos registrados en la entidad sino también aquellos que no lo están a fin de tener la cuantificación y especialización actualizada.

En relación a la generación de biomasa residual, según los cálculos realizados, se estima que en promedio el 72% de la producción de racimos de fruta fresca, se convierte en residuos, los cuales alcanzaron para el año 2021 una cantidad total de 5,531,746 toneladas, conformados por raquis, fibras de palma prensadas, cáscaras de palmiste y efluentes líquidos; adicionalmente a nivel de plantaciones también se produce una cantidad considerable de biomasa compuesta por hojas de palma y troncos de la misma resultantes de las actividades de poda que según estimaciones teóricas alcanzan anualmente 5'706,027 toneladas, la cual es desperdiciada y no se le efectúa ningún tipo de tratamiento.

Finalmente, según la revisión documental e investigativa realizada existe un buen potencial para el aprovechamiento no sólo de los residuos sólidos sino también los residuos líquidos, puesto que existe un amplio contenido e investigaciones científicas que lo respalda, en donde se sugiere

además de sistemas de compostaje, la obtención de energía (biogás, biocombustibles, hidrógeno, biodiesel, bioetanol, bioaceite), biomateriales (biocarbón, nanomateriales, biopellets, briquetas), bioactivos (fitoesteroles), pulpa de papel (celulosa), incluso se pueden fabricar filtros para tratar el POME con residuos como las fibras de la hoja de palma, reflejando de esta manera los múltiples usos y valores agregados que se pueden dar a los residuos resultantes del aprovechamiento de la palma de aceite; mediante la aplicación de diferentes tecnologías y métodos innovadores que minimizan los impactos ambientales.

En contraste, aunque en Colombia se han venido incorporando tratamientos para los residuos de la palma, el 64% de las plantas de beneficio no tratan los residuos sólidos y el 89% no controlan la emisión de GEI, por lo tanto, se requiere que el sector palmero tenga un compromiso claro hacia la transformación de su producción hacia una producción sostenible en donde se incorpore como factor clave la investigación y la innovación.

## Referencias

- Anima Antwi, L. A., Nimoh, F., Agyemang, P., & Akurugu Apike, I. (2023). Perception and adoption of free fatty acid reduction techniques by small scale palm oil processors: Evidence from Ghana. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100462>
- Lok, X., Chan, Y. J., & Foo, D. (2020). Simulation and optimisation of full-scale palm oil mill effluent (POME) treatment plant with biogas production. *Journal of Water Process Engineering*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101558>
- Mussatto, S. I., Ballesteros, L. F., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2012). Use of Agro-Industrial Wastes in Solid-State Fermentation Processes. En K.-Y. Show (Ed.), *Industrial Waste*. <https://www.intechopen.com/chapters/30860>
- Nor Faizah, J., Noorshamsiana, A. W., Wan Hasamudin, W. H., Astimar, A. A., Kamarudin, H., & Ab Gapor, M. T. (2020). Production of phytosterols mix from palm fatty acid distillate (PFAD) through multi-staged extraction processes. *Engineering Science and Technology*. 736. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/2/022047>
- Obi, O. F. (2015). Evaluation of the physical properties of composite briquette of sawdust and palm kernel shell. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 5, 271–277. <https://doi.org/10.1007/s13399-014-0141-7>
- Soong Ng, B. Y., Chyuan Ong, H., Nang Lau, H. L., Shafizah Ishak, N., Elfasakhany, A., & Voon Lee, H. (2022). Production of sustainable two-stroke engine biolubricant ester base oil from palm fatty acid distillate. *Industrial Crops and Products*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114224>
- Vargas Mira, A., Zuluaga García, C., & González Delgado, Á. D. (2019). A Technical and Environmental Evaluation of Six Routes for Industrial Hydrogen Production from Empty Palm Fruit Bunches. *ACS Omega*, 4(13), 15457-15470. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01683>
- Yahya, A., Khalid, N. A., & Salleh, M. M. (2022). Biocompost from Oil Producing Plants. En S. Abd Aziz, M. Gozan, M. F. Ibrahim, & L. Y. Phang (Edits.), *Biorefinery of Oil Producing Plants for Value-Added Products*. <https://doi.org/10.1002/9783527830756.ch30>
- Abdurahman, N. H., Rosli, R. M., & Azhari, N. H. (2013). La evaluación del desempeño de los métodos anaeróbicos para el tratamiento de efluentes de molinos de aceite de palma (POME): una revisión.

- En . W. Trevelyan Quinn (Ed.), *International Perspectives on Water Quality Management and Pollutant Control*. <https://doi.org/10.5772/54331>
- Agronet . (2021). *Red de información y comunicación del sector agropecuario colombiano*. Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo: Caso palma de aceite : <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Akpan Sunday , N. (2022). Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB) – Alternative Fibre Source for Papermaking. En H. Kamyab (Ed.), *Elaeis guineensis*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98256>
- Alkarimiah, R., Makhtar, M. M., Aziz, H. A., Vesilind, P. A., Wang, L. K., & Hung, Y. T. (2022). Energy Recovery from Solid Waste. En L. K. Wang, M. S. Wang, & Y. T. Hung (Eds.), *Solid Waste Engineering and Management. Handbook of Environmental Engineering* (págs. 231–297). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96989-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96989-9_5)
- Andreichenko, A., Andreichenko, S., & Smentyna, N. (2021). Ensuring Biosphere Balance in the Context of Agricultural Waste Management. *Philosophy and Cosmology*, 26, 46-61. <https://doi.org/10.29202/phil-cosm/26/4>
- Ariffin , M. A., Wan Mahmood, W. M., & Yramizi Mohamed , Z. H. (2017). Medium-scale gasification of oil palm empty fruit bunch for power generation. *Journal of Material Cycles and Waste Management* , 19, 1244–1252. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0518-8>
- Athoillah, A. Z., & Ahmad, F. B. (2022). Biodiesel Production from Bioremediation of Palm Oil Mill Effluent via Oleaginous Fungi. *Clean – Soil, Air, Water*, 50(4). <https://doi.org/10.1002/clen.202200025>
- Baruah, B. K. (2011). Agribusiness Management, its meaning, nature and scope, types of management tasks and responsibilities. (A. A. University, Ed.) <https://www.virtualpro.co/biblioteca/gestion-en-la-agroindustria-su-significado-naturaleza-y-alcances-tipos-de-tareas-y-responsabilidades-de-gestion>
- Borsellino, V. (2019). Agribusiness. En W. Leal Filho, A. Azul, L. Brandli, P. Özuyar, T. Wall, & C. Springer (Ed.), *Zero Hunger*. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-69626-3\\_1-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-69626-3_1-1)
- Cantão Freitas, L., Rodrigues Barbosa, J., Caldas da Costa, A. L., Figueiredo Bezerra, F. W., Holanda Pinto, R. H., & de Carvalho Junior, R. N. (2021). From waste to sustainable industry: How can agro-industrial wastes help in the development of new products? *Resources, Conservation and Recycling*, 169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105466>
- Coral Medina, J. D., Magalhães Júnior, A. I., Zamora, H. D., & Quijano Melo, J. D. (2019). Oil palm cultivation and production in South America: status and perspectives. *Biofuels, Bioprod. Bioref*, 13(5), 1202-1210. <https://doi.org/10.1002/bbb.2013>
- DANE. (2020). *Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2019*. Bogotá: Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena>
- DANE. (2022). *Economía Circular Sexto Reporte: 2022*. (C. A. Cely Ruiz, G. A. Quintero Hernández, & M. N. Dimaté Echeverry, Edits.) Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/ambientales/economia-circular/reportes-de-economia-circular>
- Dirkes, R., Neubauer, P. R., & Rabenhorst, J. (2021). Pressed sap from oil palm (*Elaeis guineensis*) trunks: a revolutionary growth medium for the biotechnological industry? *Biofuels, Bioprod. Bioref*, 15(3), 931-944. <https://doi.org/10.1002/bbb.2201>

- Djun Lee , M., Amirah Mohamad, N. F., Abu Hassan, N., & San Lee, P. (2021). Performance of Oil Palm Frond Fiber as Filtration Material in Palm Oil Mill Effluent Treatment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 690. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/690/1/012039>
- Dungani, R., Pingkan, A., Aprilia, S., Karnita , Y., Karliati, T., Suwandhi, I., & Sumardi, I. (2018). *Biomaterial from Oil Palm Waste: Properties, Characterization and Applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76412>
- Elbersen, W. (2013). Residuos de aceite de palma disponibles para la bioeconomía, junto con el reciclaje de nutrientes. *Palmas*, 34(Especial. Tomo II), 61.
- Erfani Jazi, M., Narayanan , G., Aghabozorgi, F., Farajidizaji , B., Aghaei, A., Kamyabi, M. A., Navarathna, C. M., & Mlsna, T. E. (2019). Structure, chemistry and physicochemistry of lignin for material functionalization. *SN Applied Sciences*, 1(Article number: 1094). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1126-8>
- Fahma, F., Iwamoto, S., Hori, N., Tadahisa, I., & Takemura, A. (2010). Isolation, preparation, and characterization of nanofibers from oil palm empty-fruit-bunch (OPEFB). *Cellulose*, 17, 977–985. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9436-4>
- Febriani, A., Syafriana, V., Afriyanto , H., & Djuhariah , Y. S. (2019). The Utilization of Oil Palm Leaves (*Elaeis guineensis* Jacq.) Waste as an Antibacterial Solid Bar Soap. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 572. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/572/1/012038>
- Fedepalma , & Cenipalma . (2001). *El cultivo de la palma de aceite y su beneficio. Guía para el nuevo palmicultor*. Bogotá: Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite y Centro de Investigación en Palma de Aceite.
- Fedepalma. (2007). *La Agroindustria de la Palma de Aceite en Colombia*. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite.
- Fedepalma. (2022). *Anuario Estadístico: Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo 2017-2021*. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/1620/178>
- Feofilova, E. P., & Mysyakina, I. S. (2016). Lignin: Chemical structure, biodegradation, and practical application (a review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 52(6), 559–569. <https://doi.org/10.1134/S0003683816060053>
- Gore, A. J., & Bhagwat, S. S. (2022). Separation of tocol (tocopherol & tocotrienol) and phytosterols from palm fatty acid distillate by saponification and purification by low temperature solvent crystallization. *Journal of Food Science and Technology*, 59, 2962–2971. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05402-7>
- Handique, S., Saha, A., Saikia, K. K., & Gogoi, N. (2023). Agriculture Wastes: Generation and Sustainable Management. En S. Singh, P. Singh, A. Sharma, & M. Choudhury (Edits.), *Agriculture Waste Management and Bioresource* (págs. 78-104). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119808428.ch4>
- Hassan, N., Abdullah, R., Khadiran, T., Elham, P., & Vejan , P. (2021). Biochar derived from oil palm trunk as a potential precursor in the production of high-performance activated carbon. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01797-z>
- Henson, I. E., & Chang, K. C. (2010). Evaluación del impacto de la producción de aceite de palma sobre el calentamiento global: (I) Un modelo de campo. *Palmas*, 31(3), 47-61.

- <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1496/1496>
- Hussain, M., Tufa, L. D., Yusup, S., Zabiri, H., & Taqvi, S. A. (2017). Aspen Plus® Simulation Studies of Steam Gasification in Fluidized Bed Reactor for Hydrogen Production Using Palm Kernel Shell. En M. Mohamed Ali, H. Wahid, N. Mohd Subha, S. Sahlan, M. Yunus, & A. Wahap (Edits.), *Modeling, Design and Simulation of Systems* (Vol. 751). Singapore: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6463-0\\_54](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6463-0_54)
- Idayu Tahir, N., Shaari, K., Abas, F., Ahmad Parveez, G. K., Ishak, Z., & Salamah Ramli, U. (2012). Characterization of Apigenin and Luteolin Derivatives from Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) Leaf Using LC–ESI-MS/MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(45), 11201-11210. <https://doi.org/10.1021/jf303267e>
- Isogai, A. (2014). Cellulose. En S. Kobayashi, & K. Müllen (Edits.), *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials* (págs. 1–11). Heidelberg, Berlin: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9\\_320-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9_320-1)
- Lam, J. E., Rahman Mohamed, A., Kay Lup, A. N., & Koh, M. K. (2022). Palm fatty acid distillate derived biofuels via deoxygenation: Properties, catalysts and processes. *Fuel Processing Technology*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107394>
- López Macías, F. J., & Castrillón, P. (2009). *Evolución y desarrollo de la agroindustria (AI), en Colombia*. Universidad de Manizales. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/evolucion-y-desarrollo-de-la-agroindustria-ai-en-colombia>
- Mannan, M. A., & Ganapathy, C. (2004). Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS). *Building and Environment*, 38(4). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.10.007>
- Maulina, S., & Anwari, F. N. (2018). Utilization of oil palm fronds in producing activated carbon using Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> as an activator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 309. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012087>
- Mohanty, A., Prangya Ranjan, R., Dubey, B., Singh Meena, S., Pal, P., & Goel, M. (2022). A critical review on biogas production from edible and non-edible oil cakes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12, 949–966. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01292-5>
- Norhazimah, A. H., Siti, F., Aida, M., Dilaeleyana, A. B., & Nur Shahirah, M. A. (2020). Direct Fermentation of Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Trunk Sap to Bioethanol by *Saccharomyces cerevisiae*. *2nd International Conference on Materials Technology and Energy 6-8 November 2019, Miri, Sarawak, Malaysia*. 943. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/943/1/012012>
- Ofori Boateng, C., & Lee, K. T. (2013). Sustainable utilization of oil palm wastes for bioactive phytochemicals for the benefit of the oil palm and nutraceutical industries. *Phytochemistry Reviews*, 12(1), 173–190. <https://doi.org/10.1007/s11101-013-9270-z>
- Okolie, J. A., Nanda, S., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2021). Chemistry and Specialty Industrial Applications of Lignocellulosic Biomass. *Waste and Biomass Valorization*, 12(5), 2145–2169. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01123-0>
- Olatunji, K. O., Ahmed, N. A., & Ogunkunle, O. (2021). Optimization of biogas yield from lignocellulosic materials with different pretreatment methods: a review. *Biotechnology for Biofuels*, 14(159). <https://doi.org/10.1186/s13068-021-02012-x>
- Osman, M. S., Ting, D. S., & Cheong, K. Y. (2022). Development of self-sustainable

- pyrolysis system to produce porous biochar from palm kernel shell. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02668-x>
- PNUMA. (2021). *Informe sobre el índice de desperdicio de alimentos 2021*. Nairobi : Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. <https://www.unep.org/resources/report/unep-food-waste-index-report-2021>
- Poku, K. (2002). *Small-Scale Palm Oil Processing in Africa*. FAO Agricultural Services Bulletin 148, Food and Agriculture Organization Of The United Nations, Roma. <https://www.fao.org/3/Y4355E/y4355e00.htm#Contents>
- Rahayu , D. E., Karnaningroem, N., Altway , A., & Slamet, A. (2021). Utilization of oil palm empty fruit bunches biomass through slow pyrolysis process. *4th International Conference on Bioscience and Biotechnology 16-18 August 2021, Indonesia (Virtual)*. 913. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/913/1/012018>
- Ribeiro Martins, J., Manabu Abe, M., & Brienzo, M. (2022). Chemical Modification Strategies for Developing Functionalized Hemicellulose: Advanced Applications of Modified Hemicellulose. En M. Brienzo (Ed.), *Hemicellulose Biorefinery: A Sustainable Solution for Value Addition to Bio-Based Products and Bioenergy*. *Clean Energy Production Technologies*. (págs. 171–205). Singapore: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3682-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3682-0_6)
- Romero Peláez, R. D., Chaves Oliveira, M. E., Gerard Miller, R. N., Moreira de Almeida, J. R., & Gonçalves de Siqueira, F. (2022). Biotechnological valorization of lignocellulosic residues from the oil palm industry: status and perspectives. *Biomass Conversion and Biorefinery* . <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02637-4>
- Rupani, P. F., Embrandiri, A., & Ibrahim, M. H. (2017). Recycling of palm oil industrial wastes using vermicomposting technology: its kinetics study and environmental application. *Environmental Science and Pollution Research* , 24, 12982–12990. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8938-0>
- Samanta, P., Senapati, T., Dey, S., & Ghosh, A. R. (2023). An Overview of Biomass Conversion from Agricultural Waste. En S. Singh, P. Singh, A. Sharma, & M. Choudhury (Edits.), *Agriculture Waste Management and Bioresource* (págs. 46-77). John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119808428.ch3>
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro. *Biotecnología*, 16(2), 14-46. [https://smbb.mx/wp-content/uploads/2017/10/Revista\\_2012\\_V16\\_n2.pdf](https://smbb.mx/wp-content/uploads/2017/10/Revista_2012_V16_n2.pdf)
- Shawon Mahmud, M., & Phin Chong, K. (2021). Formulation of biofertilizers from oil palm empty fruit bunches and plant growth-promoting microbes: A comprehensive and novel approach towards plant health. *Journal of King Saud University - Science*, 33(8). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101647>
- Sispa . (2021). *Sistema de Información Estadística del Sector Palmero*. Evolución histórica del número de municipios con cultivos de Palma de Aceite en Colombia: <http://sispaweb.fedepalma.org/sispaweb/default.aspx?Control=Pages/areas>
- Soo, Y. T., Ng, S. W., Tang, T. K., Ab Karim, N. A., Phuah, E. T., & Lee, Y. Y. (2021). Preparation of palm (*Elaeis oleifera*) pressed fibre cellulose nanocrystals via cation exchange resin: characterisation and evaluation as Pickering emulsifier. *Science of Food and Agriculture*, 101(10), 4161-4172. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11054>
- Tan, Y. A., Sambanthamurthi, R., Sundram, K., & Wahid, M. B. (2007). Valorisation of

- palm by-products as functional components. *European Journal of Lipid Science and Technology* , 109(4), 380-393.  
<https://doi.org/10.1002/ejlt.200600251>
- Trevors, J., & Saier, M. (2010). AgriBusiness versus AgriCulture. *Agua Aire Suelo Contaminación* , 205((Suplemento 1)), 35–36.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11270-007-9431-z>
- Ugwu, S. C., Inegbenebor, A. O., Fayomi, O., & Udoye, N. E. (2021). Preparation of Carbon Brushes from Agro-Waste Materials Palm Kernels Shells for Automobile Industry. *International Conference on Engineering for Sustainable World (ICESW 2020) 10th-14th August 2020, Ota, Nigeria*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1107/1/012188>
- Umar, H. A., Sulaiman, S. A., Ahmad, R. K., & Tamili, S. N. (2019). Characterisation of oil palm trunk and frond as fuel for biomass thermochemical. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 863.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/863/1/012011>
- Umar, H. A., Sulaiman, S. A., Said, M., & Ahmad, R. K. (2020). Palm Kernel Shell as Potential Fuel for Syngas Production. En S. S. Emamian, M. Awang, & F. Yusof (Edits.), *Advances in Manufacturing Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore: Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-15-5753-8\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5753-8_25)
- Uraki, Y., & koda , k. (2014). Lignin. En S. Kobayashi , & K. Müllen (Edits.), *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*. Heidelberg, Berlin : Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9\\_325-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9_325-1)
- Vandamme , E. J. (2009). Agro-Industrial Residue Utilization for Industrial Biotechnology Products. En P. Nigam, & A. Pandey (Edits.), *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation* (Vol. 56, págs. 3-11). Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9942-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9942-7_1)
- Wahab, R., Mat Rasat, M. S., Mohd Fauzi, N., Saiful Sulaiman, M., Samsi, H. W., Mokhtar, N., Mohd Ghani , R. S., & Haziq Razak, M. (2022). Processing and Properties of Oil Palm Fronds Composite Boards from *Elaeis guineensis*. En H. Kamyab (Ed.), *Elaeis guineensis*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98222>
- Wistara , N. J., Diputra, P., & Hendra, P. (2021). Biopellet from demineralized oil palm trunk. *The 13th International Symposium of Indonesian Wood Research Society 2 September 2021, Mataram, Indonesia*. 891. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/891/1/012022>
- Yafetto, L., Tawia Odamttan, G., & Wiafe-Kwagyan, M. (2023). Valorization of agro-industrial wastes into animal feed through microbial fermentation: A review of the global and Ghanaian case. *Heliyon*, 9(4).  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14814>