

**MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LA VALORACIÓN DE
RESIDUOS Y SUBPRODUCTOS DEL SECTOR PALMICULTOR
DE CASANARE**

PEDRO ANTONIO CARDENAS BEJARANO



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
MAESTRÍA EN DESARROLLO SUSTENTABLE Y GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.**

2022

**MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LA VALORACIÓN DE
RESIDUOS Y SUBPRODUCTOS DEL SECTOR PALMICULTOR
DE CASANARE**

Investigador

Ing. PEDRO ANTONIO CARDENAS BEJARANO

Director

PhD. JUAN PABLO RODRIGUEZ MIRANDA

Tesis presentada para optar al título de

MAGISTER EN DESARROLLO SUSTENTABLE Y GESTIÓN AMBIENTAL

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
MAESTRÍA EN DESARROLLO SUSTENTABLE Y GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.**

2022

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., febrero 23 del 2022

AGRADECIMIENTOS

El autor comunica sus agradecimientos:

A Dios y a la vida por permitir realizar la investigación de forma satisfactoria.

A mi madre, padre, hermana, tíos, primos y novia por ser apoyo en el proceso de formación académica, social y espiritual, quienes contribuyeron como guías para la toma de decisiones y solventar las diferentes dificultades.

Al docente Juan Pablo Rodríguez Miranda, en rol de director del presente trabajo, quien contribuyó con aportes significativos para orientar el proceso académico y de investigación.

A cada uno de los docentes de la maestría y docentes de otras facultades e instituciones académicas que aportaron conocimientos en diferentes áreas para formar un profesional con visión interdisciplinaria para abordar diferentes asuntos ambientales y sociales.

A la maestría de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental, a la facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y a la Universidad Francisco José de Caldas por brindar las capacidades técnicas e infraestructura para formar un profesional, un ser humano y un investigador.

A mis compañeros de la maestría, es especial a David y Marisol, quienes brindaron espacios para dialogar diferentes temáticas, nutrir el conocimiento y desarrollar trabajos e investigaciones con resultados muy confortables.

A mis amigos Iván, Roberto, Lewko, Pablo y Alexander, quienes desde la distancia estuvieron en la disposición de ser fuente de apoyo y motivación en las diferentes fases del proyecto de investigación.

CONTENIDO

| | <i>Pg.</i> |
|---|------------|
| RESUMEN | 10 |
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 12 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 14 |
| 3. OBJETIVOS..... | 16 |
| 3.1. Objetivo general..... | 16 |
| 3.2. Objetivos Específicos..... | 16 |
| 4. MARCOS DE REFERENCIA..... | 17 |
| 4.1. Marco teórico y conceptual..... | 17 |
| 4.1.1. <i>Relación del desarrollo económico con la economía circular</i> | <i>17</i> |
| 4.1.2. <i>Relación del desarrollo sostenible con la economía circular</i> | <i>18</i> |
| 4.1.3. <i>Economía circular</i> | <i>20</i> |
| 4.1.4. <i>Palma de aceite, residuos y subproductos del proceso de extracción de aceite</i> | <i>23</i> |
| 4.1.5. <i>Problemas socioambientales asociados a la agroindustria a nivel mundial</i> | <i>25</i> |
| 4.1.6. <i>Valoración de residuos de palma de aceite</i> | <i>26</i> |
| 4.2. Técnicas y experiencias internacionales y nacionales en economía circular. | 28 |
| 4.2.1. <i>Técnicas y métodos en el área de investigación</i> | <i>28</i> |
| 4.2.2. <i>Experiencias internacionales y nacionales.....</i> | <i>33</i> |
| 4.3. Marco geográfico | 38 |
| 4.4. Marco legal | 40 |
| 5. METODOLOGÍA | 41 |
| 5.1. Métodos e instrumentos | 42 |
| 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 52 |
| 6.1. Variables y constantes de los residuos y subproductos del sector palmicultor que se generan en el proceso de transformación de RFF en plantas de beneficio del departamento de Casanare..... | 52 |
| 6.1.1. <i>Transformación de RFF con los respectivos procesos, entradas y salidas</i> | <i>52</i> |
| 6.1.2. <i>Características físicas y químicas de residuos y subproductos de palma de aceite</i> | <i>58</i> |
| 6.1.3. <i>Identificación y evaluación de los impactos ambientales asociados a los residuos y/o subproductos de RFF</i> | <i>63</i> |
| 6.1.4. <i>Producción de residuos y subproductos en el departamento de Casanare según constantes de producción determinados</i> | <i>66</i> |

| | |
|--|------------|
| 6.2. Enfoques y variables utilizados en la valoración de residuos y subproductos del sector palmicultor que se generan en el proceso transformación de RFF..... | 69 |
| 6.2.1. <i>Enfoques de valoración de residuos y subproductos de aceite de palma.</i> | 70 |
| 6.2.2. <i>Valoración económica de los enfoques de aprovechamiento de residuos y subproductos bajo el método de costos evitados.</i> | 78 |
| 6.3. Modelo de economía circular para la reincorporación de residuos y subproductos del sector palmicultor del departamento de Casanare. | 85 |
| 6.3.1. <i>Indicador de Reincorporación de Residuos y Subproductos por Flujo de Materiales – RRSMF, del sector palmicultor del departamento de Casanare</i> | 85 |
| 6.3.2. <i>Indicador Huella de Carbono de la Reincorporación de Residuos y Subproductos – HCRRS, del sector palmicultor del departamento de Casanare..</i> | 90 |
| 7. CONCLUSIONES..... | 92 |
| 8. RECOMENDACIONES..... | 94 |
| REFERENCIAS..... | 95 |
| ANEXO | 117 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. <i>La taxonomía propuesta de metodologías basadas en índices de EC</i> | 29 |
| Tabla 2. <i>Resumen de indicadores EC pertinentes para el proyecto de investigación</i> | 30 |
| Tabla 3. <i>Metodologías de evaluación ambiental y requisitos CE</i> | 32 |
| Tabla 4. <i>Experiencia internacionales y nacionales con relación a la implementación del modelo de economía circular en diferentes escalas geográficas</i> | 33 |
| Tabla 5. <i>Localización geográfica de las plantas de beneficio de CPO en el departamento de Casanare para el año 2019</i> | 38 |
| Tabla 6. <i>Legislación relacionada al tema de investigación</i> | 40 |
| Tabla 7. <i>Resumen de métodos e instrumentos empleados en la formulación del modelo de economía circular para la valoración de residuos y subproductos del sector palmicultor del departamento de Casanare</i> | 42 |
| Tabla 8. <i>Fuentes de información que se emplearon para la investigación</i> | 43 |
| Tabla 9. <i>Matriz de importancia para la evaluación de impactos</i> | 44 |
| Tabla 10. <i>Orden de importancia detectado en relación a la valoración de residuos y subproductos de palma de aceite a nivel mundial en base de datos</i> | 45 |
| Tabla 11. <i>Resumen de costos generados en cada alternativa convencional y alternativa de economía circular de la agroindustria de palma de aceite y su respectivo costo de tratamiento y/o disposición</i> | 47 |
| Tabla 12. <i>Matriz para el análisis de las variables cuantitativas de RRSFM</i> | 49 |
| Tabla 13. <i>Orden de importancia detectado en relación a la huella de carbono en residuos y subproductos de la transformación de RFF a nivel mundial en base de datos</i> | 50 |
| Tabla 14. <i>Cuantificación de residuos y subproductos derivados de procesar una tonelada de RFF</i> | 56 |
| Tabla 15. <i>Composición química y física de los residuos y subproductos generados en la fase de transformación del RFF</i> | 59 |
| Tabla 16. <i>Comparación de la composición física y química de POME de las agroindustrias del departamento de Casanare frente a referentes teóricos</i> | 61 |
| Tabla 17. <i>Parámetros físicos y químicos posterior al tratamiento de POME en las agroindustrias de Casanare</i> | 62 |
| Tabla 18. <i>Evaluación de factores ambientales en relación a los procesos fuentes de generación de residuos y subproductos de RFF</i> | 64 |
| Tabla 19. <i>Proyección de residuos y subproductos del departamento de Casanare según coeficientes de producción</i> | 67 |
| Tabla 20. <i>Correlación entre las principales variables productivas relacionadas con la generación de residuos y subproductos del departamento de Casanare</i> | 68 |
| Tabla 21. <i>Resumen de constante o coeficiente de generación de residuos y/o subproductos palma de aceite (% peso húmedo y peso seco)</i> | 69 |
| Tabla 22. <i>Concentraciones de tendencias claves para la valoración de residuos y subproductos de planta de beneficio de palma de aceite</i> | 71 |
| Tabla 23. <i>Potencial energético de residuos y subproductos de RFF del departamento de Casanare</i> | 81 |
| Tabla 24. <i>Costos evitados por la implementación de enfoques de aprovechamiento en residuos y subproductos de palma de aceite en el departamento de Casanare</i> | 84 |
| Tabla 25. <i>Generación total (Gt), aprovechamiento actual (Ac), aprovechamiento potencial (Ap) de residuos y subproductos de palma de aceite del departamento de Casanare por agroindustria o planta de beneficio</i> | 87 |
| Tabla 26. <i>Factores de emisión de residuos y subproductos de palma de aceite según el tipo de alternativo o disposición</i> | 90 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. <i>Plantas de beneficio del departamento de Casanare identificadas en el año 2019.</i> | 39 |
| Figura 2. <i>Visualización gráfica del transporte del RFF a plantas de beneficio. Fuente: Clúster de Agroindustrias del Casanare.</i> | 53 |
| Figura 3. <i>RFV (EFB) a cielo abierto y Sistema de tratamiento de aguas POME.</i> | 54 |
| Figura 4. <i>Flujo de procesos con las respectivas entradas y salidas.</i> | 55 |
| Figura 5. <i>Diagrama de entradas y salidas de materia en el proceso de transformación de 1 tonelada de RFF.</i> | 57 |
| Figura 6. <i>Tendencia de producción de residuos y subproductos de RFF (2013 – 2019).</i> .. | 66 |
| Figura 7. <i>Concentración de enfoques de aprovechamiento según el tipo de residuo y/o subproducto de palma de aceite.</i> | 73 |
| Figura 8. <i>Concentración de enfoques tecnológicos para la valoración de residuo y/o subproducto de palma de aceite.</i> | 74 |
| Figura 9. <i>Comparación de costo de producción de una t CPO y t RFF en pesos.</i> | 79 |
| Figura 10. <i>Diagrama de transformación de EFB y POME de palma de aceite bajo el enfoque de fuente de nutrientes (compostaje). Adaptado de Leng et al., (2010).</i> | 82 |
| Figura 11. <i>Representación gráfica de los costos evitados por la implementación de alternativas en la valoración de residuos y subproductos de palma de aceite en el departamento de Casanare.</i> | 84 |
| Figura 12. <i>Porcentaje o grado de aprovechamiento actual de residuos y subproductos de palma de aceite en agroindustrias del departamento de Casanare.</i> | 86 |
| Figura 13. <i>Comparación del modelo de economía circular bajo el escenario actual y potencial de reincorporación de residuos y subproductos de palma de aceite del departamento de Casanare.</i> | 88 |
| Figura 14. <i>Indicador RRSFM actual y potencial de las agroindustrias del departamento de Casanare bajo el enfoque de Flujos de Materiales.</i> | 89 |
| Figura 15. <i>Estimación del indicador HCRRS – emisión CO₂eq de los momentos diagnosticados por el indicador RRSFM.</i> | 91 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| Ecuación 1. <i>Fórmula general de costos evitados</i> | 47 |
| Ecuación 2. <i>Coficiente del aprovechamiento actual de la variable analizada. Fuente: Modificado de Salguero-Puerta et al., (2019).</i> | 48 |
| Ecuación 3. <i>Determinación del indicador RRSFM del momento actual. Fuente: Modificado de Salguero-Puerta et al., (2019).</i> | 48 |
| Ecuación 4. <i>Coficiente del aprovechamiento potencial de la variable analizada. Fuente: Modificado de Salguero-Puerta et al., (2019).</i> | 48 |
| Ecuación 5. <i>Determinación del indicador RRSFM del momento potencial. Fuente: Modificado de Salguero-Puerta et al., (2019).</i> | 49 |
| Ecuación 6. <i>Determinación del indicador RRSFM. Fuente: Modificado de Salguero-Puerta et al., (2019).</i> | 49 |
| Ecuación 7. <i>Determinación indicador RRSFM normalizado. Fuente: Modificado de Salguero-Puerta et al., (2019).</i> | 49 |
| Ecuación 8. <i>Determinación del coeficiente de aprovechamiento de residuos y subproductos.</i> | 50 |
| Ecuación 9. <i>Emisión de CO₂eq acorde al aprovechamiento de residuos y subproductos.</i> 50 | |
| Ecuación 10. <i>Determinación de la Huella de Carbono del indicador Reincorporación de Residuos y Subproductos por Otro ciclo de vida basado (HCRRS).</i> | 51 |

GLOSARIO

CPO: Crude Palm Oil, abreviatura en inglés de Aceite de Palma Crudo.

EC: Economía Circular.

EFB: Empty Fruit Bunch, abreviatura en inglés de Racimo de Fruto Vacío (RFV).

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

HCRRS: Huella de Carbono de Reincorporación de Residuos y Subproductos.

LCA: Life Cycle Assessment, abreviatura en inglés de Análisis de Ciclo de Vida.

POME: Palm Oil Mill Effluent, abreviatura en inglés de efluentes del proceso del molino de palma aceite.

RFF: Racimo de Fruto Fresco, siglas en inglés FFB (Fresh Fruit Bunch)

RRSFM: Reincorporación de Residuos y Subproductos por Flujo de Materiales.

RESUMEN

La Economía Circular (EC) promueve la reutilización, reincorporación y valoración de residuos y subproductos bajo el marco del desarrollo sostenible por medio de modelos e indicadores que evalúan escenarios de aprovechamiento de segundo uso y reducción de salidas no incorporadas para disminuir las externalidades negativas y presiones sobre las dimensiones del desarrollo. Lo anterior se demostró por medio del modelo de economía circular para la valorización de residuos y subproductos del sector palmicultor del departamento de Casanare desarrollado en la presente investigación. Inicialmente, se determinó las variables (procesos) que influyen en la generación de residuos y subproductos en la fase de transformación del Racimo de Fruto Fresco (RFF), tales como esterilización, extracción, digestión o prensado, clarificación, centrifugado, desfibración y trituración, los cuales generan una constante de salidas posterior de procesar una tonelada de RFF, correspondientes a Racimo de Fruta Vacía (EFB) ($22,48\% \pm 0,8$), fibra ($15,58\% \pm 0,49$), cascarilla ($6,03\% \pm 0,66$) y ceniza ($0,55\% \pm 1,67$). Ya que estos residuos y subproductos presentan unas condiciones físicas y químicas determinadas, fue necesario comparar sus características con otras investigaciones por medio de una revisión sistemática, con la finalidad de establecer la línea base para determinar los enfoques y variables de valoración de residuos y subproductos acorde al contexto local. Posterior, se determinó los principales enfoques de valoración de los residuos y subproductos a través de la revisión sistemática, cuyo resultado reveló el orden de importancia de implementación de los enfoques de aprovechamiento tales como biocombustibles (39%), actividad enzimática (35%), fuente de nutrientes (15%), construcción (7%), y entre otros (4%), que se apoyan en procesos físicos, químicos, biológicos y/o combinación de los anteriores, para incorporar la materia y energía a procesos fuentes u otros procesos de otras cadenas productivas. A partir de los enfoques de aprovechamiento, se estimó el costo de cuatro alternativas de incorporación o reducción de los residuos y subproductos, por medio de la metodología de costos evitados, que reveló un valor de \$2.714.886.003 pesos, producto del aprovechamiento total de las salidas bajo los enfoques de bioenergía y fuente de nutrientes. Por último, se construyó un modelo de economía circular fundado en indicadores de Flujo de Materiales (*Reincorporación de Residuos y Subproductos por Flujo de Materiales - RRSFM*) y Otro ciclo de vida basado (*Huella de Carbono de Reincorporación de Residuos y Subproductos - HCRRS*). El indicador RRSFM reflejó un nivel actual del 72% y un grado de mejora del 26% al 2026, paralelamente, el indicador HCRRS determinó una reducción del 57,1%, 59,6% y 82,8% de emisión de t CO_{2eq} producto del comparativo de escenarios de aprovechamiento y reincorporación de residuos y subproductos de palma de aceite de las agroindustrias del departamento de Casanare.

Palabras claves: economía circular, residuos y subproductos, palma de aceite, modelo, aprovechamiento, valoración, agroindustria.

INTRODUCCIÓN

La Economía Circular (EC) es un enfoque interdisciplinar que promueve la reutilización, reincorporación y valoración de los residuos y subproductos con el fin de disminuir las presiones relacionadas a las dimensiones del desarrollo bajo diferentes estrategias que recirculan la energía y la materia bajo un enfoque de segundo uso en procesos fuentes o complementarios (Barros, Salvador, de Francisco, & Piekarski, 2020; Kirchherr, Reike, & Hekkert, 2017). Algunos autores afirman que la EC contribuye a propiciar espacios de desarrollo sostenible, ya que genera la disminución de externalidades negativas a través de la integración equilibrada de las dimensiones por medio de la innovación, adaptación y la gestión ambiental (Korhonen, Honkasalo, & Seppälä, 2018; Rossi, Bertassini, dos Santos Ferreira, do Amaral, & Ometto, 2019; Velenturf & Purnell, 2021).

Las agroindustrias de palma de aceite presentan debilidades en las dimensiones del desarrollo sostenible, ya que la producción de aceite de palma crudo y aceite palmiste generan tasas significativas de residuos y subproductos en diferentes fases, en especial en el proceso de transformación de Racimos de Fruto Fresco (RFF). Esto se debe a las fallencias productivas y baja capacidad instalada para incorporar los residuos y subproductos (Poh, Wu, Lam, Poon, & Lim, 2020b; Sath, Duhan, & Duhan, 2018; Yusuf, 2017), que se agrava por la ausencia de estrategias que permitan evaluar el beneficio de incorporar las salidas a las dimensiones del desarrollo (Moraga et al., 2019; Ramos, Zilber, Silva, Lhama, & Davila, 2019).

Los principales residuos y subproductos del proceso resaltado corresponde a Racimos de Fruta Vacía (EFB), fibra, cascarilla, ceniza y efluentes del proceso del molino de palma aceite (POME), que posterior de procesar una tonelada de RFF, se genera aproximadamente $446,4 \pm 2.1$ kg de residuos y subproductos correspondientes a 220kg de EFB, 150kg de fibra, 70kg de cascarilla, $0,8\text{m}^3$ de POME y otros subproductos en menores proporciones (Anaya & Molina, 2018; Loh, 2017; Poh, Wu, Lam, Poon, & Lim, 2020a; Sukiran, Abnisa, Daud, Abu Bakar, & Loh, 2017). Al escalar la medida de generación de salidas del proceso de mencionado con relación a la tasa de RFF/año, se evidencia un volumen significativo de residuos y subproductos, no obstante a nivel global solamente el 23% presenta algún grado de aprovechamiento, y el remante es abandonado en sitio (Rubinsin et al., 2020; Umar, Urme, & Jennings, 2018). Dicho contexto genera contaminación de cuerpos de agua, emisiones atmosféricas, alteración del paisaje, acidificación del suelo, lixiviados y afectación a la salud humana (Elias, Hadibarata, & Sathishkumar, 2021; Van Fan, Lee, Lim, Klemeš, & Kim Le, 2019).

El modelo de economía circular desarrollado en la presente investigación propone una estrategia para corregir las deficiencias del sector agroindustrial de palma de aceite previamente resaltadas, ya que diagnostica los procesos fuentes y valora los residuos y subproductos bajo un enfoque de segundo uso (aprovechamiento), con la finalidad de establecer dos indicadores cuantitativos que estiman la incorporación de salidas por el enfoque de Flujos de Materiales y la huella de carbono a través del enfoque Otro ciclo de vida basado, aplicado y ajustado al ecosistema de trabajo de las agroindustrias del departamento de Casanare. Adicional, las estrategias desarrolladas en el modelo desincentivan el uso del vertedero y vertimientos que afectan a las dimensiones del desarrollo, y a la vez, suscita escenarios de desarrollo sostenible que disminuye las presiones al entorno local.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde mediados del siglo XX hasta la actualidad se registran incrementos anuales de demanda de lubricantes, cosméticos, biocombustibles, alimentos y productos industriales derivados de la transformación de materias primas o commodity, principalmente de cultivos de palma de aceite, soja, canola, girasol, coco, maíz y algodón (Khatiwada, Palmén, & Silveira, 2021; USDA, 2021; WOO, 2020). Este comportamiento del mercado ha favorecido al establecimiento de agroindustrias orientadas a la transformación de materias primas producto de procesos fotosintéticos para generar bienes y servicios. La producción de materia orgánica global derivada de procesos fotosintéticos oscila aproximadamente en 155 billones t/año, no obstante, la transformación y consumo es una mínima fracción, por lo que su mayoría se convierte en residuos y subproductos no comestibles o aprovechables de primer uso por ausencia de estrategias de incorporación de salidas (Cury, Aguas, Martínez, Olivero, & Chams, 2017; Ramos et al., 2019; Vargas & Pérez, 2018; Zuin & Ramin, 2018), lo que se traduce en una fuente de contaminación ambiental que influye fuertemente en la salud de los ecosistemas y en definitiva en la comunidad humana por transferencia de externalidades negativas, por ejemplo, la agroindustria de palma de aceite (Meijjaar et al., 2020; Mora-Villalobos et al., 2021; Yusuf, 2017).

La agroindustria de palma de aceite a nivel mundial elevó la producción de 15,2 millones de toneladas CPO¹ en 1995 a 76,38 millones de toneladas en mayo de 2021 (European Palm Oil Alliance, 2016; USDA, 2021, p. 32), correspondiente al mayor registro de producción que superó el pico máximo del 2018. Del total de producción mundial, Colombia aporta el 2,2%, equivalente a 1,65 millones de toneladas de CPO, lo que convierte a Colombia en el cuarto productor a nivel mundial y el primero a nivel América (Ortiz, 2019; USDA, 2021). Dicha posición mundial es resultado del área sembrada en Colombia, que desde el 1962 registró 5 mil hectáreas (Fedepalma, 2018c) hasta presentar un área actual de 590.188 hectáreas para el año 2020 (Fedepalma, 2021).

La zona oriental (clúster al que pertenece el departamento de Casanare) registró 225.097 hectáreas para el año 2020, con un incremento del 2,01% y 1% de área sembrada con respecto al año 2018 y 2019 respectivamente (MinAgricultura, 2020), cuyo valor equivale al 41% de la nueva área sembrada para el periodo 2018-2019 (Fedepalma, 2019a, 2020a). Esta zona productiva es relevante dado que representa el 41,8% de la producción nacional de CPO (Fedepalma, 2020a). Al escalar al departamento de Casanare, se evidencia que el 25,16% del área sembrada de la zona oriental se localiza en dicho espacio geográfico, no obstante, obtiene un registro atípico de producción equivalente a 3.6 ± 0.2 t CPO/ha por encima del promedio nacional (3.15 t CPO/ha), lo que conlleva a aportar alrededor del 11% de la producción nacional (Fedepalma, 2018a, 2019a, 2020a, 2020b).

Aunque este escenario es sobresaliente para las dimensiones del desarrollo, presenta debilidades en los procesos de transformación, lo que fomenta una alta tasa de residuos y subproductos con pérdida del valor agregado e incorporación a procesos fuentes o complementarios. Los residuos y subproductos de la agroindustria de palma de aceite se generan principalmente en la producción de CPO y PKO (aceite palmiste), producto del aprovechamiento del Racimo de Fruto Fresco (RFF) con incorporación de materia y energía externa al sistema.

¹ Aceite de Palma Crudo, CPO siglas en ingles.

En el procesamiento RFF se generan residuos líquidos, residuos sólidos orgánicos y subproductos sólidos, principalmente en el proceso de desfrutado, centrifugado y trituración (Hau et al., 2020; Ong, Mo, Alengaram, Jumaat, & Ling, 2017; Poh et al., 2020b). Algunos investigadores cuantificaron la masa de residuos y subproductos respecto a una tonelada de RFF procesado, y como resultado encontraron que aproximadamente se generan $446,4 \pm 2.1$ kg de residuos sólidos orgánicos y $0,8\text{m}^3$ de efluente residual (Anaya & Molina, 2018; Loh, 2017; Sukiran et al., 2017). Basado en la proporción de residuos y subproductos resaltados, producción CPO Casanare 2020 y tasa de producción de tonelada de RFF/ha², se generarían 23.254,45m³ de efluente residual y 48.396,04 t de residuos sólidos orgánicos para el año en mención.

La disposición y tratamiento son primordiales para los actores antrópicos y ecológicos del entorno agroindustrial dado al alto volumen de generación de residuos y subproductos. Umar et al. (2018), identificaron que solo el 23% de los residuos y subproductos son empleados como fuente de combustible en calderas, y el remanente es abandonado en sitio (Rubinsin et al., 2020). Lo anterior genera escenarios de contaminación de cuerpos de agua, emisiones atmosféricas, alteración del paisaje, acidificación del suelo, lixiviados y afectación a la salud humana (Elias et al., 2021; Van Fan et al., 2019).

La disposición del volumen de residuos agroindustriales de palma de aceite se puede clasificar según su afectación a la dimensión ambiental, tales como impacto negativo crítico en el manejo de residuos sólidos orgánicos que se generan en los procesos de desfrutado y digestión, y material particulado generado en desfrutado, prensado y pirólisis de materia orgánica; impacto negativo severo por la emisión de vapor caliente en esterilización, y efluente residual en los procesos de clarificación y tratamiento de efluentes; e impacto positivo en la generación de residuos aprovechables (Extractora el Roble S.A.S, 2016, p. 49-51).

Así mismo, los residuos y subproductos agroindustriales de palma de aceite no afectan únicamente a la dimensión económica y ambiental como se ha referenciado previamente, sino a los actores del sector palmicultor, es decir, la dimensión social (Qaim, Sibhatu, Siregar, & Grass, 2020). La mayor afectación se evidencia en la incertidumbre de abastecimiento, del calidad del aire y del agua, lo que se agrava en periodos secos agudizados por episodios de El Niño (Dislich et al., 2017). La afectación del bienestar social no se limita al espacio geográfico de la planta procesadora, sino al contrario, se explaye por efecto de escorrentía y dirección del viento, lo que afecta a un mayor radio (Awuku & Asamoah, 2020).

A causa de los aspectos previamente resaltados que impactan al sistema socioecológico como la alteración de la capacidad productiva del sustrato, eutrofización de cuerpo de agua, afectación a la salud de la población aledaña por vectores sanitarios, generación de GEI, entre otros, se evidencia en Casanare una problemática ambiental por la deficiencia en relación al manejo de residuos y subproductos agroindustriales que afecta las diferentes dimensiones ambientales para el desarrollo sostenible. Por lo anterior, se genera la pregunta de investigación: *¿Cómo se pueden reducir y aprovechar los residuos y subproductos del sector palmicultor en el departamento de Casanare mediante un modelo de economía circular bajo una perspectiva de desarrollo sostenible?*

² 17,1 t ha/año (Castillo & Martínez, 2015)

2. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo agroindustrial genera externalidades de orden positivo al evidenciar un aumento o beneficio en la calidad de vida de las poblaciones, sin embargo, convierte a la población en una sociedad de consumo (Cury et al., 2017), lo que acarrea ofrecer productos más complejos, aumentar la tasa de extracción y transformación de la materia y energía, generación de subproductos, y transferencia de externalidad, lo que equivale al orden negativo o perjuicio del proceso (Albán & Rosero, 2016; Costanza et al., 2014; Cruz, 2014; Cury et al., 2017; V. Ramírez & Antero, 2014).

El sector palmicultor en su mayoría es una industria bajo la modalidad de economía lineal con externalidades de orden negativo, ya que genera residuos³ y subproductos⁴ en estado sólido, tales como tusa, fibra, cascarilla, entre otros; líquido, como el efluente residual; gases, entre ellos el material particulado, GEI, entre otros; y otros residuos, como la ceniza y lodos (Extractora el Roble S.A.S, 2016; R. García, Núñez, Ramírez, & Jaimés, 2013), producto de la transformación de la materia prima (Saval, 2012). Dado a su alto volumen y tasa de generación, estos residuos presentan un reto en la gestión, ya que acarrearán costos e impactos asociados a la disposición y tratamiento. Este contexto se ajusta a las necesidades de la agroindustria de palma de aceite del departamento de Casanare, ya que a la fecha la mayoría de las agroindustrias no presentan estrategias de incorporación de residuos y subproductos (Fedepalma, 2020a). Por lo anterior, se evidencia la oportunidad de esquematizar estrategias de reincorporación de residuos y subproductos con el fin de disminuir las presiones a las dimensiones del desarrollo.

La gestión de las externalidades negativas y residuos debería ejecutarse mediante la articulación de los actores antrópicos involucrados en el proceso. Las alternativas para intervenir las externalidades negativas se basan en evitar, mitigar y compensar los impactos por medio de mecanismos que limitan la fuente de propagación (Leff, 1986) o ante una eventual externalidad positiva para realizar un aprovechamiento o beneficio de esta (Moreno, 1995, p. 486), siendo lo anterior, aplicable bajo el marco holístico de la economía circular (J. Torres, Yabarrena, Quispe, & Perdicci, 2015). Las alternativas con enfoque de economía circular pueden ser evaluadas bajo diferentes métodos, no obstante, la valoración es uno de los enfoques predominantes ya que establece la mejor alternativa con base a las características intrínsecas del residuo y subproducto.

La valoración es un concepto relativamente nuevo en el campo de la gestión de residuos y subproductos industriales con el propósito de promover el desarrollo sostenible (Chandrasekaran, 2012). Al articular con la presente problemática, permite identificar las diferentes alternativas de gestión ambiental, social y económica que influyen de manera significativa en las dimensiones del desarrollo. Los residuos y subproductos tienen un potencial significativo de reincorporación y/o aprovechamiento como materia prima para la producción de energía (Cadavid & Bolaños, 2015), reúso de agua (J. Torres et al.,

³ Cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse, el cual, engloba al mismo tiempo, la eliminación y la recuperación de una sustancia u objeto (L. A. Hernández, 2014, p. 8).

⁴ Residuo de producción que no es residuo, cuya sustancia u objeto resultante no es el principal fin de obtención (L. A. Hernández, 2014, p. 13). Para que un subproducto no sea considerado como residuo, debe cumplir tres condiciones de reutilización de forma acumulativa, correspondiente a: (i) ¿Es la reutilización del material no sólo posible, sino segura?, (ii) ¿Puede el material reutilizarse sin transformación previa?, (iii) ¿Sin solución de continuidad del proceso productivo? (COM, 2007, p. 7).

2015), protección a la erosión laminar (N. Ramírez, Silva, Garzón, & Yáñez, 2011), disminución GEI (Facua, 2009; Frondel, Horbach y Rennings, 2007; Organization for Economic Co-operation and Development OECD, 2011, citado por Chávez & Rodríguez, 2016) y sociedades resiliente y adaptadas al proceso agroindustrial (Gabarda, 2019), lo que permite evitar la transferencia de externalidades negativas a las dimensiones del desarrollo (Suppen & Hoof, 2005).

Por lo anterior, la presente investigación se enfocó en estudiar la dinámica de producción y transformación de la materia y energía en las plantas de beneficio de la agroindustria de aceite de palma del departamento de Casanare que exhiben una débil capacidad en su práctica para la gestión de residuos y subproductos agroindustriales, y su respectivo aprovechamiento, lo cual se traduce en la generación de externalidades negativas sobre el entorno natural y social, pues según los registros de producción y su factor de conversión en la generación de residuos y subproductos denotan un alto potencial en contaminación de fuentes hídricas y sustratos, al tiempo que los indicadores de bienestar se modifican. Así, la investigación permitirá identificar las falencias de productividad, profundizar los conocimientos teóricos sobre el particular, aproximarse al diseño de una estrategia basada en la reutilización y aprovechamiento de los residuos y subproductos en estado sólido y líquido que coadyuvará en el mejoramiento del desarrollo departamental, transformación del modelo de producción, mitigación de externalidades negativas y la promoción del desarrollo sostenible en un modelo productivo agroindustrial.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Formular un modelo de economía circular para la valoración de los residuos y subproductos del sector palmicultor en el departamento de Casanare en los últimos cinco años.

3.2. Objetivos Específicos

- a. Determinar las variables y constantes de los residuos y subproductos del sector palmicultor que se generan en el proceso de transformación de RFF en plantas de beneficio del departamento de Casanare.
- b. Identificar los enfoques y variables utilizados en la valoración de residuos y subproductos del sector palmicultor que se generan en el proceso transformación de RFF en plantas de beneficio para la construcción del modelo de economía circular.
- c. Analizar las variables bajo el marco de economía circular para integrar el modelo, desde una perspectiva sostenible, con base en la indagación y experiencias obtenidas en el proceso de investigación, aplicado a la agroindustria de palma de aceite del departamento de Casanare.

4. MARCOS DE REFERENCIA

4.1. Marco teórico y conceptual

A continuación, se aborda el estado del arte sobre el desarrollo de economía circular en el contexto de la agroindustria de palma de aceite a escala global, nacional y local (departamento de Casanare), enmarcado en la teoría de desarrollo sostenible, con el fin de configurar un marco general y específico del tema que aborda conceptos, experiencias, técnicas y métodos.

4.1.1. *Relación del desarrollo económico con la economía circular*

La economía es una ciencia social que se ocupa de las relaciones con los procesos de producción, intercambio, distribución y el consumo de bienes y servicios con el fin último de satisfacer las necesidades ilimitadas de los individuos y la sociedad bajo un escenario de disponibilidad de recursos limitados o escasos (Rivera, 2016). A esto se añade que la economía administra los recursos bajo la perspectiva que estos son finitos o escasos, lo que conlleva a generar métodos idóneos para alcanzar los objetivos de producción, así mismo, evalúa y establece el comportamiento de preferencias con criterio de elección según el rendimiento deseado (Levitt, 2021).

La evolución del concepto de economía se desarrolló desde los primeros asentamientos humanos, donde los sujetos transformaron los entornos ecológicos y geográficos para satisfacer la demanda de alimentos, energía y fuente de protección bajo un escenario de escases de recursos (Gowdy, 1995). Dicha escasez permitió establecer los primeros intercambios de bienes y servicios entre comunidades aledañas, lo cual promovió los asentamiento, la migración, la agricultura, el desarrollo tecnológico (Dalton, 1961; Gowdy, 1995) y en especial el trueque, considerado como el intercambio de bienes sin una moneda de compra-venta (Prado & Noyola, 2016).

El proceso de desarrollo civil promovió diferentes escenarios que configuraron el intercambio de commodity finales a partir de un valor de moneda (Mandeu, 2018) y estableció diferentes corrientes del pensamiento económico con énfasis en el desarrollo económico y local. La primera corriente corresponde a los mercantilistas (s. XVI-XVII), seguida por fisiócratas (s. XVIII), quienes establecieron los conceptos de producción, consumo, crecimiento, entre otros, asimismo, identificaron la renta y la agricultura como factores cruciales para el crecimiento de la economía (Hidalgo, 1998; Vergara & Ortiz, 2016).

Posterior surge la corriente de economía clásica con fundamentos de progreso material, acumulativo y autocontinuo hasta alcanzar un supuesto estado estacionario basado en la concepción del crecimiento económico de Adam Smith. Smith sentó las bases del paradigma del desarrollo clásico y neoclásico al establecer que la apropiación del entorno ecológico, división de trabajo y crecimiento de la mano laboral, los cuales fomentan escenarios de aumento del crecimiento económico para llegar a un estado estacionario (Levitt, 2021; Vergara & Ortiz, 2016), no obstante, Malthus (1798) pensaba que el estado estacionario era imposible dado a los “vicios y la miseria eterna” de la humanidad (1993, citado por Kerschner, 2008). Años después, en los siglos XIX y XX surgen las corrientes Marxistas y Keynesianismo respectivamente (Levitt, 2021). De estas, la corriente marxista fundamenta los principios heterodoxos al desarrollo económico de dicha época.

En el transcurso del siglo XX la economía es influenciada por métodos matemáticos, lo que permite sintetizar la oferta y la demanda como determinantes de la participación de precios y cantidades en el equilibrio del mercado. La prioridad general a partir de los años 60 fue el crecimiento económico, que dejó de lado evidentes limitaciones físicas, sociales e industriales para alcanzar dicho crecimiento (Daly, 1998). La economía neoclásica tiene una concepción metafísica sobre el contexto real donde la economía regula el sistema (J. Martínez & Roca, 2015), es decir, el flujo por el cual circula la economía neoclásica se resume en la existencia de empresas que introducen bienes y servicios al mercado regulado por la dinámica de oferta y demanda (Rivera, 2016).

La economía neoclásica se basa en un modelo de producción lineal (opuesto de la economía circular), cuyo proceso transforma el capital natural para obtener commodity acorde a un proceso abierto que se resume en tomar, hacer y desechar (Ellen MacArthur Foundation, 2015b; J. Osorio, 2020). Este estilo de consumo genera cantidades significativas de residuos de alta entropía que se desperdician en rellenos sanitarios, cuerpo de agua o depósitos a cielo abierto, y ocasionan afectaciones a las dimensiones del desarrollo. Por lo anterior, surge la economía ambiental como rama de la economía que aporta herramientas para controlar las falencias y externalidades negativas generadas por modelos neoclásicos. Los precursores del campo de estudio interdisciplinar son Pigou y Coase, quienes generaron propuestas para corregir las falencias del mercado (Labandeira, León, & Vázquez, 2017). Cabe destacar que una derivación de la economía ambiental corresponde a la economía circular bajo los principios de la economía ortodoxa y sustentabilidad débil (Espaliat, 2017; Labandeira et al., 2017; Villacis-Uvidia, Lara-Haro, & López-Villa, 2021).

4.1.2. Relación del desarrollo sostenible con la economía circular

La Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano, que tuvo lugar en 1972 en Estocolmo – Noruega, no fue más que el reflejo de importantes cambios en la percepción social sobre los fundamentos y las consecuencias del desarrollo económico en diferentes entornos de espacio-temporalidad. En el transcurso del siglo XX, la sociedad mundial evidenció los riesgos por el agotamiento de los recursos naturales, en especial los recursos como fuente de energía desde la revolución industrial (Camana, Manzardo, Toniolo, Gallo, & Scipioni, 2021). Adicional, se reflejaron los múltiples efectos negativos sobre la salud humana y los ecosistemas, que incluye a la atmósfera, el suelo y el agua, descrito en el libro *Los límites del crecimiento* (Meadows, Meadows, Randers, & Behrens, 1972) y las limitaciones que restringen el aumento económico local y/o regional (Labandeira et al., 2017; Velenturf & Purnell, 2021) por causa de la gestión inadecuada de los recursos naturales, residuos de alta entropía, perspectiva ambiental, entre otros. .

El término de desarrollo sostenible se estableció en el informe *Nuestro Futuro Común* de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo en 1987. Es un concepto que abarca los pilares de calidad ambiental, prosperidad ecológica y equidad social en un sistema de engranaje (Kirchherr et al., 2017; Taylor, 2016) y promueve el uso de recursos sin perjudicar el stock de las siguientes generaciones. Sin embargo, el concepto carecía de contextualización de los pilares bajo el marco del desarrollo, por ello, absorbió conceptos de la corriente ortodoxa y heterodoxa (Zapata & Chávez, 2018).

La corriente ortodoxa está vinculada con la economía neoclásica y economía ambiental. Se basa en dictámenes rectores como la relevancia del dinero, siendo este el mecanismo para el

beneficio colectivo, generación de empleo, aumento de salario y mejoramiento del aparato industrial (adelantos técnicos y tecnológicos) (Hidalgo, 1998; Leff, 1986; Villacis-Uvidia et al., 2021; Zapata & Chávez, 2018). La corriente ortodoxa se desplegó bajo tres generaciones de pensadores con mecanismos sucesivos de progreso que permitió la integración de las variables sociales en la toma de decisiones generales (Escobar, 2007). La primera generación no admitió el papel del Estado en la economía, lo que facilitó la generación de fallas en el mercado, cuya medida correctora consistió en la distribución de los recursos sin solución de ello; la segunda, enfocó los planteamientos al crecimiento hacia fuera, admitiendo parcialmente al Estado como ente que regula de decisiones positivas y administrativas colectivas; y la tercera, basada en los lineamientos de la economía neoclásica viraron a la integración del desarrollo rural y capital humano (Zapata & Chávez, 2018).

En contrapartida, el movimiento heterodoxo construye sus pensamientos en crítica de la corriente del desarrollo ortodoxo basado en diferentes teorías y escuelas de la sociología y antropología (Arakaki & Rikap, 2015; Zapata & Chávez, 2018). Se basa en considerar al individuo como unidad de análisis del sistema social con enfoque sincrónico y diacrónico, análisis de los espacios relativos y relacionales de los individuos; adicional, resalta la intervención del Estado para erradicar las fallas del mercado (Aragón, 2012). La corriente heterodoxa busca proponer modelos alternos de aprovechamiento de los entornos geográficos, por medio de una simbiosis estructural entre las dimensiones económica, ecológica, social, institucional y tecnológica, acorde a las dinámicas biofísicas (Vergara & Ortiz, 2016).

Al recapitular el concepto de desarrollo referente a la sostenibilidad previamente descrito, también se puede analizar bajo la sostenibilidad débil o fuerte. Una expresión matemática para entender el planteamiento de sostenibilidad, es la expresión lineal $K_t = K_n + K_m + \dots + K_h$ (Guhl, 2006), donde K_t , es el capital total, equivalente a los servicios y productos que dispone una población en un espacio y tiempo determinado; K_n , capital natural; K_m , capital manufactura; K_h , capital humano; y K_{ni} , otras formas de capital (Pérez, 2012). La sostenibilidad débil o utilitarista de la sostenibilidad se fundamenta en considerar que el agotamiento del capital natural se compensa o sustituye con acumulación del capital manufacturado (Pearce & Turner, 1990), lo que incrementa la presión sobre los recursos del ambiente (Rivera, 2016), y lo anterior, es la base del desarrollo sostenible.

Pearce & Turner, en su obra *Economía medioambiental* consideró que los orígenes de los conflictos ambientales es la carencia del precio en un mercado que regula los recursos naturales, por lo que imponer precios sombra a las externalidades es una manera de incluir el costo beneficio para decidir la rentabilidad, eliminación o conservación del bien y/o servicio (1995). Por lo anterior, Pearce meditó tres consideraciones en base al desarrollo sostenible siendo que la calidad ambiental mejora el crecimiento económico, salud de los trabajadores y fomenta la generación de nuevos empleos; trae off, entre el medio ambiente y desarrollo como factor de decisión de crecimiento y aprovechamiento de recursos; y desarrollo sostenible independiente de PIB, dado que no mide la calidad de vida de la sociedad (Pearce, 1976), los cuales fomentan el reciclaje, reforestación, recuperación de aguas, entre otros (Hidalgo, 1998).

En contra partida al planteamiento débil, la sostenibilidad fuerte se basa en conservar las formas de capital, en especial el capital natural, el cual no es sustituible por ningún otro tipo de capital, más bien son complementarios entre sí (Daly, 1998). Consiste en no producir alteraciones significativas al ecosistema o fuente de servicios ecosistémicos que mantiene la conservación de espacios naturales (Rivera, 2016). Lo descrito previamente, es el fundamento de la economía ecológica, donde el sistema es finito y cerrado (Leff, 1986), y se consolida como la base del paradigma del desarrollo sostenible.

De todo lo descrito previamente de la corriente ortodoxa y heterodoxa, forman parte del concepto de economía circular, dado que este es construido desde el desarrollo sostenible bajo las áreas de economía ambiental, ecología industrial, economía ecológica, teoría general de sistemas, entre otras (Camana et al., 2021; Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2016; Huamao & Fengqi, 2007; Leitão, 2015; Murray, Skene, & Haynes, 2017; Velenturf & Purnell, 2021). El propósito fundamental es promover el uso eficiente y eficaz de los recursos, que permita maximizar la utilidad en la generación de bienes y servicios, así mismo, reducir, reutilizar y reciclar los subproductos con valor agregado e incorporarlo a la cadena fuente u otra cadena productiva para preservar el recurso (Ramos et al., 2019). La economía circular contribuye a los pilares del desarrollo sostenible, ya que disminuye las externalidades negativas sobre el entorno social, ambiental y económico (Salguero-Puerta, Leyva-Díaz, Cortés-García, & Molina-Moreno, 2019) y promueve el uso eficiente de los recursos de una producción de mediana o gran escala, como lo es la agroindustria del departamento de Casanare.

4.1.3. Economía circular

La economía circular es un sistema holístico de producción regenerativa y corrección de externalidades negativas (Ellen MacArthur Foundation, 2015b), es decir, modelo cíclico que corrige las salidas bajo escenarios de uso y recuperación de los materiales y energía (Prieto, Jaca, & Ormazabal, 2017). En otras palabras, establece alternativas de reincorporación al proceso generador o procesos externos similar a un ciclo biológico, lo que compensa los límites bióticos de la economía neoclásica, al proponer un paradigma alterno del sistema económico moderno insostenible y cambios estructurales de producción en los ámbitos sociales, políticos y económicos (Alhawari, Awan, Bhutta, & Ülkü, 2021; Espaliat, 2017; Porcelli & Martínez, 2018).

La evolución del concepto de economía circular data de 1970, no obstante su auge como concepto unificado se evidencia desde los últimos 15 años (Mahanty, Boons, Handl, & Batista-Navarro, 2019). Bajo la perspectiva de la economía ambiental, la EC⁵ se fundamentó principalmente de la producción más limpia, ecología industrial, cradle-to-cradle, cadenas de suministro cerrado, entre otras (Geisendorf & Pietrulla, s. f.; Homrich, Galvao, Abadia, & Carvalho, 2018; Nakajima, 2000), donde toma mayor fortaleza al ser implementado como un mecanismo para gestión ambiental basado en la economía de los recursos naturales de Pearce & Turner (1990).

Otros autores, como Korhonen, et. al (2018), han contextualizado el concepto según los enfoques interdisciplinarios de la economía circular:

El concepto de CE se basa libremente en una colección fragmentada de ideas derivadas de algunos campos científicos, incluidos los campos emergentes y los conceptos semicientíficos. Estas fuentes abarcan, por ejemplo, la ecología industrial. (Frosch y Gallopoulos, 1989; Graedel, 1996; Lifset y Graedel, 2001), ecosistemas industriales (Jelinski et al., 1992) y simbiosis industriales (Chertow y Ehrenfeld, 2012), producción más limpia (Stevenson y Evans, 2004) que incluyen revisiones sobre la circular de sistemas de fabricación flujos de materiales y desarrollos para ese fin (Lieder y Rashid, 2016), sistemas de productos y servicios (Tukker, 2015), ecoeficiencia (Huppel e Ishikawa, 2009; Welford, 1998a; Haas et al., (2015), diseño cradle-to-cradle (Braungart et al., 2007; Braungart y McDonough, 2002; McDonough y Braungart, 2003), biomimética (Benyus, 1997; Benyus, 2003), resiliencia de

⁵ Sigla de Economía Circular, o CE, siglas de Circular Economy.

los sistemas socioecológicos (Folke, 2006; Crépin et al., 2012), la economía del rendimiento (Stahel, 2010; Stahel, 2006; EMAF, 2013), capitalismo natural (Hawken et al., 2008), el concepto de cero emisiones (Pauli, 2010) y otros (p. 3).

La economía circular se fundamenta en tres principios según Espaliat (2017), Martínez & Porcelli (2018) y Velenturf & Purnell (2021), equivalentes a: i) preservar y mejorar el capital natural, por medio del control de las reservas de recursos en la medida de lo posible empleados bajo el mayor rendimiento; ii) optimizar el rendimiento de los materiales y energía, acorde a la distribución de la utilidad en su mayor capacidad en el sistema productivo u otro sistema; y iii) mitigar y/o eliminar los factores negativos externos generados por el aprovechamiento de los recursos. A propósito de los principios, se definen las características fundamentales de la economía circular relacionadas con: i) eliminación de los residuos desde el diseño (residuo como producto sustituto o complementario de primer o segundo uso); ii), generación de solidez a través de la diversidad; iii) crecimiento de la economía local y/o nacional; iv) pensamiento sistemático; y v) modificación de costos reales en precios y mecanismos de retroalimentación (Espaliat, 2017; Porcelli & Martínez, 2018).

Suárez-Eiroa et al. (2019), identificaron los tres enfoques de implementación del paradigma de la EC, correspondiente a: i) minimizar las entradas de materias primas y las salidas de desechos, ii) mantener el valor de los recursos el mayor tiempo posible dentro del sistema, y iii) reintegrar los productos en el sistema cuando lleguen al final de su vida útil (p. 2). La EC implementa los enfoques a treves de (i) articulación de los actores públicos y privados como un proceso simbiótico, (ii) aprovechamiento de la materia y energía en diferentes fases productivas como un producto sustituto o complementario en diferentes clústeres empresariales, y (iii) adaptación social de los modos productivos y de consumo (Huamao & Fengqi, 2007). Por lo anterior, se deduce que la EC es un sistema de producción y consumo regenerativo que tiene como propositivo disminuir las tasas de extracción de recursos, optimizar la tasa de reincorporación de residuos y disminuir las emisiones asociadas a la gestión de los procesos.

El concepto de economía circular reformula los modelos productivos de flujo unidireccional a modelos de flujo multidireccional, a partir de la recuperación y la valoración que permiten reutilizar la materia (y la energía al interior de la materia) nuevamente en la cadena de suministro, lo que desacopla finalmente el crecimiento económico de las pérdidas ambientales (Ghisellini et al., 2016). La reutilización de la materia puede proporcionar cierta recirculación, no obstante: (i) los procesos de reciclaje nunca pueden ser del 100% (Georgescu-Roegen, 1979, citado por Patterson, 1998), y (ii) el reciclaje de toda materia requiere necesariamente entradas adicionales de energía (Patterson, 1998), por lo que la implementación de sistemas de EC tiene límites termodinámicos que limitan convertir flujos de materiales lineales en circulares (Andersen, 2007). Por estas razones descritas previamente, se detecta que la EC se basa en el enfoque biofísico, que permite valorar los escenarios acordes a los flujos físicos. El enfoque biofísico evalúa el valor en función de las propiedades intrínsecas de los objetos acorde a los parámetros físicos subyacentes (Pascual et al., 2010), en la lógica de flujos de energía y masa, y no en la medicación de los valores de cambio como se implementa en la economía neoclásica (Patterson, 1998).

Elia et al. (2016), describieron las principales metodologías implementadas para desarrollar proyectos bajo el enfoque de EC que relacionan índices simples o compuestos para cuantificar y/o cualificar el aprovechamiento de residuos, tales como Flujo de Materiales (*Water Footprint, Material Inputs per Unit of Service, Ecological Rucksack, Material Flow Analysis, y Substance Flow Analysis*); Flujo de energía (*Cumulative Energy Demand, Embodied Energy, Energy Analysis, y Exergy Analysis*), Uso del suelo y consumo (*Ecological Footprint, Sustainable Pro-*

cess Index, y *Dissipation Area Index*); y Otro ciclo de vida (*Carbon Footprint*, *Ecosystem Damage Potential*, *Life Cycle Assessment*, *Environmental Performance Strategy Map*, y *Sustainable Environmental Performance Indicator*) (p. 6). Los indicadores miden cinco categorías principales en micro (producción local), meso (producción regional a gran industria) y macro (producción nacional) (Chen, 2009), correspondiente a: (i) reducción de insumos y uso de recursos naturales, (ii) participación creciente de recursos renovables y reciclables, (iii) reducción de emisiones, (iv) reducción de valiosas pérdidas de material, y (v) aumentar el valor de la durabilidad de los productos (Elia et al., 2016; Kardung et al., 2021). Dado a las limitaciones de recircular de la energía, la metodología predominante corresponde a flujo de materiales, la cual presenta un proceso de retroalimentación cerrado resumido en (i) recursos, (ii) producción, (iii) flujo de materiales, (iv) consumo, y (v) recursos reciclados, el cual compagina con el esquema de la economía circular (Chen, 2009).

Asimismo, bajo el esquema de economía circular se ha analizado las diferentes barreras y limitaciones que el concepto, modelos y herramientas de gestión enfrenta. Las principales barreras se agrupa en factores tales como *financieros*, correspondiente a i) medición de los beneficios financieros y ii) rentabilidad financiera; *estructural*, relacionado en i) falta de intercambio de información y ii) distribución de responsabilidad; *operacional*, vinculado con i) gestión de la cadena suministro; *actitudinal*, correspondiente a i) percepción de la sustentabilidad y ii) aversión al riesgo; y *diseño productivo*, relacionado con la integración de los procesos de producción (Ritzén & Ölundh, 2017, p. 3). Al contextualizar con el objeto de la presente investigación, esta contribuirá en superar las limitaciones de un sector productivo específico, ya que analiza e integra factores financieros, operacionales, actitudinal y diseño productivo a través del aprovechamiento de segundo uso de salidas (residuos y subproductos) de un sector específico.

Basado en la construcción del concepto, principios, enfoques y limitaciones de la economía circular, a nivel mundial se evidencian diferentes aplicaciones sobresalientes en diferentes contextos. Lo anterior, se debe a que la economía circular en los sectores productivos se ha convertido en un tema importante en la gestión y política territorial sostenible (McDowall et al., 2017), lo que conduce a diferentes beneficios económicos y sociales que dependen del contexto implementado. Algunos ejemplos a resaltar corresponde a la incorporación de la EC en el ciclo de vida de los productos, que bajo un estudio realizado en la Unión Europea del año 2015, evidenciaría un ahorro aproximado de 630 millones de dólares anuales, aumento del 6,7% del PIB, creación del 3% de empleo, y reducción del 70% de GEI en comparación a los niveles del 2020 de la UE (Palafox, Lee, Bouch, Hunt, & Rogers, 2017, p. 23).

En el sector agroindustrial se ha implementado la EC en diferentes zonas geográficas y en variedades de cultivos, como lo evidencian las investigaciones de algunos autores como Barros et al. (2020), Kaur et al. (2018), Maina et al. (2017), Masullo et al. (2017), Osorio et al. (2021), Zuin & Ramin et al. (2018). A nivel global países como Japón, China, Alemania, Holanda, entre otros lideran modelos de economía circular implementados bajo el enfoque de flujo de materiales principalmente (Ogunmakinde, 2019). A nivel local, Colombia ha desarrollado la Estrategia Nacional de Economía Circular, la cual establece los diferentes enfoques y metas a aplicar a diferentes residuos y subproductos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Comercio Industria y Turismo, 2019). Aunque dicha estrategia nacional no es específica para los sectores agroindustriales, la presente investigación contribuirá a la estrategia nacional, ya que formula un conjunto de indicadores puntuales.

Es pertinente resaltar que, según el tercer reporte de Economía Circular emitido por el DANE (2021), se evidenció que los residuos orgánicos agroindustriales presentan altas tasas de recirculación, tales como bagazo de caña, residuos de palma, cascarilla de arroz y cascarilla de café,

en procesos cogeneración y autogeneración de energía, sin embargo, los residuos líquidos presentan baja tasa de reincorporación por ausencia de estrategias circulares.

4.1.4. Palma de aceite, residuos y subproductos del proceso de extracción de aceite

La palma de aceite (*Elaeis Guineensis*) es una planta tropical propia de climas cálidos que crece en tierras por debajo de los 500 m.s.n.m., oriunda de las costas del golfo de Guinea en África (Rivera & Cubides, 2018). Es introducida en América como planta ornamental y alimenticia por los colonos y esclavos portugueses como dieta de viajes trasatlánticos del siglo XVI (Mujica, Torres, & Vargas, 2010). En Colombia se introdujo en el año 1932 por Florentino Claes y se desarrolló como cultivo por primera vez por la multinacional *United Fruit Company* en 1945 que explotó las distintas cualidades del fruto de palma de aceite (Borrero, 2019; Ortiz, 2019). La primera plantación experimental se desarrolló en Palmira, Valle, y la comercialización inicio a partir de 1960 (Guerra, 1987; Lomineth, 2020).

El cultivo de palma de aceite ha tenido un crecimiento significativo en el transcurrir del tiempo a escala mundial, qué varía con incrementos fluctuantes año tras año. Según el portal Our World in Data, para el año 1962 el mundo había sembrado 3,42 millones de hectáreas de palma de aceite; 4,28 millones de hectáreas para el año 1980; 6,12 millones de hectáreas para el año 1990; 10,39 millones de hectáreas para el año 2000; 16,88 millones de hectáreas para el año 2010; y 18,92 millones de hectáreas para el año 2018 (Our World in Data, 2021). Para dichos periodos de tiempo, el continente de América registró 67.612 ha, 118.535 ha, 271.103 ha, 503.507 ha, 858.490 ha y 1,31 millones ha, de las cuales Colombia aportó el 1,62%, 21,42%, 33,07%, 26,76%, 23,69% y 22,02% respectivamente de áreas sembradas (Our World in Data, 2021).

Al contrastar con información con registros de Fedepalma, el área sembrada en Colombia difiere significativamente, ya que se registra mayor área sembrada. Para el año 1962 (año de fundación de Fedepalma) se registraron 5 mil hectáreas; 33,8 miles de ha para 1980; 105,9 miles ha para el año 1990; 402.012 ha para el año 2010 y 559.582 ha para el año 2019 (Fedepalma, 2011, 2020a; J Mesa, 1990). Por lo anterior, la presente investigación se basará en datos suministrados por entidades nacionales.

En relación a los datos de producción toneladas de CPO no se evidenció variación relevante al contrastar Our World in Data y Fedepalma. A nivel mundial se registró 1,48 millones de t CPO para el año 1962; 5,08 millones de t CPO para el año 1980; 11,45 millones de t CPO para el año 1990; 22,22 millones de t CPO para el año 2000; 45,78 millones de t CPO para el año 2010; y 71,45 millones de t CPO para el año 2018 (Our World in Data, 2021). Al escalar al orden continental, Américas reportó 74,18 mil toneladas de CPO para el año 1962; 190,5 mil toneladas de CPO para el año 1980; 679,7 mil toneladas de CPO para el año 1990, 1,31 millones toneladas de CPO para el año 2000; 2,39 millones toneladas de CPO para el año 2010; y 4,89 millones toneladas de CPO para el año 2020. De dichas cifras continentales, Colombia aportó el 2,62%, 36,64%, 37,06%, 40%, 31,5%, 33,33% respectivamente en los periodos de tiempo resaltados (Fedepalma, 1994, 2009, 2020a; Our World in Data, 2021). Lo anterior, comprueba que Colombia es el cuarto productor a nivel mundial⁶ y el primero a nivel América (Ortiz, 2019; USDA, 2021).

⁶ Superado por Indonesia (56,78%), Malasia (27,32%) y Tailandia (3,89%) en producción mundial, y antecedido por Nigeria (1,47%), Guatemala (1,22%), Nueva Guinea (0,88%), Ecuador (0,78%) y otros países (5,37%).

Colombia distribuye el sector palmicultor en cuatro zonas productivas, correspondiente a zona oriental, norte, central y suroccidental, cuya participación en área sembrada total del año 2019 corresponde al 41% para la zona oriental, 23,6% para la zona norte, 31,4% para la zona central, y el 4% para la zona suroccidental. Bajo ese mismo orden, el nivel de producción de CPO nacional del año 2019 equivale al 41,8%, 23,9%, 31,1% y 3,2% respectivamente por zona geográfica (Fedepalma, 2020a). Lo anterior es pertinente resaltar, ya que el ecosistema de trabajo se focaliza sobre el departamento de Casanare, vinculado a la zona oriental.

Del área sembrada en la zona oriental, el 25,16% están en el departamento de Casanare, con rendimiento de producción de $3,6 \pm 0,2$ t CPO/ha (Fedepalma, 2015, 2018a, 2019a, 2020a), lo que corresponde a uno de los mejores rendimientos de producción toneladas de aceite por hectárea en la zona oriental. Según el último anuario estadístico de Fedepalma, el departamento de Casanare aportó 169.975 toneladas de aceite de palma crudo, equivalente al 11,1% de la producción nacional (Fedepalma, 2020b). Dicho aporte es relevante para Casanare, ya que ubica al cultivo de palma de aceite como el primer cultivo perene con aporte al PIB departamental (Fedepalma, 2019b; MinComercio, 2021). Sin embargo, este escenario provoca una alta generación de residuos de alta entropía que requiere de una gestión integral para aprovechar las salidas como productos sustitutos o complementarios.

Ahora bien, el proceso de extracción de aceite de palma genera una cantidad importante de residuos tanto orgánicos como líquidos. Algunos investigadores estimaron la generación de $446,4 \pm 2.1$ kg de residuos y subproductos posterior de procesar una tonelada de Racimo de Fruto Fresco (RFF), de los cuales, la mayor proporción la aporta los Racimos de Fruta Vacía (EFB), seguido por fibra y cascarilla, asimismo, se genera otros subproductos como efluentes residuales y ceniza producto de procesos complementarios (Anaya & Molina, 2018; Cortés, Cayón, Aguirre, & Chávez, 2006; J. García, Cárdenas, & Yáñez, 2010; Huailuek, Silalertruksa, & Gheewala, 2019; Loh, 2017; Nazir, Wahjoedi, Yussoff, & Abdullah, 2013; Sukiran et al., 2017). Con esta información previa y datos de producción de CPO departamental de Casanare, se estimó que se generaron cerca de $23.254,45\text{m}^3$ de efluente residual y 48.396,04 t de RSO – SO en el año 2019-2020, cuya disposición es primordial para los actores antrópicos y ecológicos del entorno agroindustrial del departamento de Casanare. Cabe aclarar que las cifras resaltadas son producto de proyecciones numéricas con datos de investigaciones internacionales, dado que se desconoce las tasas del departamento de Casanare, no obstante, esta investigación precisará información al departamento de Casanare, ya que analizará las tendencias locales.

Las plantas de beneficio de fruto de palma de aceite con tasas de extracción entre el rango 20 – 160.000 t/h de RFF, generan cantidades significativas de residuos y subproductos que justifican un programa de manejo integrado y reutilización tecnificado (Miranda, Schuchardt, Wulfert, & Tjahjono, 2007), cuyo rango de producción se encuentran las extractoras del departamento de Casanare. García et al. (2010), presentaron un análisis del uso de biomasa residual en las zonas del Norte, Central y Oriental de Colombia, para demostrar la implementación del uso de biomasa y nutrientes que provienen del sistema de extracción de aceite de palma. Según datos de producción de RFF en el 2008 correspondiente a 2.858.868 t, el 39 % del peso de RFF estaba en estado sólido o materia orgánica sólida, del cual 8% provino de Racimos Vacíos (RV).

Paralelamente, los residuos generan emisiones de efecto invernadero por su disposición y tratamiento. En el proceso de extracción, se ha cuantificado los procesos internos y externos, los cuales varían acorde a la tecnología, toneladas de extracción/transformación y procesos complementarios. Moreno et al. (2018), estimaron un aproximado de 660 kg $\text{CO}_2\text{e/t}$ CPO, de los cuales el 58% correspondía al proceso de tratamiento de efluentes residuales, 41% a equipos de combustión (móviles y fijos) y 1% al transporte de RFF a la planta de beneficio. Por tal razón, en la caracterización del subproducto y evaluación del modelo, la presente investigación

comparará el resultado y establecerá la línea base para los residuos y subproductos del departamento de Casanare.

García et al. (2010), destacaron que la zona donde más se implementó el compostaje como medida de manejo de residuos sólidos correspondió a la Zona Oriental, sin embargo, en el estudio no se incluyó los efluentes como subproductos del compostaje, lo que contrasta con los reportes internacionales que indican que el compost adquiere mayor valor agronómico cuando se combinan los subproductos en estado sólidos y líquido (Galindo & Hernán, 2012). Cabe destacar al efluente de la agroindustria de palma de aceite como el subproducto con mayor contenido nutricional del proceso (Stichnothe & Schuchardt, 2010). Algunas empresas palmicultoras defienden el uso del proceso del aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos como alternativa para el retorno de nutrientes al agroecosistema, así como una solución rentable en términos económicos y ambientales en la respectiva gestión y disposición, no obstante, son muchos los detractores a causa del desconocimiento y poca investigación en relación al tema (Galindo & Hernán, 2012).

Los residuos y subproductos agroindustriales proveniente de la extracción de aceite de palma tienen potencial para la producción de energía (Cadavid & Bolaños, 2015; Lam et al., 2019; Poh et al., 2020a; Quayson et al., 2020; Quintero & Torres, 2019), reúso de agua (Idris et al., 2017; J. Torres et al., 2015) y reincorporación de nutrientes (Hau et al., 2020; Lemus, 2019), los cuales bajo un esquema de economía circular permitirá evitar la transferencia de impactos al entorno social, ambiental y económico (Suppen & Hoof, 2005). Los residuos y subproductos bajo un enfoque sostenible permiten la implementación de la economía circular, no obstante, existen diferentes barreras tales como, costo de mano de obra para la clasificación, contaminación e higiene del residuo, calidad del producto, uso de recursos económicos y energéticos en la reincorporación (Van Fan et al., 2019). Las posibles alternativas a seleccionar se deben basar en criterios de calidad, demanda y proceso a reincorporar, teniendo en cuenta que este proceso generará un nuevo residuo más agotado que puede tener otra aplicación o convertirse en un desecho (Jun & Xiang, 2011; Vargas & Pérez, 2018).

4.1.5. Problemas socioambientales asociados a la agroindustria a nivel mundial

El desarrollo sostenible de la sociedad es uno de los temas más debatidos en los últimos años por diferentes actores tales como políticos, gerentes, científicos y sociedad en general, en relación a los estilos de consumo y sobreexplotación (Silva et al., 2018; Zuin & Ramin, 2018) con énfasis en las dimensiones del desarrollo. El escenario actual de desarrollo genera acceso a diferentes bienes y servicios obtenidos posterior a la transformación del capital natural, sin embargo, las falencias en los respectivos procesos de transformación y consumo evidencian aumentos en los residuos que influye fuertemente en la salud de los ecosistemas y en definitiva en la comunidad humana, por ejemplo, la agroindustria (Yusuf, 2017). Aquellas agroindustrias que liberan los residuos al entorno sin un procedimiento de eliminación y/o aprovechamiento puede causar efectos nocivos sobre la dimensión ecológica (Sadh et al., 2018) y no contribuir con el desarrollo sostenible.

La generación de residuos agroindustriales en las diferentes etapas productivas es actualmente una problemática a nivel mundial, dado a que en la mayoría de los casos los residuos no son procesados o dispuesto adecuadamente (Vargas & Pérez, 2018), lo que genera una amenaza a la calidad ambiental y pérdida del valor económico de los residuos (Sharma et al., 2019). Las agroindustrias pueden generar una disyuntiva del desarrollo sostenible en espacios geográficos acorde a las medidas de gestión ambiental, dado que dependen de las tendencias consumo, por

lo cual se fomenta escenarios para una mayor generación de residuos y externalidades negativas (Cury et al., 2017). De hecho, en los últimos 50 años, la intensificación de las actividades agrícolas, ganaderas e industriales con una débil relación de producción eficiente y tecnológica ha permitido el aumento significativo de acumulación y generación de grandes cantidades de residuos (Yusuf, 2017).

Los residuos agroindustriales de palma de aceite se pueden clasificar acorde al estado de la materia. Los residuos líquidos, son en principal, efluentes generados en los diferentes procesos que requieren el insumo hídrico para retirar o remover alguna sustancia ajena al RFF o impurezas a los productos. El efluente contiene variedad de sustancias químicas, no obstante, su mayor concentración se centra en DBO⁷, DQO⁸, Grasas y aceites, micronutrientes y otras sustancias menores (Lemus, 2019; Oswal, Sarma, Zinjarde, & Pant, 2002; Poh et al., 2020a; Poh, Yong, & Chong, 2010; Singh, Ibrahim, Esa, & Iliyana, 2010).

Otro residuo según su estado físico corresponde a los residuos sólidos orgánicos, representados por EFB⁹, fibra, cascarilla, ceniza y lodos. Estos residuos representan el mayor volumen y varían según la especie del cultivo y tecnología de aprovechamiento. Estos residuos contienen características significativas de nutrientes, poder calorífico y humedad (Abdullah, Sulaiman, & Gerhauser, 2011; Baharuddin et al., 2009; Loh, 2017; Singh et al., 2010).

Umar et al. (2018), identificaron que solo el 23% de los residuos y subproductos de palma de aceite son empleados como combustible en calderas, y el remanente es abandonado en sitio (Rubinsin et al., 2020). Lo anterior genera escenarios de contaminación de cuerpos de agua, emisiones atmosféricas (malos olores y GEI), alteración del paisaje, acidificación del suelo, lixiviados y afectación a la salud humana (Elias et al., 2021; Olmos, 2014; Van Fan et al., 2019). Esta realidad se complejiza a nivel local al desconocer los valores reales de incorporación de residuos y disposición según las agroindustrias del departamento de Casanare.

Lo anterior permite proponer modelos de aprovechamiento según el tipo de residuo, tecnología y capacidad de reincorporación de cada agroindustria, bajo el esquema de la economía circular. Por tal razón, la presente investigación formula estrategias de aprovechamiento de residuos agroindustriales bajo el marco EC, con el propósito de establecer mecanismos de reincorporación a la cadena productiva, disminuir la presión sobre el ecosistema y generar herramientas encaminadas al desarrollo sostenible.

4.1.6. Valoración de residuos de palma de aceite

La valoración de residuos se enfoca en determinar los tipos de aprovechamiento según las propiedades físicas, químicas y microbiológicas. En los últimos años, se registra un incremento en la búsqueda y desarrollo de nuevas actividades enfocadas a la conversión de residuos y subproductos en energía y/o fuente de materiales, con énfasis en los procesos fuentes para implementar prácticas que integren ciclos cerrados (Kabongo, 2013). Diferentes disciplinas académicas enfocan esfuerzos en la investigación y desarrollo de metodologías bajo esquemas de bucles cerrados, que permitan incorporar las salidas, visualizadas como residuos y/o subproductos, a los procesos fuentes o procesos complementarios (Gherghel, Teodosiu, & De Gisi,

⁷ Demanda Bioquímica de Oxígeno.

⁸ Demanda Química de Oxígeno.

⁹ Racimo de Fruto Vacío, en siglas en inglés, Empty Fruit Bunch.

2019; Kaur et al., 2018; Maina et al., 2017). Los bucles, procesos o ciclos cerrados, son una analogía que rescata la economía circular, basado en los flujos de materia y energía que son susceptibles a reincorporar las salidas como fuente de materia o energía (en estado degradado) bajo las metodologías de valoración.

La valoración implementa diferentes metodologías apropiadas por la economía circular, tales como reciclaje, usado principalmente en Europa, Asia y América del Sur, y reutilización o beneficio en América del Norte (Nzihou & Lifset, 2010). Nzihou & Lifset (2010), resaltan que la valorización de residuos y subproductos hace referencia al tratamiento para obtener un beneficio como materia prima o complemento, o energía, con la finalidad de reducir las emisiones y los impactos ambientales relacionados (p. 2), cuyo beneficio puede ser estimado económicamente.

La valoración de los residuos facilita el aprovechamiento según su mayor potencial o necesidades del proceso, con la finalidad de disminuir las presiones asociadas al medio ambiente y salud humana, a través de diferentes métodos y/o tecnologías que faciliten la transformación e implementación a las necesidades focales (Mejías, Orozco, & Galáan, 2016), tales como valoración biológica y química, térmica, nutricional, entre otras (Zuin & Ramin, 2018). Lo anterior, con la finalidad de evitar la disposición menos apropiada como vertederos, cielo abierto o vertimiento, ya que se desperdicia compuestos de gran utilidad (Perez & Gomero, 2020; Vargas & Pérez, 2018).

La presente investigación incorpora, analiza y debate los diferentes enfoques de valoración y aprovechamiento de los residuos y subproductos de palma de aceite, con la finalidad de establecer la tendencia y encarrilar el modelo de economía circular según el mayor potencial de aprovechamiento y beneficio para las variables del desarrollo.

Asimismo, como se mencionó previamente, la valoración es susceptible de ser cuantificada por medio del enfoque de la economía ambiental, ya que las diferentes estrategias o enfoques de aprovechamiento generan beneficios monetarios por corregir externalidades negativas. Para ello, principalmente se emplea la valoración directa o indirecta en términos monetarios en calidad de algún bien o servicio ambiental (Cristeche & Penna, 2008). Lo anterior se sustenta, ya que el uso inadecuado de los recursos naturales genera externalidades negativas reflejadas como la contaminación, tal como los subproductos de las plantas de beneficio de palma de aceite, cuyo manejo ineficiente genera deterioro ambiental, agravado por la escasez de recurso técnico, humano y financiero para su control, así como la limitación de conocimiento de su producción, composición y efectos (Fuentes & Serrano, 2006). Sin embargo, estas externalidades pueden ser controladas, minimizadas y/o eliminadas, las cuales transfiguran las externalidades a beneficio específicos, y contribuyen a disminuir las presiones sobre el entorno.

El análisis económico de impactos ambientales se puede desarrollar bajo la teoría del Valor Económico Total (VET), que engloba los métodos de valor de uso directo, uso indirecto, valor de opción y valor de existencia, los cuales son usados para evaluar diferentes alternativas de abordaje al problema ambiental (Aguilera, 2017; Cristeche & Penna, 2008; Labandeira et al., 2017). Para ello, se debe previamente identificar los impactos asociados y asignación de un valor económico al resultado derivado de la implementación, por ejemplo, el tratamiento de efluentes, mejoramiento de salud e investigación científica, paralelamente, permite una gestión económica – financiera empresarial para evaluar la eficiencia de operación (Aguilera, 2017; Callejo, Parra, & Manrique, 2015).

Para valorar el Valor Económico Total se emplean diferentes metodologías, no obstante resaltan cuatro principales, correspondientes a) métodos de los costos evitados o inducidos, b) método del costo viaje, c) método de precios hedónicos; y d) método de valoración contingente;

de los cuales los primeros tres son metodologías de preferencia relevadas o indirectos, y el último de preferencia declarada o directo (Cristeche & Penna, 2008; Labandeira et al., 2017).

Adicional existe la valoración de no uso por método de valor de opción y cuasi-opción (internas dentro de la teoría del Valor Económico Total), donde el primero es el precio que un individuo estará dispuesto a pagar por algo para uso futuro y el segundo refleja el beneficio neto obtenido al posponer una decisión en espera de despejar de manera parcial o total la incertidumbre mediante la obtención de una mayor información; y el valor de existencia refleja la utilidad de un individuo por preservar algo que no está en uso (Fuentes & Serrano, 2006). Así mismo, bajo el marco de la economía del bienestar, hay diferentes formas de aproximar el valor de un bien o servicio ambiental, tales como el costo evitado o inducido, cuando los recursos naturales brindan protección a desastres natural y seguridad de abastecimiento de bienes y servicios; cambio de tasas de mortalidad, cuando al afectar el recurso natural influye en problemas asociadas a la salud; y costo relacionados con pérdidas de ingresos por la no productividad o ausencia al trabajo, cuando el recurso requiere medidas de prevención (Azqueta, 1994).

En la presente investigación de acuerdo al mecanismo de transferencia de externalidad y posibles correcciones a proponer, se selecciona el método de valoración de costo evitados dado que la clasificación, reutilización y aprovechamiento de los subproductos de palma de aceite brindan seguridad en el abastecimiento de bienes y servicios en el futuro. El método de costos evitados utiliza funciones de producción que involucran variables ambientales como insumo de producción, por medio de funciones de dosis-respuesta (Vásquez, 2015) o funciones de daño (Aguilar & Álvarez, 2002). El método analiza el bien o servicio ambiental que no se comercializa en un mercado pero que está relacionado con un bien con capacidad de sustituir a otro producto en un marco de determina producción (Cristeche & Penna, 2008). Así, que el método acepta dos posibilidades, por un lado, el bien o servicio es un insumo más dentro de la producción ordinaria de un bien o servicio, y por otro lado, el bien o servicio forma es complementario y forma parte de la producción de utilidad (Aguilar & Álvarez, 2002). De las funciones previamente mencionadas que permiten analizar el método de costo evitados, se pueden presentar de manera lineal, no lineal o umbrales de daño irreparable que estudia los impactos de cambios de calidad ambiental (Aguilar & Álvarez, 2002).

4.2. Técnicas y experiencias internacionales y nacionales en economía circular

A continuación, se describe las principales técnicas y experiencias en la implementación de economía circular en diferentes sectores productivos a nivel internacional y nacional.

4.2.1. Técnicas y métodos en el área de investigación

Las técnicas y métodos empleados en la implementación de Economía Circular, se caracterizan por determinar los impactos socioambientales generados por la transformación del capital natural para la obtención de bienes y servicios. Se aborda diferentes sectores productivos, siempre, con el objetivo principal de reincorporar los residuos o subproductos a la cadena productiva principal u otra cadena, con añadidura de valor agregado a los residuos y/o subproductos. Posterior, se aborda diferentes indicadores que permita cuantificar y/o cualificar el impacto de implementación, en relación a los enfoques de gestión ambiental y desarrollo sostenible. En algu-

nos casos, se construye un modelo para diagnosticar diferentes escenarios y visualizar los efectos a corto, mediano y/o largo plazo. A continuación, se describe algunas técnicas y métodos empleados a nivel internacional y nacional.

Elia et al. (2016), y Moraga et al. (2019), sugirieron algunos indicadores para medir la adaptación a la economía circular de empresas y/o sociedades pequeñas, medianas o grandes, distribuido en indicadores múltiples o simples de acuerdo a la complejidad del proceso a implementar. Describieron cuatro parámetros correspondientes a flujo de materiales (MF), flujo de energía (EF), uso de tierra y consumo, y otros ciclos de vida del producto. Prieto-Sandoval et al. (2017), subdividieron la implementación de la economía circular con base a las necesidades empresariales en tres categorías que corresponde a (i) campos de acción tales como selección de materiales biodegradables, eficiencia ambiental del proceso de producción, innovación ambiental en el diseño de productos y servicio, recuperación de materia prima y recursos en procesos internos de la empresa, desarrollo en sistema logístico sostenible, modelo de negocios sostenible, recuperación y recirculación industrial de materiales de producción, entre otros; (ii) simbiosis industrial, referente a clúster o asociaciones industriales, incorporación de subproductos de una industria a otra, compartir infraestructura o servicios con otra industria, entre otros; y (iii) certificaciones, correspondiente a certificación de la gestión ambiental empresarial y certificación del producto o servicio (p, 5).

Tabla 1.

La taxonomía propuesta de metodologías basadas en índices de EC.

| Parámetro | Tipo | Indicador simple | Indicador múltiple |
|--|-------------|--|---|
| Flujo de materiales (Material Flow) | | - Huella de Agua (Water Footprint) | - Análisis de Flujo de Materiales (Material Flow Analysis) |
| | | - Insumos de Material por Unidad de Servicio (Material Inputs per Unit of Service) | - Análisis de Flujo de Sustancias (Substance Flow Analysis) |
| Flujo de Energía (Energy Flow) | | - Mochila Ecológica (Ecological Rucksack) | |
| | | - Demanda de Energía Acumulada (Cumulative Energy Demand) | |
| Uso y consumo de suelo (Land use & consumption) | | - Energía Incorporada (Embodied Energy) | |
| | | - Análisis de Emergencia (Emergy Analysis) | |
| Otro ciclo de vida basado (Other life cycle based) | | - Análisis de Exergía (Exergy Analysis) | |
| | | - Huella Ecológica (Ecological Footprint) | |
| | | - Índice de Procesos Sostenibles (Sustainable Process Index) | |
| | | - Índice de Área de Disipación (Dissipation Area Index) | |
| | | - Huella de Carbono (Carbon Footprint) | - Evaluación del Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment) |
| | | - Potencial de Daño al Ecosistema (Ecosystem Damage Potential) | - Mapa de Estrategia de Desempeño Ambiental (Environmental Performance Strategy Map) |
| | | | - Indicador de Desempeño Ambiental Sostenible (Sustainable Environmental Performance Indicator) |

Fuente: Adaptado de Elia et. al, (2016).

Los indicadores pueden medir una o varias variables de estudio bajo metodologías directas e indirectas (Moraga et al., 2019), que, en el caso de la presente investigación, se enfoca en los residuos y subproductos generados en las diferentes fases productivas. Con base a la taxonomía de indicadores ambientales descrita por Elia et. al, (2016), se identificó aquellos con relación al proyecto de investigación, tales como *Water Footprint*, *Material inputs per unit service* (como indicadores unitarios), *Material Flow Analysis*, *Sustainable Environmental Performance Indicator* (como indicador múltiple o compuesto) y *Carbon Footprint* (ver Tabla 1).

A nivel macro, algunos autores adaptan *Material Flow Accounting (MFA)* a escala nacional, por ejemplo, programas de la policía nacional de Japón (Moriguchi, 2007); modelo cuantitativo para estimar la economía circular en la Unión Europea a 2005 (Haas et al, 2015); sistema de indicadores CE nacional de China, desarrollado por la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma (NDRC), que parte de un indicador específico creado con base al contexto nacional (Geng et al, 2012), entre otros (citados por Elia et al., 2016). El modelo desarrollado por NDRC se enfatiza en cuatro categorías correspondiente a tasa de producción de recursos, tasa de consumo de recursos, utilización integrada de recursos y tasa de reducción en la descarga de desechos. A partir de las categorías resaltadas, se ha enfocado desde el Ministerio de Protección Ambiental de China los siguientes indicadores: reducción y reciclaje de materiales, desarrollo económico, control de contaminación y perspectiva de administración – gestión (Su, Heshmati, Geng, & Yu, 2013). Cabe connotar que la mayoría de indicadores usados para estimar la aplicación del modelo adoptaron un análisis multicriterio con el objetivo de organizar de manera jerárquica los indicadores y sus respectivos impactos (Elia et al., 2016).

A nivel meso o mediano, los indicadores se construyeron desde específicos sectores industriales. Algunos indicadores para el sector de empresas de productos químicos, se basan en desarrollo económico, explotación de recursos, reducción de la contaminación, eficiencia ecológica y potencial de desarrollo (Li & Su, 2012); en clúster empresarial de fabricantes de partes electrónicas se implementó el indicador *Resource Productivity (RP)*, indicador derivado de *Substance Flow Analysis (SFA)* (Wen & Meng, 2015); en clúster industrial de productos alimenticios y químicos se implementó una combinación de *Life Cycle Assessment (LCA)* con *Environmental input – output* (Scheepens, Vogtländer, & Brezet, 2016); entre otras aplicaciones. A nivel micro se evidencia el desarrollo de indicadores de *Material Circularity Indicator (MCI)*, para medir los flujos de maximización y flujos de minimización de consumo en la cadena productiva (Ellen MacArthur Foundation, 2015a; Prieto-Sandoval et al., 2017).

Rossi et al. (2019), recopilaron 30 indicadores con un análisis descriptivo de las principales falencias y fortalezas para evaluar diferentes clústeres económicos desde una perspectiva sustentable y 3 modelos implementados a industrias fabricantes de elementos electrónicos (p. 29-34). Con base a los autores, se extrajo aquellos indicadores pertinentes para el modelo de economía circular propuesto en la presente investigación (ver Tabla 2).

Tabla 2.

Resumen de indicadores EC pertinentes para el proyecto de investigación.

| Indicador | Ventaja | Desventaja | Referencia |
|--|---|---|-----------------------|
| Estimador de rendimiento de por vida basado en BIM (BIM-based Whole-life Performance Estimator - BWPE) | Evaluación del desempeño de la construcción civil. proyectos. | Restricción de la CE solo en el ámbito de la reutilización y el reciclaje | Akanbi et al., (2018) |

| Indicador | Ventaja | Desventaja | Referencia |
|--|---|--|---|
| Índice de economía circular (Circular Economy Inde - CEI) | Posibilidad de evaluar el reciclaje vinculado con la economía. | Restricción de la CE solo en el ámbito del reciclaje, además de la dificultad de aplicarla debido a la ausencia de una plantilla | Di Maio and Rem, (2015) |
| Prototipo de indicador de economía circular (Circular Economy Indicator Prototype - CEIP) | Desarrollado de acuerdo con los principios de la CE. Facilidad de uso debido a una hoja de cálculo desarrollada para el cálculo | Disponibilidad de la hoja de cálculo dependiente del autor. | Cayzer et al., (2017); Griffiths and Cayzer, (2016) |
| Indicador de desempeño de la economía circular (Circular Economy Performance Indicator - CEPI) | Basado en la evaluación del ciclo de vida (LCA) | Necesidad de conocimientos técnicos previos sobre LCA y falta de plantillas que hagan factibles los cálculos. | Huysman et al., (2017) |
| Buscatrazos circular (Circular Pathfinder - CP) | Basado en prácticas CE, tales como: extender, actualizar, reutilizar, reparar, reacondicionar, remanufacturar, reciclar y biodegradar. Fácil acceso y uso. | Proporciona mejoras al producto solo para las etapas de rediseño o diseño del producto. | ResCom, (2017a) |
| Calculadora de circularidad (Circularity Calculator - CC) | Desarrollado de acuerdo con las prácticas de CE centradas en el PSS y proporciona una visión gráfica adecuada de los flujos materiales y financieros. Además de proporcionar un valor de salida cuantitativo para circularidad, valor capturado, contenido reciclado e índice de reutilización. | Se requiere inversión financiera para el uso ilimitado del indicador. Uso limitado gratis. Además, no proporciona claramente los procedimientos de cálculo para obtener los resultados (circularidad, valor capturado, contenido reciclado e índice de reutilización). | ResCom, (2017b) |
| Balance de insumo-producto (Input-Output Balance Sheet - IOBS) | Basado en información sobre la cantidad y calidad de los recursos utilizados (renovables y no renovables, reciclados, reciclados y reciclados permanentemente, biodegradables y compostables). | Dificultad para hacer que el indicador esté disponible, ya que los autores pertenecen a una empresa privada. | Marco Capellini, (2017) |
| Indicador de circularidad de material (Material Circularity Indicator - MCI) | Facilidad de acceso y uso del indicador. Aplicación rápida y práctica, si se obtienen todos los datos de entrada. | Restringir la CE solo en algunas prácticas, como la reutilización y el reciclaje. Dificultad para obtener datos de entrada, tales como: destino del producto después del uso y eficiencia del proceso de reciclaje. | Ellen MacArthur Foundation and Granta, (2015) |
| Métrica de circularidad a nivel de producto (Product Level circularity Metric - PCM) | Relación entre recirculación de materiales y valor económico. | Restringir la CE solo en algunas prácticas, como la reutilización, la remanufactura y el reciclaje | Linder et al., (2017) |
| Tarifas de reciclaje (Recycling Rates - RRs) | Indicador de ciclo abierto y cerrado, además de las tasas de recolección de residuos | Conocimiento previo requerido de MFA. Restricción de la CE solo en el contexto del reciclaje. | Haupt et al., (2017) |
| Conjunto de indicadores para evaluar la sostenibilidad (Set of Indicators to Assess Sustainability - SIAS) | Grupo de indicadores en tres dimensiones (económico, social y medioambiental) centrados en la práctica de la remanufactura. | Falta de herramientas computacionales para facilitar los cálculos. Restricción de CE solo en el contexto de remanufactura | Golinska et al., (2015) |

| Indicador | Ventaja | Desventaja | Referencia |
|--|--|---|---------------------|
| Indicadores de sostenibilidad (Sustainability Indicators - SI) | Grupo de indicadores centrados en el diseño y modularidad del producto, funcionalidad, la reconfiguración, la reutilización y la reciclabilidad. | Dificultades para obtener datos, especialmente en relación con los aspectos del final de la vida útil de los productos. | Mesa et al., (2018) |

Fuente: Adaptado de Rossi et al., (2019).

Elia et. al (2016), describieron los tipos de recolección de información acorde a las necesidades del modelo de economía circular dependiendo de la metodología a implementar. En la Tabla 3 se evidencia una explicación más detallada.

Tabla 3.

Metodologías de evaluación ambiental y requisitos CE.

| Metodología | Reducción de insumos y uso de recursos naturales | Participación creciente de recursos renovables y reciclables | Reducción de emisiones | Reducción de valiosas pérdidas de material. |
|--------------------|---|---|---------------------------------------|--|
| LCA | CD ¹ | CI ² | CD | CD |
| SFA | CD | CD | CD en flujos de sustancias peligrosas | CD |
| MFA | CD | CD | | CD |
| WF | CD en agua | | CD en contaminantes en el agua | CD |
| CF | CI | CI | CD en GEI | |
| EPMS/SEPI | CI | CI | CD en GEI | |
| SPI/DAI | CI | CI en energía | CD | |
| EF | CI | | CI | |
| MIPS | CD en intensidad material | | | |
| EDP | CI | | | |
| CED | | CD en energía | | |
| EE | | CD en energía | | |
| EMA | | CD en energía | | |
| EXA | | CD en energía | | |

¹ *Cuantificación directa*; ² *Cuantificación indirecta*. Fuente: Adaptado de Elia et al., (2016).

Por último, es pertinente acotar que la presente investigación elabora un modelo de economía circular que incluye o construye uno o varios indicadores bajo una descripción matemática. Para eliminar alcances del modelo bajo un orden conceptual, se enfatiza en la terminología utilizada por Sala et al. (2013), Elia et al. (2016), y Moraga et al. (2019), que hacen una clara distinción entre metodología, método, modelo e indicador bajo el marco de la EC. Como metodología (por ejemplo LCA) compila diferentes métodos (por ejemplo, categorías de impacto LCA); un método agrupa modelos, herramientas e indicadores relevantes para mostrar información sobre circularidad (por ejemplo, ciclos tecnológicos o su modelo de causa y efecto); un modelo es una descripción matemática para calcular un indicador que se puede obtener a través de una herramienta; y un indicador es un parámetro o una función de variables para proporcionar información relacionada con la circularidad o los efectos basado en datos cuantitativos y/o cualitativos (Moraga et al., 2019).

4.2.2. Experiencias internacionales y nacionales

Las experiencias internacionales y/o nacional se compilan en la siguiente tabla para resaltar el autor, caso de estudio, nivel de implementación (macro, meso o micro), objetivo y resultados obtenidos.

Tabla 4.

Experiencia internacionales y nacionales con relación a la implementación del modelo de economía circular en diferentes escalas geográficas.

| Autor/título | Objetivo/nivel de implementación | Resultado |
|---|--|---|
| Poponi et al., (2022): Evaluating the transition to the circular economy in the agri-food sector: Selection of indicators | Identificar los indicadores utilizados en el sector agroalimentario para medir la circularidad y comprender en qué dimensiones espaciales, macro-meso-micro y áreas de sostenibilidad se aplica. | Se establece un tablero comparativo de 102 indicadores de EC clasificado en el área de sostenibilidad (ambiental, económica y social) y espacial (micro, meso y macro) dentro de 8 alcances. Se identifica que los indicadores más sobresalientes son aquellos que comparan un referente con una prospectiva, apoyado en ejes transversales de diferentes disciplinas. |
| Maceno et al., (2022): Life Cycle Assessment and circular economy: A case study of a photovoltaic solar panel in Brazil. | Evaluar la circularidad de residuos de palen solar fotovoltaico por medio de indicadores compuestos de economía circular. | Se desarrolló un indicador compuesto a partir de la combinación de los indicadores Toolkit de Economía Circular, Prototipo de Indicador de Economía Circular, Indicador de Circularidad de Material y Evaluación del Ciclo de Vida (LCA). Como resultado se demostró una circularidad del 83% de los residuos y evitó la disposición del 17% de residuos en vertederos. |
| Stanković et al., (2021): An integrated approach of PCA and PROMETHEE in spatial assessment of circular economy indicators. | Proporcionar una evaluación especial de los indicadores de economía circular empleados en países UE, con el fin de determinar los sistemas más desarrollos y economías con mejor crecimiento en la última década, a través de un indicador compuesto de economía circular. | Se evaluaron once indicadores, de los cuales se destacan el indicador de (i) producción y consumo, (ii) tasa de reciclaje de residuos (residuos de diferentes fuentes y estados de la materia); (iii) tasa de recirculación de segundo uso; y (iv) valor agregador en la competitividad e innovación. Cada indicador presentó una ponderación diferente, que de acuerdo a los flujos de materia de cada país, se organizó un índice que agrupa las ponderaciones individuales. El índice permitió identificar las estrategias pertinentes para mejorar el grado de circularidad. |
| Rashid et al., (2021): Food waste recycling for compost production and its economic and environmental assessment as circular economy indicators of solid waste management. | Evaluar el impacto económico y ambiental a partir del potencial de producción de compostaje de la ciudad Meca. | Se evaluaron los indicadores de recirculación de residuos orgánicos y potencial de utilización / sustitución de compuestos, a partir del potencial de compostaje resultante del aprovechamiento de residuos orgánicos provenientes de la ciudad Meca. Como resultado, crearon un comparativo económico y ambiental acorde a escenarios de aprovechamiento, coadyuvado por un análisis de impacto de cada alternativa. Lo anterior, por medio de un indicador compuesto que agrupa las variables de análisis, denominado (<i>Economic and environmental savings</i>). Este indicador permitió estimar una producción de 0,23-0,4Mt de compostaje, lo cual permitirá una reducción de 0,076Mt de emisión de metano. Estos resultados se extrapolan a medidas monetarias, tales como bonos de carbono. |
| Hagman & Feiz (2021): Advancing the Circular | Evaluar las alternativas de gestión de subproductos | Se construye un marco de 8 áreas claves generadoras de subproductos en el proceso productivo, con el fin |

| Autor/título | Objetivo/nivel de implementación | Resultado |
|--|--|---|
| Economy Through Organic by-Product Valorisation: A Multi-criteria Assessment of a Wheat-Based Biorefinery. | bajo el método multicriterio aplicado a una biorrefinería de trigo. | de implementar 18 indicadores para evaluar el desempeño ambiental. Viabilidad y riesgo a largo plazo de las diferentes estrategias de economía circular. |
| Rakundo et al., (2021): A Methodological approach to Designing Circular Economy Indicators for agriculture: an application to the egg sector. | Establecer una metodología estructurada para diseñar indicadores de economía circular para el sector agrícola. | Se establece un enfoque metodológico estructurado para diseñar un indicador macroeconómico enfatizado a la agricultura. La metodología se basa en tres pasos, correspondiente a (i) marco analítico bajo el método ECOGRAI (método para diseñar e implementar sistemas de indicadores de desempeño); (ii) validación del desempeño coherente por medio del método DELPHI; y (iii) establecimiento de puntos de referencia para comparar puntos de análisis. |
| Fernandez-Mendoza et al., (2021) : Circular economy implementation in the agricultural sector: Definition, strategies and indicators. | Analizar los indicadores para medir la circularidad en actividades agrícolas. | El autor posterior de analizar los indicadores presentes hacia el sector agrícola, determina que no existe un marco estandarizado, por lo cual, no hay una clara definición, principios y estrategias aplicadas a dicho contexto productivo. Sin embargo, identifica las oportunidades de desarrollar indicadores compuestos que permitan medir el nivel de incorporación, beneficio ambiental y beneficio económico. |
| Oliveira et al., (2021): Circular economy in the agro-industry: Integrated environmental assessment of dairy products. | Analizar la implementación de la economía circular a partir del Marco Aplicado de Evaluación de Ciclo de Vida y Contabilidad EMergy (LEAF) en un sistema agroproductivo. | Se determina que la aplicación del indicador Contabilidad EMergy en sistemas agroproductivos permite identificar escenarios de mejora a partir del análisis de Ciclo de vida. En el estudio, se evaluó escenarios para determinar el grado de ecoeficiencia del sistema agroproductivo, con énfasis en variables tecnológicas y producción más limpia. Aunque los indicadores permiten evaluar el grado de economía circular, el autor sugiere tener precaución con la implementación de estos dos indicadores para solucionar problemas múltiples. |
| Barcelos et al., (2021):Circularity of Brazilian silk: Promoting a circular bioeconomy in the production of silk cocoons. | Identificar oportunidades de valor mediante la internalización de flujos de materia en la producción de capullos de seda para promover una economía circular. | Se propone en el estudio unas medidas basadas en lógica inversa (implementan LCA), establecimiento de cooperativas productivas y biodigestores comunitarios, con la finalidad de reincorporar el potencial de material (85,51%), y energía (100%) de los residuos generados en el proceso agroproductivo. Como resultado, identifica diferentes impactos positivos generados a las dimensiones del desarrollo sostenible. |
| Tashkeel et al., (2021): Cost-normalized Circular Economy Indicator and its application to post-consumer plastic packaging waste. | Desarrollar un indicador de circularidad de materiales para medir el ciclo de vida de una gama de productos. | Se desarrollo el Indicador de Circularidad de Material circioeconomico (MCIE), el cual evalúa productos acordes al balance de masa. La circularidad es contrastada por medio de costos evitados por el reciclaje y gestión de cada producto, cuyos valores son normalizados. |
| Mesa et al., (2020): Developing an indicator for material selection based on durability and environmental footprint: A Circular Economy perspective. | Elaborar un indicador que permita evaluar la durabilidad y huella ambiental para la selección de materiales enfocadas a aumentar la vida útil de un producto. | Se elabora el Indicador de Durabilidad del Material (MDI), que integra variables de durabilidad química y mecánica, tales como, resistencia a la inflamabilidad, resistencia a la radiación ultravioleta, resistencia al agua, resistencia a solventes orgánicos, resistencia mecánica, consumo de energía y huella de carbono, entre otros. Lo favorable del indicador elabo- |

| Autor/título | Objetivo/nivel de implementación | Resultado |
|--|--|--|
| Rabta (2020): An Economic Order Quantity inventory model for a product with a circular economy indicator. | Formular un modelo matemático para la toma de decisiones de una economía circular, a partir del indicador de Inventario de Cantidad de Pedido Económico. | rado corresponde a que permite evaluar los diferentes materiales (escenarios) y comparar bajo las huellas ambientales generadas. Se establece un modelo matemático que permite analizar escenarios de circularidad, a partir de variables de reincorporación y reutilización de balances de materia. Como resultado, determinaron que el grado de aceptación de modelos de economía circular es favorable cuando las empresas o el dirigente de la estrategia evidencia beneficios económicos rentables acorde a cada adaptación. Lo anterior, se articula con beneficios en impuestos y/o regulaciones en la cadena productiva. |
| Virtanen et al., (2019): Regional material flow tools to promote circular economy. | Desarrollar indicadores regionales de circularidad basados en flujos de materiales. | Se desarrolla un indicador compuesto que evalúa diferentes residuos provenientes de la industria del textil, plástico, madera y cenizas (de combustión de madera). El indicador se basa en flujos de materiales de residuos, y no en el flujo de materiales del proceso productivo, lo que genera un énfasis en el tipo de residuos y sus respectivas fuentes. El autor sugiere aplicar este enfoque, ya que en algunos casos podrían existir vacíos estadísticos que complejizan a los indicadores de orden regional (aplicado a diferentes industrias en un espacio geográfico). |
| Huysveld et al., (2019): Advancing circular economy benefit indicators and application on open-loop recycling of mixed and contaminated plastic waste fractions. | Analizar el indicador de Tasa de Beneficio de Reciclabilidad y Tasa de Beneficio de Contenido Reciclado en desechos plásticos mezclados y contaminados. | Se uso el análisis de ciclo de vida como método complementario a los indicadores de Tasa de Beneficio de Reciclabilidad y Tasa de Beneficio de Contenido Reciclado, ya que los indicadores base omitían parte de los procesos fuente de contaminantes. Se agrega nueva variable correspondiente a residuos provenientes de incinerados, y se agrega un indicador base para análisis de escenarios (escenario sin reutilización y escenario bajo estrategias de circularidad). Como resultado, determinaron que la estrategia de circularidad es más eficiente con respecto a la estrategia de incineración en relación a los impactos positivos al medio ambiente. |
| Helander (2019): How to monitor environmental pressures of a circular economy. | Evaluar los enfoques de la economía circular para determinar el progreso hacia la sostenibilidad ambiental. | Se evaluaron cuatro ciclos productivos, los cuales agrupan a diez indicadores de economía circular, tales como índice de circularidad, circularidad del nivel de producción, valor de la eficiencia de los recursos, entre otros, a partir del enfoque de flujo de materiales. Como resultado evidenciaron que los indicadores actuales no presentan articulación total con el enfoque de flujo de materiales, ya que solo se limitan a analizar las entradas y salidas, y no vinculan las huellas equivalentes de la actividad. |
| Moraga et al., (2019): Circular economy indicators: What do they measure?. | Identificar los indicadores microeconómicos y macroeconómicos empleados en la economía circular bajo diferentes enfoques de implementación. | Se identifica la clasificación de indicadores de economía circular, bajo el aspecto inicial <i>sensu stricto</i> aplicado a productos y/o componentes. Desglosa el concepto de modelo de economía circular hasta indicador, con la identificación de variables directas e indirectas. Plasma diez indicadores basados en flujos de materiales, y ordena cada indicador bajo diferentes estrategias y alcances de economía circular. |
| Pires & Martinho (2019): Waste hierarchy index | Proponer un índice de economía circular para evaluar | Se considera la evaluación de disposición final, incineración y vertedero de manera individual, por tal |

| Autor/título | Objetivo/nivel de implementación | Resultado |
|---|---|--|
| for circular economy in waste management. | la implementación en la gestión de residuos de la Unión Europea | motivo, el autor planteó un índice de jerarquía de residuos (WHI) bajo el marco de la economía circular. Propuso generar procesos positivos como la reciclaje y reutilización, y eliminar los procesos negativos como vertedero e incineración. |
| Rossi et al., (2019): Circular Economy indicators for organizations considering Sustainability and Business Models: plastic, textile and electro electronic cases. | Desarrollar un conjunto de indicadores multidimensionales para sustituir los indicadores simples sin enfoque de sustentabilidad a nivel meso-micro en modelos empresariales de plástico, textil y productos electrónicos. | El indicador elaborado por los autores contribuye en los objetivos del desarrollo sostenible, específicamente Agua limpia y saneamiento (Obj. 6), asequible y energía limpia (Obj. 7), Trabajo decente y crecimiento económico (Obj. 8), Industria, innovación e infraestructura (Obj. 9), consumo y producción responsables (Obj. 12) y acción climática (Obj. 13). Los resultados permitieron una incorporación de la sustentabilidad a nivel empresarial que disminuye los impactos al entorno. |
| Wang et al., (2019): The circular economy and carbon footprint: A systematic accounting for typical coal-fuelled power industrial parks. | Desarrollar un modelo de ciclo de vida basado en las emisiones de carbono y reducción de carbono para cuantificar la huella de carbono a un parque industrial bajo el enfoque de economía circular. | Se propone un modelo de ciclo de vida basado en el combustible empleado por el parque industrial de China, el cual cuantifica su implementación de manera articulada con la huella de carbono evitada (equivalente a un indicador compuesto). Dicho modelo, permite estimar las reducciones de emisiones bajo supuestos de uso de fuentes de energía alternativa. |
| Salguero-Puerta et al., (2019): Sustainability Indicators Concerning Waste Management for Implementation of the Circular Economy Model on the University of Lome (Togo) Campus. | Proponer indicadores de economía circular para evaluar el escenario de aprovechamiento de subproductos sólidos orgánicos, energía y llantas usadas. | Propone una serie indicadores con base a un procedimiento matemática para evaluar la implementación de alternativas bajo esquemas de participación comunitaria con información base de producción hasta el 2020. El modelo se proyecta hasta el año 2027, que identificó una viabilidad del 59.5% para el aprovechamiento de materia orgánica, y 27% como fuente de energía alterna, aumento del 19€ en aprovechar residuos plásticos para el 2027. Los indicadores parten del principio de reutilización y reaprovechamiento. |
| Nuñez-Cacho et al., (2018): What Gets Measured, Gets Done: Development of a Circular Economy Measurement Scale for Building Industry. | Desarrollar una escala de medición de economía circular para la industria de la construcción a partir del método Delphi. | Se desarrolló una escala de evaluación y ponderación de economía circular para industrias de construcción, basado en la gestión de recursos, gestión eficiente de la energía, y gestión de agua y materiales. Lo anterior, se contrastó bajo dos dimensiones de impacto ambiental: emisiones y generación de residuos. Como resultado del contraste, se generó un indicador compuesto de gestión de residuos, el cual evalúa el grado de economía circular en una escala Likert, no obstante presenta dificultades por la subjetividad del observador. |
| Lonca et al., (2018): A Bi-dimensional assessment to Measure the Performance of Circular Economy: A case study of tires End-of-Life Management. | Aplicar el Indicador de Circularidad de Materiales (MCI) y Evaluación de Ciclo de Vida (LCA) en estrategias de circularidad de neumáticos. | Se aplica dos indicadores de economía circular al proceso industrial de Brasil, en el cual, establecen variables cuantitativas para determinar el potencial de reincorporación. Estos indicadores presentan un factor diferencial ya que miden aspectos a la salud. El autor sugiere establecer indicadores que evalúen aspectos ambientales y económicos acorde a las estrategias circulares. |
| Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible | Establecer las principales líneas de acción para la im- | Identifica los principales materiales y fuente de generación de residuos con potencial de reincorporación a la cadena productiva, en especial los envases |

| Autor/título | Objetivo/nivel de implementación | Resultado |
|--|---|--|
| (2018): Estrategia Nacional de Economía Circular. | Implementación de la estrategia transversal de economía circular | y empaques plásticos, optimización y aprovechamiento de biomasa, circulación del agua (como efluente residual), fuente y aprovechamiento de energía, y consumo de materiales en centro urbanos. |
| Huysman et al., (2017): Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. | Desarrollar un indicador de economía circular que permita cuantificar la tasa de reincorporación de residuos plásticos. | Se desarrolló un indicador capaz de cuantificar el rendimiento de la economía circular en el tratamiento de los residuos del plástico. Este indicador basado en el flujo de materiales, presenta viabilidad para ser implementador en diferentes estrategias, ya que contribuye a la gestión de los residuos de un sector crítico para las dimensiones del desarrollo. |
| Molina-Moreno et al., (2017): Design of indicators of circular economy as instruments for the evaluation of sustainability and efficiency in wastewater from pig farming industry. | Diseñar un indicador de economía circular como instrumento para evaluar la sostenibilidad y eficiencia de las aguas residuales de la industria porcina. | El indicador corresponde a un indicador múltiple que evalúa (i) uso de efluente residual bajo un análisis de flujo de materia; (ii) potencial de fertilización acorde a las tasas de digestión de los tratamientos de aguas residuales; y (iii) potencial de biogás. Como resultado, demostraron que el indicador permite evaluar el grado de reúso de agua residual, implementación de fertilizantes y generar producto sustituto de fertilizante. |
| Franklin-Johnson et al., (2016): Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance. | Elaborar un indicador de longevidad de productos acorde a estrategias de economía circular. | Se elabora un indicador cuantitativo que estima el valor a atreves de la retención d material. Se evalúan tres variables correspondientes a vida útil inicial, vida útil renovada y vida útil reciclada. Como resultado, el indicador revela que existe un mayor grado de circularidad cuando los productos desde su creación presentan condiciones de vida útil más extensa, mecanismos eficientes de recolección o devolución de partes, y procesos más eficientes de recirculación. |
| Strazza et al., (2015): Life Cycle Assessment from food to food: A case study of circular economy from cruise ships to aquaculture. | Evaluar los posibles beneficios potenciales de sustituir compuestos alimenticios de la acuicultura por residuos alimenticios atreves de un indicador de economía circular. | Se elabora un indicador compuesto que evalúa la huella de carbono, flujo de energía y huella hídrica desde la perspectiva del ciclo de vida de los residuos de crucero. Este indicador incorpora los residuos y subproductos generados en las diferentes fases de aprovechamiento, apoyado en el flujo de materiales. |
| Geng, Fu, Sarkis, & Xue (2012): Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. | Determinar y describir los indicadores macro implementados en diferentes industrias con sus respectivas unidades de medición bajo el marco de la Ley de Promoción de Producción más Limpia y Ley de Promoción de Economía Circular en China | Se identificó 22 indicadores para el análisis y 12 indicadores de monitoreo para el sector industrial bajo una escala macro. Los indicadores incluyen las dimensiones económicas, ambientales y sociales, no obstante, la dificultad de medición parte del estado del conocimiento de la respectiva industria |
| Geng, Zhang, Ôté, & Qi (2008): Evaluating the applicability of the Chinese eco-industrial park standard in two industrial zones. | Explicar la aplicabilidad y la viabilidad de los indicadores macro y meso implementados en dos sectores industriales de China | Los indicadores de EC se diagnosticaron en los parques industriales de Tianjin y Dalian. Los principales aspectos evaluados correspondieron a la dimensión económica, en especial la tasa de consumo y generación residuos. Sin embargo, el autor recomienda modificar el esquema de indicadores para incorporar la dimensión social y ambiental. |
| Moriguchi (2007): Material flow indicators to measure progress toward | Explicar los indicadores de economía ambiental enfocados bajo la metodología | La metodología implementada en Japón corresponde a subcategoría RP (<i>resource productivity</i>) cuya fina- |

| Autor/título | Objetivo/nivel de implementación | Resultado |
|---------------------------------|--|--|
| a sound material-cycle society. | de <i>Material Flow</i> en el contexto industrial de Japón | lidad es evaluar los escenarios de eficiencia e ineficiencia de la dimensión económica y ambiental del sistema de producción. Las ventajas del indicador es un diagnóstico a escala macro con posibilidad de incorporar diferentes sistemas de producción, sin embargo, su mayor desventaja es el enfoque individual para evaluar la dimensión social. |

Con todo esto, se visualiza diferentes avances en el desarrollo metodológico de la economía circular, que evidencia mecanismos de evaluación para diferentes sectores productivos. La presente investigación rescata de lo anterior, las metodologías de cuantificación de variables que permita normalizar diferentes unidades de medida e incorporar en un modelo o proyección de tasa de residuos. Así mismo, la incorporación de varias fuentes de residuos en una cadena productiva y las principales líneas de acción de aprovechamiento.

4.3. Marco geográfico

Las ocho (8) agroindustrias objeto de la presente investigación se ubican en el departamento de Casanare con localización en cinco (5) municipios correspondientes a (i) Orocué (extractora no. 3 y 7), (ii) Maní (extractora no. 1 y 5), (iii) Villanueva (extractora no. 2 y 8), (iv) Tauramena (extractora no. 4), y (v) Nunchia (extractora 6). En la Tabla 5 se compila la localización geográfica de las plantas de beneficio del departamento de Casanare, las cuales se plasman en la Figura 1 para identificar la espacialización geográfica de la actividad palmera a nivel del departamento de Casanare.

Tabla 5.

Localización geográfica de las plantas de beneficio de CPO en el departamento de Casanare para el año 2019.

| Numero | Agroindustria | Localización geográfica | Municipio |
|---------------|---|--------------------------------|------------------|
| 1 | Extractora el Estero S.A.S. ¹⁰ | 4°35'42.23"N - 72°16'13.82"O | Maní |
| 2 | Extractora del Sur de Casanare S.A.S. ¹¹ | 4°29'36.34"N - 72°50'48.56"O | Villanueva |
| 3 | Industria Aceitera de Casanare S.A.S. ¹² | 5° 5'17.07"N - 71°57'37.21"O | Orocué |

¹⁰ Palmar el Quitebe S.A.S., planta en producción a partir de junio de 2019 (Fedepalma, 2020a).

¹¹ Extractora del Sur de Casanare S.A.S., planta en producción previo al año 1994 (Fedepalma, 1994).

¹² Industrial Aceitera de Casanare S.A., planta en producción a partir de diciembre de 2016 (Fedepalma, 2018b).

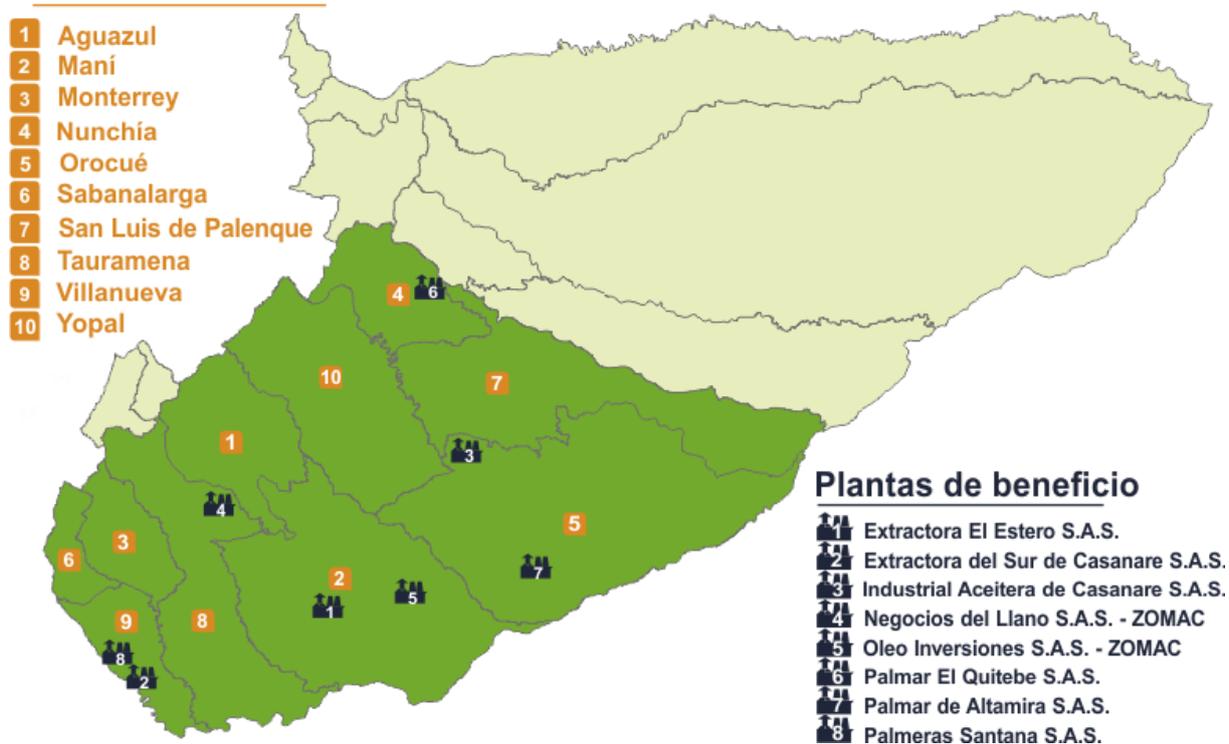
| Numero | Agroindustria | Localización geográfica | Municipio |
|--------|--|------------------------------|------------|
| 4 | Negocios del Llano S.A.S – Zomac ¹³ | 4°56'2.28"N - 72°38'41.42"O | Tauramena |
| 5 | Oleo Inversiones S.A.S – Zomac ¹⁴ | 4°41'23.46"N - 72° 4'56.66"O | Maní |
| 6 | Palmar el Quitebe S.A.S. ¹⁵ | 5°33'35.36"N - 72°03'32.00"O | Nunchía |
| 7 | Palmar de Altamira S.A.S. ¹⁶ | 4°45'1.25"N - 71°40'57.96"O | Orocué |
| 8 | Palmera Santana S.A.S. ¹⁷ | 4°35'42.17"N - 72°49'40.56"O | Villanueva |

Fuente: Adaptado de Fedepalma (2019a), Fedepalma (2020a) y Google (2021).

Figura 1.

Plantas de beneficio del departamento de Casanare identificadas en el año 2019.

Municipios palmeros



Fuente: Modificado de Fedepalma (2019b) y Fedepalma (Fedepalma, 2020b).

¹³ Negocios del Llano S.A.S. – Zomac (antes Extractora Cusiana S.A.S.), ubicada en Tauramena, es tomada en arriendo por Negocios del Llano S.A.S. - Zomac a partir de septiembre de 2018 (Fedepalma, 2019a). La planta presenta actividad en noviembre de 2008 (Fedepalma, 2009).

¹⁴ Oleo Inversiones S.A.S. – Zomac (antes Extractora Cusiana S.A.S.), ubicada en Maní, es tomada en arriendo por Oleo Inversiones S.A.S. - Zomac a partir de septiembre de 2018 (Fedepalma, 2019a). La planta presenta actividad en noviembre de 2008 (Fedepalma, 2009).

¹⁵ Extractora el Estero S.A.S., planta en producción a partir de diciembre de 2019 (Fedepalma, 2020a).

¹⁶ Palmar de Altamira S.A.S., planta en producción a partir de julio de 2014 (Fedepalma, 2015).

¹⁷ Palmar de Altamira S.A.S., planta em producción previo al año 1994 (Fedepalma, 1994).

4.4. Marco legal

La legislación vigente conforme a la presente investigación se describe en la Tabla 6.

Tabla 6.

Legislación relacionada al tema de investigación.

| Normativa | Contenido principal |
|---|--|
| Ley 99 de 1993. Art 42, 79 y 80 | Se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Se otorgó funciones a las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), se regula procedimientos de Licencia Ambiental como requisitos para la ejecución de proyectos o actividades que puedan causar daño al ambiente y los mecanismos de participación ciudad en todas las etapas de desarrollo de este tipo de proyectos (compilado en el decreto 1076 de 2015). |
| Decreto 2811 de 1974 | Código Nacional de Recursos Naturales y Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. <i>Decreto 1594 de 1984:</i> Reglamentación de usos de agua y residuos líquidos (Ibidem anterior). <i>Decreto 155 de 2004:</i> Tasa por utilización de aguas (Ibidem anterior). |
| Decreto 1076 de 2015 | <i>Decreto 2667 de 2012:</i> Reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones (Ibidem anterior). <i>Resolución 081 de 2001:</i> Adopta del formulario de información relacionada con el cobro de tasa retributiva y estado de los recursos (Ibidem anterior). <i>Resolución 1207 de 2014:</i> Establece los lineamientos permisibles para el aprovechamiento de aguas residuales tratadas (Ibidem anterior). |
| Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (2010) | Establece como estrategia el uso eficiente y sostenible del agua, la cual se orienta a fortalecer la implementación de procesos y tecnologías de ahorro y uso eficiente del agua |
| Estrategia Nacional de Economía Circular (2018) | Programa de transformación del sector productivo en el lineamiento de las 9R |

5. METODOLOGÍA

El alcance de la presente investigación fue de tipo descripto, ya que describió y caracterizó los residuos y subproductos desde un caso específico para determinar el potencial de segundo uso bajo estrategias de economía circular. Asimismo, se empleó el método deductivo, ya que analizó datos del caso puntual bajo primicias de enfoques de valoración y aprovechamiento de residuos y subproductos para proponer indicadores de economía circular encaminadas al desarrollo sostenible. Lo anterior con el objeto de proponer un modelo de economía circular que solucione las falencias del sector agroindustrial del departamento de Casanare relacionada con la gestión de los residuos y subproductos de las plantas de beneficio. La investigación mostró aspectos relevantes que soportó el estudio por medio del diagnóstico ambiental, económico y tecnológico de las variables influyentes en el proceso de transformación de la materia. Por medio del diagnóstico, se establecieron los diferentes coeficientes de residuos con base a la información recolocada que provino de las agroindustrias del departamento de Casanare y otras fuentes. Lo anterior, permitió identificar los eslabones de producción susceptibles a potencializar su producción y disminución del consumo de materia prima y energía. Así mismo, el modelo facilitó reconocer los beneficios económicos y ambientales asociados al modelo. Cabe resaltar que la información de residuos y subproductos correspondiente a la etapa de vivero, sembrado y consumo no fueron registrados en el modelo. Así mismo que el tiempo de estudio seleccionado, equivalente a 5 años previos, se determinó dado a la información accesible por las fuentes de información.

Para el desarrollo metodológico de la presente investigación se empleó enfoque mixto, correspondiente a (i) cualitativo, en las fases de identificación, caracterización y evaluación de los residuos y subproductos del sector palmicultor en plantas de beneficio del departamento de Casanare; y (ii) cuantitativo, en la valoración de enfoques de aprovechamiento, estimación de costos evitados y proyección del modelo. Lo anterior facilitó establecer un modelo de economía circular para el aprovechamiento de los residuos y subproductos líquidos y sólidos, así mismo, la disminución y control de los impactos ambientales y sociales generados al entorno del área de producción. La metodología se construyó a partir de las experiencias internacionales referenciadas en la investigación.

Cabe resaltar que, bajo los compromisos adquiridos con las fuentes primarias y secundarias para la presente investigación, se declaró un compromiso de confidencialidad, lo que conlleva a renombrar las plantas de beneficio con las primeras 8 letras del abecedario bajo un sistema aleatorio. Lo anterior es a petición de las agroindustrias, quienes han tenido inconvenientes al dar acceso a la información por posibles consecuencias legales, sociales, económicas y ambientales.

5.1. Métodos e instrumentos

Tabla 7.

Resumen de métodos e instrumentos empleados en la formulación del modelo de economía circular para la valoración de residuos y subproductos del sector palmicultor del departamento de Casanare.

| Objetivo | Fase equivalente | Método principal | Instrumentos |
|---|---|---|--|
| <p>Determinar las variables y constantes de los residuos y subproductos del sector palmicultor que se generan en el proceso de transformación de RFF en plantas de beneficio del departamento de Casanare.</p> | <p><i>Fase 1.</i> Determinación y caracterización de residuos y subproductos de la agroindustria de palma de aceite del departamento de Casanare.</p> | <p>Observación estructurada – revisión de documentos – revisión en campo</p> <p>Revisión sistemática sobre residuos y subproductos agroindustriales e información de agroindustrias</p> | <p>- Registros públicos - Documentos de cumplimiento ambiental - Formato de recolección de información en campo (anexo 1) - Matriz de revisión sistemática literaria- - Matriz de importancia ambiental.</p> |
| <p>Herramienta de análisis: IBM Corp. Software SPSS Statistics v. 27.0. - Licencia Libre, y Microsoft Excel ®</p> | | | |
| <p>Identificar los enfoques y variables utilizados en la valoración de residuos y subproductos del sector palmicultor que se generan en el proceso transformación de RFF en plantas de beneficio para la construcción del modelo de economía circular.</p> | <p><i>Fase 2.</i> Valoración de los residuos y subproductos de agroindustria de palma de aceite.</p> <p><i>Fase 3.</i> Valoración económica de los residuos y subproductos bajo el método de costos evitados.</p> | <p>Revisión sistemática sobre valoración de residuos y subproductos de palma de aceite</p> <p>Valoración de los residuos y subproductos – Valoración de Importancia Ambiental (descriptivo y analítico)</p> | <p>- Matriz de revisión sistemática literaria - Matriz de valoración de costos evitados.</p> |
| <p>Herramienta de análisis: IBM Corp. Software SPSS Statistics v. 27.0. - Licencia Libre, y Microsoft Excel ®</p> | | | |
| <p>Analizar las variables bajo el marco de economía circular para integrar el modelo, desde una perspectiva sostenible, con base en la indagación y experiencias obtenidas en el proceso de investigación, aplicado a la agroindustria de palma de aceite del departamento de Casanare.</p> | <p><i>Fase 4.</i> Modelo de economía circular para la reincorporación de residuos y subproductos del sector palmicultor del departamento de Casanare.</p> | <p>Desarrollo de indicadores de gestión ambiental y economía circular.</p> | <p>- Matriz de alternativas. - Indagación de indicadores de EC referente a las alternativas de los subproductos</p> |
| <p>Herramienta de análisis: Microsoft Excel ®</p> | | | |

La investigación está subdividida en cuatro (4) fases metodológicas con el fin de abarcar los objetivos propuestos en la presente investigación. A continuación, se describen las fases:

Fase 1. Determinación y caracterización de residuos y subproductos de la agroindustria de palma de aceite del departamento de Casanare.

La producción de Aceite de Palma Crudo (CPO), empleado por las ocho agroindustrias del departamento de Casanare, consiste en la recepción de frutos fresco, esterilización, desfrutado, digestor y prensado, entre otros procesos. Cada proceso genera un residuo y/o subproducto, con tasas variadas y condiciones físicas y químicas diferentes, lo que genera un abanico de alternativas de implementación y reutilización bajo el marco de la economía circular. Para caracterizar los residuos y subproductos se empleó el método de observación estructurada por medio de visita de campo e informes de gestión ambiental de las diferentes agroindustrias reportado a las entidades ambientales y/o Fedepalma, con la finalidad de identificar el proceso fuente, condiciones físicas y químicas, enfoque de aprovechamiento actual y tasa de producción.

Tabla 8.

Fuentes de información que se emplearon para la investigación.

| FUENTE DE INFORMACIÓN SECUNDARIA |
|---|
| A. Extractora El Estero S.A.S., municipio de Maní, predio El Socorro y La Esperanza. |
| B. Extractora del Sur de Casanare S.A.S., municipio de Villanueva, vereda Puerto Mirhyam, con sede de oficina de la ciudad de Bogotá, Cr 11 no 82-01. |
| C. Industria Aceitera de Casanare S.A.S., municipio Orocué, vereda Altamira. |
| D. Negocios del Llano S.A.S - Extractora Cusiana S.A.S., municipio de Tauramena, vereda Chitamena. |
| E. Oleo Inversiones S.A.S ZOMAC, vereda Santa Elena de Cusiana, municipio Maní, predio El Vergel. |
| F. Palmar El Quitebe S.A.S., municipio de Nunchia, vereda El Caucho. |
| G. Palmar de Altamira S.A.S., municipio Orocué, vereda Palmarito, con sede de oficina de la ciudad de Palmira, Valle, Km 7 vía el cerrito. |
| H. Palmera Santana S.A.S., municipio de Villanueva, vereda Puerto Mirhyam, Km 4 vía Caribayona. |
| I. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite - Fedepalma. |
| J. Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite – Cenipalma. |
| K. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM. |
| L. Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia – Corporinoquia. |
| M. Gobernación de Casanare, secretaria de Desarrollo Económico, Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente |

Para la construcción de modelos e indicadores de economía circular, es pertinente caracterizar la fuente, tipo de residuo y/o subproducto, tasa de generación y disposición actual, tal como lo desarrollaron autores en experiencias (investigaciones) internacionales correspondiente a Rakundo et al., (2021), Oliveira et al., (2021), Barcelos et al., (2021), Moraga et al., (2019), Salguero-Puerta et al., (2019), Wang et al., (2019), entre otros. Por tal razón, se solicitó por medio de carta institucional a las ocho agroindustrias del departamento de Casanare y Fedepalma, la siguiente información:

- A. Determinación de la tasa de procesamiento, medida en tonelada por año de Racimo de Fruto Fresco (RFF) o CPO.
 - A.1. Peso promedio de RFF expresado en kg o t.
 - A.2. Cantidad de RFF requerido para procesar una tonelada de CPO.
- B. Caracterización de subproductos generados en el proceso de extracción.
 - B.1. Caracterización de residuos sólidos equivalente a Racimos Vacíos o tusas, fibra, cáscara y ceniza.

B.1.1. Estimación de la tasa de generación de residuos sólidos y subproductos, medido en t/año, kg/año, kg/RFF o t/RFF, para EFB, Fibra, Cascarilla, Ceniza y POME.

B.1.2. Cualificar y cuantificar las propiedades físicas y químicas del residuo sólido orgánico (propiedades susceptibles de aprovechamiento según potencial energético y fuente de nutrientes).

B.2. Caracterización de vertimientos de agua residuales que se genera en el proceso de extracción, según informes soportados por las agroindustrias.

B.2.1. Propiedades físicas y químicas del vertimiento acorde a los informes de cumplimiento ambiental presentado por las agroindustrias a las entidades correspondientes para el permiso de tasa retributiva, Los parámetros a medir son físicos (pH y temperatura) y químico (DBO, DQO, SS, SVT y grasas y aceite).

C. Análisis de tendencia de área de producción y tasa de transformación.

C.1. Área sembrada y área cosechada en unidades de hectárea (acumulado regional).

C.2. Tasa de transformación CPO/año y CPO/ha.

La información se recolectó por cada agroindustria, en un intervalo de 5 años previos a la investigación (2015-2019). La información se usó para calcular los coeficientes de producción por medio de regresión lineal o no lineal que describa la tasa de producción. Cada dato agrupado en las secciones mencionadas se analizó bajo estadística descriptiva e inferencial (Correlación Pearson).

Adicional, se empleó una revisión sistemática en buscadores de Google Scholar, Springer Link y Science Direct, para contrastar la información del departamento de Casanare. Por tal razón, se empleó una revisión en un rango de 25 años (2019-1994) con las palabras claves residuos (waste), subproducto (by-product), aceite de palma (oil palm).

Posterior, se identificó y evaluó los impactos ambientales generados por la agroindustria de palma de aceite en la etapa de transformación de la materia basado en la metodología de Blanco et al., (2009) y Toro et al., (2016). Para ello, se (i) identificaron los factores ambientales afectados o vulnerados por la contaminación de residuos y subproductos de la agroindustria de palma de aceite, en relación a los componentes abiótico, biótico y sociocultural y (ii) se calificó y cuantificó los componentes ambientales a partir de la escala de magnitud e intensidad. Lo anterior, se realizó por medio de la matriz de importancia (ver Tabla 9).

Tabla 9.

Matriz de importancia para la evaluación de impactos.

| Factor ambiental | SB | Situación temporal (ST1) | | | | Situación temporal (STn) | | | | Total de importancia | |
|----------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------------|--------------|
| | | Acciones | | | Totales | Acción | | | Total | $\Sigma (+)$ | $\Sigma (-)$ |
| | | A ₁ | A _j | A _m | Abs | A ₁ | A _j | A _m | Abs | | |
| F₁ | SB ₁ | I ₁₁ | I _{1j} | I _{1m} | I ₁ | I ₁₁ | I _{1j} | I _{1m} | I ₁ | | |
| F_i | SB _i | I _{i1} | I _{ij} | I _{im} | I ₂ | I _{i1} | I _{ij} | I _{im} | I ₂ | | |
| F_n | SB _n | I _{n1} | I _{nj} | I _{nm} | I _n | I _{n1} | I _{nj} | I _{nm} | I _n | | |
| Total | $\Sigma (+)$ | | | | | | | | | | |
| | $\Sigma (-)$ | | | | | | | | | | |

Fuente: Adaptado de Blanco et al., (2009) y Toro et al., (2016).

Fase 2. Valoración de los residuos y subproductos de agroindustria de palma de aceite.

Los residuos y subproductos agroindustriales constituyen una fuente de recurso biológico renovable con potencial de incorporación para la obtención de bioproductos de alto valor añadido. El desarrollo industrial con el esquema de aprovechamiento y utilización de residuos y subproductos se convirtió en una prioridad para la gestión empresarial bajo un marco de economía verde y economía circular, dado al interés como motores de crecimiento, innovación y creación de empleo. La valoración y evaluación de las salidas constituye la base de estudios relacionados con el desarrollo del modelo de economía circular (Callejo et al., 2015; Ferronato et al., 2019; Maina et al., 2017; Rashid & Shahzad, 2021).

Para tal fin, a partir de la información recolectada sobre la caracterización de residuos y subproductos de la *fase 1*, se indagó las principales tendencias de valoración de residuos y subproductos agroindustriales de palma de aceite. Lo anterior se desarrolló por medio de una revisión sistemática de literatura de los últimos 10 años, en revistas de Springer-Link, Science Direct y Google Scholar, basado en la metodología de Cardenas et al. (2020), para identificar los enfoques, métodos, tecnologías y costos asociados a su respectiva implementación. En la revisión, se usó la combinación de las siguientes palabras claves en idioma inglés como principales descriptores temáticos: (i) residuos (*waste*); (ii) valorización (*valorization*); y (iii) palma de aceite (*oil palm*). La segunda fase, implementó palabras claves para enfocar la valoración (o enfoque de aprovechamiento) de los residuos y subproductos, correspondiente a fuente de nutriente (*nutrient source*), actividad enzimática (*enzyme activity*), biocombustible (*biofuel*), y otros intereses. Por último, se empleó una tercera fase para identificar el enfoque tecnológico por el cual transforman los residuos y subproductos, correspondiente a químico (*chemical*), físico (*physical*) y biológico (*biological*) (ver Tabla 10).

Tabla 10.

Orden de importancia detectado en relación a la valoración de residuos y subproductos de palma de aceite a nivel mundial en base de datos.

| Fase | DT ^f | Google Scholar | | Science Direct | | SpringerLink | | $\bar{x}Q^b$ | ΔQ^c |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------|--------------|------|--------------|--------------|
| | | DD ^d | Q ^e | DD ^d | Q | DD | Q | | |
| 1. DP ^g | Waste Oil Palm and valorization | 13.400 | 1 ^a | 1.223 | 1 | 780 | 1 | - | - |
| 2. Enfoque de aprovechamiento | Biofuel | 13.200 | 98,5 | 762 | 62,3 | 337 | 43,2 | 68,1 | Q4-Q3-Q3 |
| | Nutrient source | 12.500 | 93,3 | 578 | 47,3 | 361 | 46,3 | 62,3 | Q4-Q2-Q3 |
| | Enzyme Activity | 10.500 | 78,4 | 567 | 46,4 | 349 | 44,7 | 56,4 | Q4-Q2-Q3 |
| | Construction | 8.330 | 62,2 | 411 | 33,6 | 204 | 26,2 | 40,6 | Q3-Q2-Q2 |
| 3. Enfoque tecnológico | Technology | 15.100 | 1 | 1.094 | 1 | 734 | 1 | - | - |
| | Chemical | 13.200 | 87,4 | 1.047 | 95,7 | 699 | 95,2 | 92,8 | Q4-Q4-Q4 |
| | Physical | 14.500 | 96,0 | 745 | 68,1 | 488 | 66,5 | 76,9 | Q4-Q3-Q3 |

| Fase | DT ^f | Google Scholar | | Science Direct | | SpringerLink | | $\bar{x}Q^b$ | ΔQ^c |
|------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|------|--------------|------|--------------|--------------|
| | | DD ^d | Q ^e | DD ^d | Q | DD | Q | | |
| | Biological | 10.200 | 67,5 | 718 | 65,6 | 425 | 57,9 | 63,7 Q3 | Q3-Q3- Q3 |

Nota: ^a (13200/13400) *100 = 98,5; ^b Promedio de cuartil; ^c Variación del cuartil según la base de datos; ^d Documentos detectados; ^e Índice de frecuencia de citación; ^f Descriptores temáticos; ^g Descriptor principal.

La información recolectada se compiló en una matriz descriptiva, con el fin de analizar las tendencias a partir de la estadística descriptiva e inferencial (Prueba Chi-cuadrado de Pearson).

Fase 3. Valoración económica de los residuos y subproductos bajo el método de costos evitados.

Posterior a la identificación y valoración de los residuos y subproductos generados en las agroindustrias de palma de aceite del departamento de Casanare, se estimó los costos asociados a la gestión de residuos y subproductos del procesamiento de RFF para el año 2019. Dichos costos, se evaluaron acorde la siguiente información:

- A. Costo asociado a la generación de residuos y subproductos.
 - A.1. Costo por disposición y/o tratamiento de EFB, Fibra, Cascarilla y Ceniza, medida en \$ COP/t o \$ COP/kg.
 - A.2. Costo de vertimiento o tratamiento de POME, medido en \$ COP/m³.
- B. Costo relacionado a las alternativas de aprovechamiento.
 - B.1. Costo asociado a mano de obra, medido en \$ COP/t RFF
 - B.2. Costo de materiales a ser sustituidos o complementados, medido en \$ COP/ t o \$ COP/ m³.
- C. Potencial de aprovechamiento (año base 2019)
 - C.1. Potencial energético de la tasa de generación de residuos y subproductos, medido en TJ/año.
 - C.2. Potencial de fuente de nutrientes acorde a la generación de residuos y subproductos, medido en t compost/ha o kg compost/ha.
 - C.3. Potencial de fertirriego acorde a la tasa de generación POME, medido en m³/ha.

Adicional, para hacer el cuadro comparativo de costos evitados, se requiere tener presente la normativa ambiental vigente, tales como resolución 1207 de 2014 y decreto 631 de 2015.

La información se compila en la Tabla 11, y se procesa el costo total evitado acorde a la Ecuación 1.

Tabla 11.

Resumen de costos generados en cada alternativa convencional y alternativa de economía circular de la agroindustria de palma de aceite y su respectivo costo de tratamiento y/o disposición.

| Alternativa | Cantidad del subproducto (kg-t-m ³) | Costo unitario | | | Costo total evitado |
|----------------------------|---|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | | CSARS ₁ | CSARS ₂ | CSARS _n | |
| Alternativa convencional 1 | α_n | Cev_1 | Cev_2 | Cev_3 | Ce_T |
| Alternativa convencional 2 | α_n | Cev_1 | Cev_2 | Cev_3 | Ce_T |
| Alternativa convencional n | α_n | Cev_1 | Cev_2 | Cev_3 | Ce_T |

Nota: CSARS: Costo Asociado al Residuo y/o Subproducto.

La estimación económica se evaluó por medio de costos evitados o mitigación, medido en unidades de \$ COP (año referente 2019). Los costos evitados se resumen en la Ecuación 1:

$$Ce_T = \alpha_1 * Cev_1 * \Delta_1 + \alpha_2 * Cev_2 * \Delta_2 + \alpha_n * Cev_n * \Delta_n$$

Ecuación 1.

Fórmula general de costos evitados

Donde, Ce_T corresponde a Costos evitados totales; α Cantidad del subproducto representado en unidades métricas; y Δ Variación del costo total (costo cancelado por no realizar medidas correctivas). Los costos evitados determinaron el beneficio económico de implementar el esquema bajo el marco de economía circular. Con base a la información procesada, se procedió con el análisis de alternativas de manejo de residuos y subproductos bajo el esquema de economía circular.

Fase 4. Modelo de economía circular para la reincorporación de residuos y subproductos del sector palmicultor del departamento de Casanare.

Indicador RRSFM (Reincorporación de Residuos y Subproductos por Flujo de Materiales)

La implementación de indicadores ambientales (con énfasis en aprovechamiento de los residuos y subproductos de la presente investigación), permitió crear herramientas para el análisis del estado actual y futuro (implementación del modelo bajo supuestos escenarios de aprovechamiento). En las fases previas, se analizó el estado actual de la agroindustria de palma de aceite del departamento de Casanare, con sus respectivos impactos y valoración de las actuales medidas de gestión de residuos y subproductos. Para la implementación del modelo, se propuso previamente diferentes alternativas de aprovechamiento a partir de un panel de expertos, cuyos actores tienen experiencia en relación a la reincorporación y reutilización de residuos agroindustrial de palma de aceite, con vinculación pública o privada en el sector productivo. La muestra fue seleccionada por método no probabilístico por conveniencia. Las alternativas se propusieron bajo un esquema de reutilización, reincorporación y/o reciclado, para residuos y subproductos según las técnicas y métodos abordados en el capítulo del Marco de Referencia, tales como:

- A.1. Efluente residual como sistema de fertirriego y alternativa de suministro hídrico para disminuir la tasa de captación.
- A.2. Efluente residual como afluente de reúso para disminuir la tasa de uso de agua en los procesos internos de la agroindustria.
- A.3. Reutilización residuos orgánicos como acondicionador de suelo.
- A.4. Reutilización residuos orgánicos como fuente de nutrientes.
- A.5. Reutilización de residuos orgánicos y líquidos como fuente de energía.

Posterior al seleccionar las alternativas viables acorde a las condiciones de producción de residuos y subproductos, se consolidó la información por agroindustria (Ag) en relación a: (i) Generación Total (Gt), (ii) Aprovechamiento Actual (Ac) y (iii) Aprovechamiento Potencial (Ap), basado en las tasas de residuos y subproductos de palma de aceite de cada agroindustria acorde a las variables de EFB, Fibra, Cascarilla, Ceniza y POME.

Cabe connotar que: (i) el Aprovechamiento Actual correspondió a las prácticas de gestión ambiental implementadas por las agroindustrias acorde a las alternativas indagadas, y (ii) el Aprovechamiento Potencial corresponde a la cantidad total de los diferentes residuos y/o subproductos susceptibles a ser aprovechados acorde a la infraestructura actual (calderas, compostaje, sistema de riego por fertirriego, entre otros). Los residuos y/o subproductos valorados deben tener las condiciones idóneas (normativa, características físicas y características químicas) que no generen impacto negativo por el aprovechamiento.

Para evaluar el indicador RRSFM, en diferentes momentos (escenarios), se emplearon la Ecuación 2 hasta la Ecuación 5. Para determinar el valor numérico del Momento Actual (Ma), se procedió por medio de la Ecuación 2, la cual determinó el coeficiente (valor adimensional) del momento actual con respecto a la generación de residuos. Este valor es insumo para calcular el aprovechamiento actual de cada residuo y subproducto, acorde a la Ecuación 3. Dichas ecuaciones se ejemplifican con la variable de residuos líquidos.

$$RL_{Ma} = 1 - \left(\frac{RL_{Gt} - RL_{Ac}}{RL_{Gt}} \right)$$

Ecuación 2.

Coficiente del aprovechamiento actual de la variable analizada. Fuente: Modificado de Salguero-Puerta et al., (2019).

$$RRSFM_{Ma} = \frac{\sum RSO_{Ac} + RL_{Ac} + Cz_{Ac}}{n}$$

Ecuación 3.

Determinación del indicador RRSFM del momento actual. Fuente: Modificado de Salguero-Puerta et al., (2019).

Para determinar el momento potencial del indicador RRSFM, se añade a la Ecuación 2 la variable Ap (Aprovechamiento Actual) en la parte del denominador como se evidencia en la Ecuación 4, ejemplificada con la variable RL:

$$RL_{Mp} = 1 - \left(\frac{RL_{Gt} - RL_{Ac} - RL_{Ap}}{RL_{Gt}} \right)$$

Ecuación 4.

Coficiente del aprovechamiento potencial de la variable analizada. Fuente: Modificado de Salguero-Puerta et al., (2019).

$$RRSFM_{Mp} = \frac{\sum RSO_{Mp} + RL_{Mp} + Cz_{Mp}}{n}$$

Ecuación 5.

Determinación del indicador RRSFM del momento potencial. Fuente: Modificado de Salguero-Puerta et al., (2019).

Por último, se determina el Aprovechamiento Total (At), que determina la diferencia entre la Generación total (Gt) de residuos y el Aprovechamiento acumulado (actual y potencial), en una escala de 0 a 1 (ver Ecuación 6). Dado que la diferencia no es notable al momento de analizar la información por cada agroindustria o residuo, se requirió emplear la normalización de índices (ver Ecuación 7), donde el valor máximo corresponde a 1 (supuesto de economía circular al 100%) y el valor mínimo a 0 (supuesto de nula economía circular).

$$RRSFM = 1 - \left(\frac{Gt - Ac - Ap}{Gt} \right)$$

Ecuación 6.

Determinación del indicador RRSFM. Fuente: Modificado de Salguero-Puerta et al., (2019).

$$RRSFM_{(Normalización)} = \frac{RRSFM - 0}{1 - 0}$$

Ecuación 7.

Determinación indicador RRSFM normalizado. Fuente: Modificado de Salguero-Puerta et al., (2019).

Los valores obtenidos en cada ecuación, se compila en la Tabla 12.

Tabla 12.

Matriz para el análisis de las variables cuantitativas de RRSFM.

| Ag | Gt | | | Ac | | | Ap | | | At | | | RRSFM |
|-----------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------|
| | RSO | RL | Cz | RSO | RL | Cz | RSO | RL | Cz | RSO | RL | Cz | |
| Ag ₁ | RSO ₁₁ | RL ₁₁ | Cz ₁₁ | RSO ₁₁ | RL ₁₁ | Cz ₁₁ | RSO _{j1} | RL _{j1} | Cz _{j1} | RSO _{At1} | RL _{At1} | Cz _{At1} | Σ |
| Ag ₂ | RSO ₁₂ | RL ₁₂ | Gz ₁₂ | RSO ₁₂ | RL ₁₂ | Gz ₁₂ | RSO _{j2} | RL _{j2} | Gz _{j2} | RSO _{At2} | RL _{At2} | Gz _{At2} | Σ |
| Ag _n | RSO _{1n} | RL _{1n} | Gz _{1n} | RSO _{1n} | RL _{1n} | Gz _{1n} | RSO _{jn} | RL _{jn} | Gz _{jn} | RSO _{Atn} | RL _{Atn} | Gz _{Atn} | Σ |

Indicador HCRRS (Huella de Carbono de la Reincorporación de Residuos y Sub-productos)

Se construyó un segundo indicador que estimó la Huella de Carbono (HC) del indicador RRSFM bajo un enfoque de Otro ciclo de vida basado (*Other life cycle based*), con el fin de generar indicadores compuestos y articulados en el modelo de economía circular. Para determinar el indicador HCRRS, se requirió realizar una revisión sistemática de los

factores de emisión ($\delta_{CO_{2eq}}$) según el tipo de residuo y subproducto generado en el proceso de transformación del RFF.

Para tal fin, se revisó las revistas de SpringerLink, Science Direct y Google Scholar, basado en la metodología de Cardenas et al., (2020). Se usó como descriptores principales a (i) huella de carbono (*Footprint carbon*) y (ii) molino de palma de aceite (*mill oil palm*); como descriptores complementarios, se empleó RFV (EFB), POME, Fibra (*fibre*) y cascarilla (*shell*); y como factores de exclusión se usó (i) residuos y subproductos que se generan en otras fases productivas y no corresponde a residuos del procesamiento de RFF, principalmente aquellos residuos y subproductos que son generados en fase de siembra (ver Tabla 13). El periodo de búsqueda se abordó desde 2000 al 2020 en publicaciones internacionales y nacionales que cuantificaran de manera precisa procesos de transformación de RFF o CPO en CO_{2eq} .

Tabla 13.

Orden de importancia detectado en relación a la huella de carbono en residuos y subproductos de la transformación de RFF a nivel mundial en base de datos.

| Fase | DT | Google Scholar | | Science Direct | | SpringerLink | | $\bar{x}Q$ | ΔQ |
|----------------------------|---|----------------|----------------|----------------|-------|--------------|-------|------------|------------|
| | | DD | Q | DD | Q | DD | Q | | |
| 2. Residuos y subproductos | 1. DP Footprint carbon and Mill oil palm | 17.000 | 1 ^a | 1.184 | 1 | 533 | 1 | - | - |
| | EFB | 7.420 | 43,65 | 137 | 11,57 | 45 | 8,44 | 21,2 | Q2-Q1-Q1 |
| | Fibre | 5.970 | 35,12 | 745 | 62,92 | 291 | 54,60 | 50,9 | Q3-Q2-Q2 |
| | Shell | 4.360 | 25,65 | 523 | 44,17 | 187 | 35,08 | 35,0 | Q2-Q2-Q2 |
| | POME | 16.200 | 95,29 | 184 | 15,54 | 57 | 10,69 | 40,5 | Q4-Q1-Q1 |

Posterior de identificar el factor de emisión ($\delta_{CO_{2eq}}$) acorde al tipo de alternativa analizada en el indicador RRSFM, se construyó tres escenarios hipotéticos (momentos) con variación en las tasas de reincorporación de residuos y subproductos para contrastar bajo el escenario actual (categoría *Ap* del indicador RRSFM). Para determinar la emisión por cada alternativa (Ea), se empleó la Ecuación 8 y Ecuación 9. Es pertinente destacar que el factor de emisión debe estar en unidades de $kg CO_{2eq} / t RFF$.

$$\gamma = \frac{t Rs \text{ aprovechado}}{t Rs \text{ generado}}$$

Ecuación 8.

Determinación del coeficiente de aprovechamiento de residuos y subproductos.

$$Ea_{CO_{2eq}} = \frac{\gamma * RFF_{2019} * \delta_{CO_{2eq}}}{1000}$$

Ecuación 9.

Emisión de CO_{2eq} acorde al aprovechamiento de residuos y subproductos.

Posterior de determinar la emisión de cada residuo, se sumó los datos individuales para obtener la emisión global del momento analizado. Para tal fin, se implementó la Ecuación 10, cuyo resultado entrega valores en unidades de t CO_{2eq}.

$$HCRRS_{CO_2 eq} = \sum (\vartheta_1 \partial RS_1 \pm \vartheta_2 \partial RS_2 \pm \vartheta_n \partial RS_n)$$

Ecuación 10.

Determinación de la Huella de Carbono del indicador Reincorporación de Residuos y Subproductos por Otro ciclo de vida basado (HCRRS).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Variables y constantes de los residuos y subproductos del sector palmicultor que se generan en el proceso de transformación de RFF en plantas de beneficio del departamento de Casanare.

Los procesos que intervienen en la transformación de RFF para extraer los diferentes productos comerciales, generan las variables y constantes de residuos y subproductos del sector palmicultor. Cada proceso genera uno o varios tipos de residuos y subproductos con características fisicoquímicas y volúmenes específicos. Por tal razón, se describió y caracterizó los diferentes residuos y subproductos acorde a los procesos fuentes. Posteriormente, se evaluó los impactos ambientales asociados a los procesos fuentes de residuos y subproductos para determinar la afectación real causada por la gestión de estos. Por último, se trazó la tasa de generación de residuos y subproductos del departamento de Casanare del periodo 2013-2019, con la finalidad de obtener las diferentes constantes o coeficientes de cada residuo y subproducto para implementar en el modelo de economía circular.

6.1.1. Transformación de RFF con los respectivos procesos, entradas y salidas

La producción de Aceite de Palma Crudo se resume como un sistema cerrado donde ingresa el Racimos de Fruto Fresco (RFF) a una serie de procesos que incorporan materia (agua, principalmente) y energía para obtener el producto deseado. El RFF se selecciona posterior a la evaluación en campo, que acorde al color del fruto (ver Figura 2) es retirado y trasladado bajo sistemas de tracción eléctrica, mecánico o animal, hasta las instalaciones de la planta de beneficio.

Posterior inicia la extracción, la cual separa las nueces del pedúnculo o raquis (primer subproducto en estado sólido, correspondiente a Racimos de Fruta Vacía (EFB - *Empty Fruit Bunch*, también denominado tusa o mesocarpio), por medio de procesos mecánicos rotatorios (Abdurahman, Rosli, & Azhari, 2011). La tusa está compuesta por cáscaras y fibra, que equivalen aproximadamente al 22% del peso inicial del RFF (Abdullah & Sulaiman, 2013). Al analizar la información suministrada por las agroindustrias, se evidencia que el peso promedio de tusa oscila entre el 20% al 24% del peso inicial de RFF, por tal razón, para la presente investigación se tomó el valor referente del 22%.

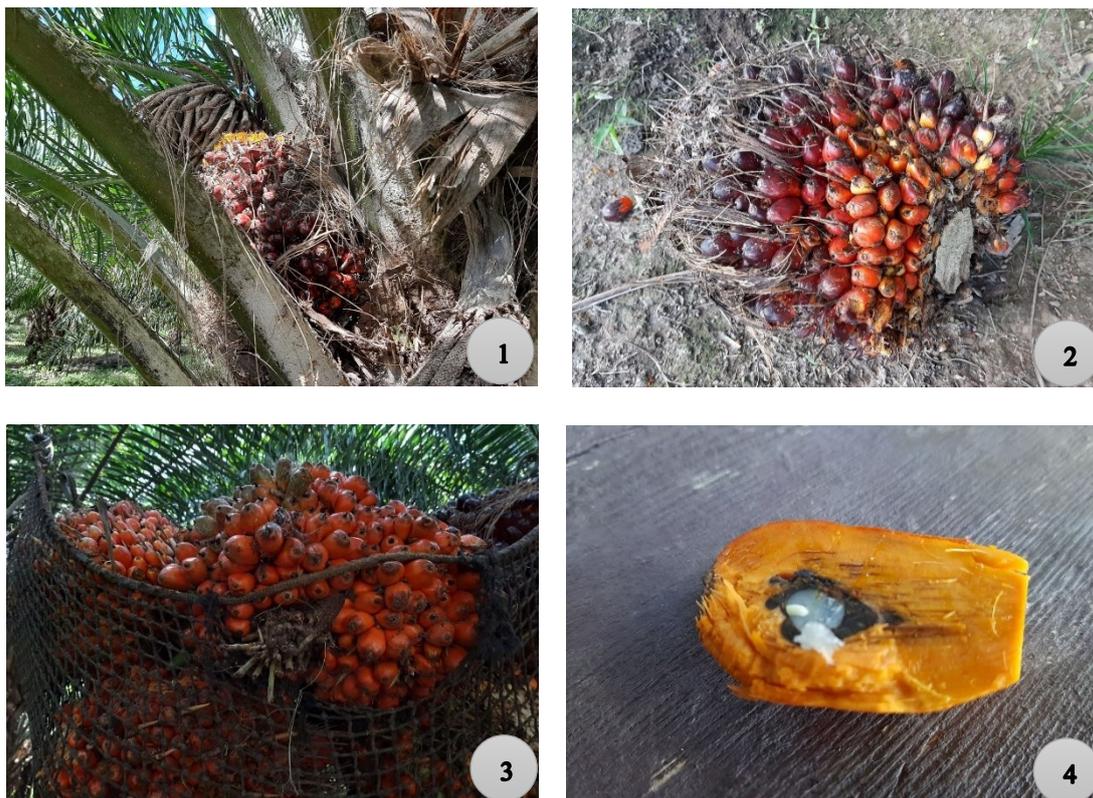
Posterior, se realiza el proceso de digestión o prensado, el cual comprime los frutos separados para obtener Aceite Palmiste (*Palm Kernel Oil - PKO*) o Aceite de Palma Bruto (*Crude Palm Oil - CPO*). Ambos productos llevan procesos similares (clarificación, centrifugado, aclarado y almacenamiento), sin embargo, varían las condiciones termodinámicas y metodológicas. En este proceso se genera el segundo subgrupo de subproductos en estado sólido, equivalente a nueces, almendras, cuesco y fibra en estado roto o comprimido, los cuales son retirados y trasladados a zona de secado para su respectiva reutilización como fuente de energía y acondicionador de suelo¹⁸. En la revisión de campo

¹⁸ Existe un proceso complementario, denominado desfibración y trituración, el cual es realizado por las plantas de beneficio para separar las fibras de las nueces, ya que las nueces (que contienen las almendras) son empleadas para la extracción de Aceite Palmiste.

desarrollada, se evidenció que la totalidad de las plantas emplean el proceso de separación y reincorporación como fuente de combustión para calderas o acondicionador de suelo, no obstante, los porcentajes varían según las necesidades de cada plantación. Este proceso es pertinente resaltar, ya que desprende dos productos principales (PKO y CPO), los cuales varían según la fuente.

Figura 2.

Visualización gráfica del transporte del RFF a plantas de beneficio. Fuente: Clúster de Agroindustrias del Casanare.



Nota: (1) RFF previo a corte en palma de aceite; (2) Corte del fruto, se visualiza el RFF en conjunto con frutos y pedúnculo; (3) Transporte en sistema eléctrico de RFF para evitar deterioro del producto; y (4) Vista interna del fruto, que contiene material fibroso, agua, aceite, hueso y almendra.

El siguiente proceso corresponde a clarificación, conformado por diferentes subprocesos que tienen como finalidad separar la mezcla líquida resultante del proceso de digestión o prensado, por medio de procesos gravitatorios e inmiscibilidad de sustancias, principalmente el agua y aceite, coadyuvado por vapor (Guimaraes, 2019; Quintero & Torres, 2019). Este proceso genera dos subproductos relevantes, correspondiente a residuos líquidos¹⁹ (que contienen lodos) y residuos fibrosos (fibras suspendidas en soluciones prensadas), los cuales son tratados por procesos de sedimentación para retirar subproductos.

¹⁹ También denominado *Palm Oil Mill Effluent (POME)*, que son acumulados de efluentes provenientes del proceso de esterilización, centrifugado y molienda.

En relación a los residuos líquidos se generan efluentes residuales, y en relación a los residuos fibrosos se obtiene una fibra apta para el consumo animal.

Cabe resaltar que, otra fuente importante de residuos líquidos evidenciado en las plantas de beneficio corresponde al proceso de centrifugado, ya que los residuos líquidos previos a disposición en lagunas de oxidación son sometidos a sistemas mecánicos para recuperar una parcialidad del aceite suspendido en las aguas residuales. Lo anterior, disminuye la carga de sustancias suspendidas en el efluente, lo que favorece a la reincorporación del aceite al proceso productivo y disminución de contaminantes.

Figura 3.

RFV (EFB) a cielo abierto y Sistema de tratamiento de aguas POME.



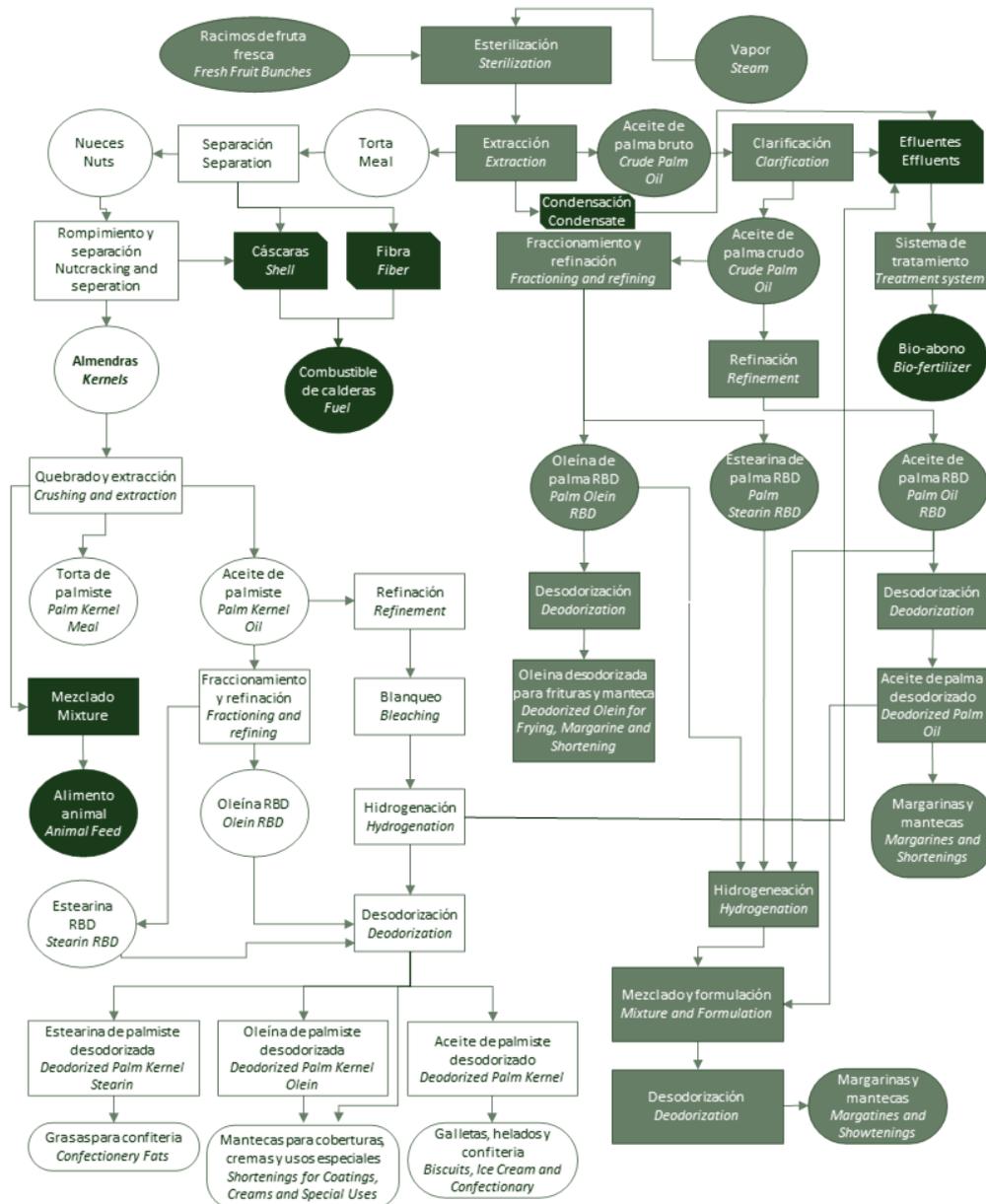
Fuente Agroindustria C.

Previamente se mencionó que las nueces son separadas de la fibra residual en el proceso de desfibración y trituración, ya que al interior contiene la almendra que es viable para la obtención de otros productos. Este proceso se realiza a partir de secadores mecánicos que permiten generar (i) torta de palmiste, (ii) aceite de palmiste y (iii) cascarilla (subproducto con potencial de reutilización por su poder calorífico). Por último, se evidenció el residuo de incineración de materia orgánica sólida en calderas, proveniente de la combustión de la tusa y cascarilla, denominado ceniza, que equivale aproximadamente al 5% del peso de residuos orgánicos incinerados (Foo & Hameed, 2009; Yeo et al., 2020). Este producto se recolecta en dos fases: (i) área de calderas, donde las cenizas quedan depositadas; y (ii) sistema de control de emisiones, las cuales son denominadas cenizas duras y blandas, respectivamente (Loh, 2017; Tay, 1990). Al contrastar esta información con los datos obtenido en el departamento de Casanare, se evidenció que el valor de ceniza oscila entre 4,3% - 8% del peso de los residuos incinerados, cuyo porcentaje varía según la combinación con el tipo de combustible.

Los procesos previamente descritos presentan relación continua uno con otro, sin embargo, los residuos y subproductos varían según las entradas, salidas y tipo de tecnología. La Figura 4 plasma el flujo de materia e identifica las fuentes de residuos y subproductos al interior de los procesos.

Figura 4.

Flujo de procesos con las respectivas entradas y salidas.



Conversiones

- | | | | |
|----------------------|---|----------------------|--|
| Forma (Shape) | | Color (Color) | |
| □ | Residuo o subproducto (Waste or by-product) | ● | Proceso CPO (CPO process) |
| ○ | Entrada y/o resultado (Entry and / or result) | ○ | Proceso KPO (KPO process) |
| ▭ | Proceso (Process) | ● | Residuo - subproducto o implementación actual (Waste - by-product or current implementation) |
| ○ | Producto final (Final product) | | |

Adaptado de Fedepalma (2020a) y Poh et al., (2020b).

En diferentes investigaciones enfocadas en la caracterización de plantas de beneficio de palma de aceite, se cuantificó el porcentaje o peso en húmedo de los residuos y sub-productos posterior a transformar 1 tonelada de RFF o 1 tonelada de CPO²⁰. Los Racimos

²⁰ Se requiere en promedio 5,08 toneladas de RFF para obtener 1 tonelada de CPO.

de Fruta Vacía (EFB), Fibra, Cascari-lla, Ceniza, POME y metano son los principales residuos y subproductos caracterizados. En la Tabla 14, se detalló las principales investigaciones a nivel global y nacional, que cuantificaron la salida de materia posterior a la transformación de la tonelada de RFF o tonelada de CPO, asimismo, los valores obtenidos en seis agroindustrias del departamento de Casanare.

Tabla 14.

Cuantificación de residuos y subproductos derivados de procesar una tonelada de RFF.

| Autor (VRE) | Residuo / subproducto | EFB | Fibra | Cascari-lla | Ceniza | POME | Metano |
|--|------------------------------|----------------|---------------|--------------------|---------------|---------------|---------------------------|
| Singh et al., (2010) y Lik et al., (2006) | | 23% | 15% | 7% | - | - | - |
| Abdullah & Sulaiman (2013) | | 22% | 13,50% | 5,50% | - | 67% | - |
| Abdullah & Sulaiman (2013)* | | 14,60% | 15,40% | 10,40% | - | 6,30% | - |
| Loh (2017) | | 22% | 13,50% | 5,50% | - | 67% | - |
| Loh (2017)* | | 35% | 60% | 8,50% | 4,60% | - | - |
| Vijaya et al., (2008) | | 22% | 8-16% | 9-22% | 2% | 58,20% | 10,57m ³ |
| Yusoff (2006) | | 22% | 13,50% | 5,50% | - | 67% | - |
| Zinatizadeh (2006) | | 28,50% | 30% | 6% | 0,50% | 53,51% | - |
| Zinatizadeh (2006)* | | 23% | 14% | 6% | 0,50% | 53,51% | - |
| Kong et al., (2014) | | 22-23% | 13,5-15% | 5,5-7% | - | - | - |
| Ali., et al (2015) | | 23% | 15,70% | - | - | 70% | - |
| Huailuek et al., (2019) | | 21% | 12,46% | 3,95% | - | 58% | - |
| Stichonotho et al., (2010) | | 23% | 13% | 5,50% | - | 86% | - |
| Foo &Hameed (2009) | | 23% | 14-15% | 6-7% | - | - | - |
| Embrandiri (2013) | | 24% | 14% | 6% | 0,42% | 63% | - |
| Abas et al., (2011) | | 23% | 13% | 5% | - | 60% | - |
| Cenipalma (2005), Bernal (2001), Silva (2008) | | 17,7- 26,1% | 11,6-15% | 5-7% | - | 70-80% | - |
| García et al., (2010) y Ramirez (2015) | | 20% | 13% | 5% | 0,53% | 69% | - |
| <i>Promedio</i> | | <i>23,04%</i> | <i>16,77%</i> | <i>6,41%</i> | <i>1,43%</i> | <i>61,18%</i> | <i>10,57m³</i> |
| <i>Varianza</i> | | <i>3,76%</i> | <i>11,23%</i> | <i>1,87%</i> | <i>1,67%</i> | <i>17,92%</i> | <i>-</i> |
| Agroindustria (VAC) | Residuo / subproducto | EFB | Fibra | Cascari-lla | Ceniza | POME | Metano |
| | A | 19-23% | 13-17% | 7% | 0,80% | 80% | - |
| | B | 21-22% | 15% | 6% | 0,50% | 67% | - |
| | C | 19-25% | 15% | 6,40% | 0,43% | 63% | - |
| | D | 23% | 16% | 5% | 0,50% | 72% | - |
| | E | 20-24% | 14-18% | 5-7% | - | 75% | - |
| | F | 22% | 16% | 5,80% | 0,50% | 60% | - |
| <i>Promedio</i> | | <i>22,48%</i> | <i>15,58%</i> | <i>6,03%</i> | <i>0,55%</i> | <i>69,50%</i> | <i>-</i> |
| <i>Varianza</i> | | <i>0,80%</i> | <i>0,49%</i> | <i>0,66%</i> | <i>0,15%</i> | <i>7,56%</i> | <i>-</i> |

Nota: *Peso en seco

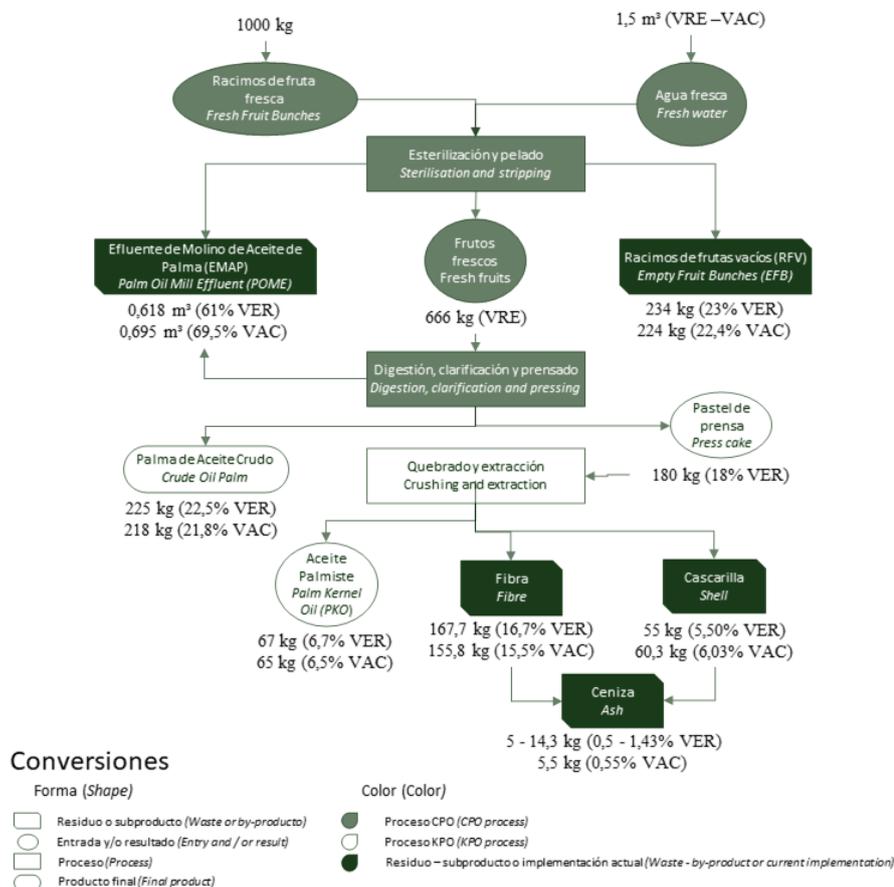
Al contrastar los Valores de Referencia (VRE) con los Valores proporcionados por las Agroindustrias del departamento de Casanare (VAC), se evidencia una correlación positiva entre los datos, ya que la diferencia y proporción de residuos y subproductos se conserva. Se aclara que las diferencias corresponden al tipo de tecnología y variedad del cultivo, lo que contribuye a la eficiencia de producción y consumo de agua para la producción de una tonelada de CPO.

La mayor fuente de residuos sólidos orgánicos (RSO) corresponde a EFB (23,04% ± 3,76 VRE y 22,08% ± 0,8 VAC), generados en el proceso de esterilización y extracción; cuyo porcentaje de contenido de humedad es relativamente alto, aproximadamente 60% del peso, lo que genera una alta dificultad para el aprovechamiento energético. Por tal razón, las agroindustrias del departamento de Casanare emplean la fibra seca y cascarilla como fuente energética, y en algunas ocasiones los EFB secados a sol, ya que a su relación de C/N es empleado para acondicionador de suelo (Loh, 2017).

El segundo subproducto con mayor porcentaje RSO corresponde a la Fibra (16,77% ± 11,23 VRE y 15,58% ± 0,49 VAC), generado en el proceso de separación y clarificación. Este subproducto presenta un bajo porcentaje de humedad y CPO residual, aproximadamente el 5% (Abdullah & Sulaiman, 2013), lo que favorece a la incineración en calderas para la obtención de energía, cuyo aporte energético corresponde a 18.795– 19.060 kJ kg⁻¹ (Loh, 2016, 2017; Subramaniam, Chow, & Ma, 2004).

Figura 5.

Diagrama de entradas y salidas de materia en el proceso de transformación de 1 tonelada de RFF.



Fuente: Adaptado de Loh (2017) y Abdullalla (2013).

El tercer subproducto con mayor aporte RSO corresponde a Cascarilla ($6,41\% \pm 1,87$ VRE y $6,03\% \pm 0,66$ VAC), generado en el proceso de separación y rompimiento de nuez. Este subproducto presenta un aprovechamiento del 100% en las agroindustrias del departamento de Casanare, dado a su poder calorífico $19.500 - 20.750 \text{ kJ kg}^{-1}$, bajo contenido de humedad y capacidad de absorción de agua (Loh, 2016, 2017; Shafigh, Jumaat, & Mahmud, 2010; Subramaniam et al., 2004). De hecho, en los campamentos de trabajo de las agroindustrias, se evidenció la cascarilla implementada como superficie de calzada, dado a su rigidez y absorción de agua.

Por otro lado, el principal residuo líquido corresponde al efluente residual (POME), el cual presenta una variación significativa ($61,18\% \pm 17,92$ VRE y $69,50\% \pm 7,56$ VAC). En la revisión literaria, se identificó que en algunos procesos se emplean alrededor de $0.8 - 1,5 \text{ m}^3$ para procesar una tonelada de RFF, dado a la tecnología implementada por las plantas de beneficio, y alrededor del 50% del volumen empleado se convierte en POME (Cortés et al., 2006; Loh, 2017; Singh et al., 2010; Stichnothe & Schuchardt, 2010; Subramaniam et al., 2004). En relación a las plantas de beneficio de Casanare, del volumen inicial de agua usado para transformar una tonelada de RFF, se estimó una tasa de retribución del 61%, lo cual corrobora algunos valores anormales por encima del promedio del valor de referencia (VRE).

Y, por último, el residuo con menor aporte corresponde a Ceniza ($1,43\% \pm 1,67$ VRE y $0,55\% \pm 0,15$ VAC), derivado de la combustión de materia orgánica como fibra, cascarilla y EFB en calderas, en combinación con otros combustibles como coque o carbón. La variación entre VRE y VAC de ceniza, se debe a una diferencia marcada por un registro de Loh (2017) en peso seco, cuyo valor es anormal entre los otros registros, dado que la humedad (registros restantes) disminuyen significativamente la concentración de cenizas (Abdullah et al., 2011; Villegas & Avila, 2014). De hecho, es pertinente mencionar que los procesos de aprovechamiento de residuos y subproductos orgánicos del RFF se implementan con concentraciones relativas de humedad.

6.1.2. Características físicas y químicas de residuos y subproductos de palma de aceite

Como se resaltó en el apartado anterior, existen dos grupos de residuos y subproductos según su estado físico, correspondiente a sólidos y líquidos. Los residuos sólidos están conformados por EFB, cascarilla, fibra y ceniza. Estos residuos poseen propiedades físicas y químicas diferentes, tales como poder calorífico, textura, porosidad, rigidez y composición nutricional (ver Tabla 15), lo que genera una variedad de alternativas de reutilización.

El EFB (también denominado tusa) es un material lignocelulósico con una composición del $60 - 65\%$ de humedad, y con $1 - 2,5\%$ de aceite vegetal impregnado por la separación física del raquis en el proceso de desfrutado de los racimos esterilizados (N. Ramírez et al., 2011). El EFB es el segundo subproducto con mejor proporción de contenido de potasio, manganeso, fósforo, nitrógeno y zinc, lo que permite visualizar implementaciones como acondicionar de suelo por su aporte de nutrientes. Por otro lado, el EFB presenta un alto poder calorífico ($18-19.92 \text{ MJ/kg}$), sin embargo, requiere procesos de secados previos dado a su alto contenido de humedad ($66-69\%$).

Tabla 15.*Composición química y física de los residuos y subproductos generados en la fase de transformación del RFF.*

| Residuos y subproductos | EFB | Fibra | Cascarilla | Ceniza | POME | Autor |
|--------------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------------|------------------|-------------|---|
| Composición química | | | | | | |
| Carbono | 45,9 (%) | 45,2 (%) | 49,70 (%) | 59,583 (%) | 40,17 (%) | Abdullah et al., (2011); Loh (2017) Nalaya et al.,(2020) |
| Hidrógeno | 5,70 (%) | 5,50 (%) | 5,70 (%) | 1,181 (%) | 5,81 (%) | Abdullah et al., (2011); Loh (2017) |
| Nitrógeno | 0,8 (%) | 1,10 (%) | 0,40 (%) | 0,088 (%) | 5,26 (%) | Abdullah et al., (2011); Loh (2017) |
| Nitrógeno total | - | - | - | - | 750 mg/L | Abdullah et al., (2011); Singh et al., (2010); Baha- ruddin et al., (2009) |
| Azufre | 0,2 mg/L | 0,23 mg/L | 0,19 mg/L | - | - | Abdullah et al., (2011); Loh (2017) |
| Oxígeno | 36,7 mg/L | - | - | 0,981 ± 0,42 (%) | - | Abdullah et al., (2011); Loh (2017) |
| Potasio | 2,24 mg/L | 1,48 mg/L | 2,20 mg/L | 26,3-41,0 g/kg | 22700 mg/L | Singh et al., (2010); Baha- ruddin et al., (2009); Vijaya et al., (2004); Tay (1990); Loh (2017) |
| Magnesio | 0,6 ± 0,2 (%) | 0,49 mg/L | 0,24 mg/L | 20,3-22 g/kg | 615 mg/L | Singh et al., (2010); Baha- ruddin et al., (2009); Vijaya et al., (2004); Tay (1990) |
| Zinc | 16,6 ± (2,6 mg kg ⁻¹) | - | - | 0,1-0,3 g/kg | 2,3 mg/L | Singh et al., (2010); Ba- haruddin et al., (2009); Vi- jaya et al., (2004); Tay (1990) |
| Fósforo | 0,6 ± 0,1 (%) | 0,12 mg/L | 0,07 mg/L | - | 180 mg/L | Baharuddin et al., (2009); Vijaya et al., (2004) |
| Lignina | 35,3 (%) | 27,7 (%) | 50,7 (%) | - | - | Sukiran et al., (2017) |
| Hemicelulosa | 35,3 (%) | 26,1 (%) | 22,7 (%) | - | - | Sukiran et al., (2017) |

| Residuos y subproductos | EFB | Fibra | Cascarilla | Ceniza | POME | Autor |
|-------------------------------------|------------|--------------|-------------------|---------------|-------------|--|
| Composición física | | | | | | |
| Poder calorífico (MJ/kg) | 18-19,92 | 18,8-19,58 | 19,5-20,75 | - | 16,1-17,65 | Soh (2016); Abdullah et al., (2011); Singh et al., (2010); Loh et al (2012); Loh & Choo (2013) |
| Contenido de humedad (%) | 66-69 | 35-48 | - | - | 90-95 | Soh (2016); Abdullah et al., (2011); Singh et al., (2010); Loh et al (2012); Loh & Choo (2013) |
| Contenido de ceniza (%) | 4,6 | 6,1 | 3 | - | 15,2 | Soh (2016); Abdullah et al., (2011); Singh et al., (2010); Loh et al (2012); Loh & Choo (2013) |
| Contenido de materias volátiles (%) | 87 | 84,9 | 83,4 | - | 77-7 | Soh (2016); Abdullah et al., (2011); Singh et al., (2010); Loh et al (2012); Loh & Choo (2013) |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | - | - | - | - | 25.000 mg/L | Singh et al., (2010); Baharuddin et al., (2009); Poh et al., (2020b) |
| Demanda Química de Oxígeno | - | - | - | - | 50.000 mg/L | Singh et al., (2010); Baharuddin et al., (2009); Poh et al., (2020b) |
| Sólidos totales | - | - | - | - | 40.500 mg/L | Singh et al., (2010); Baharuddin et al., (2009); Poh et al., (2020b) |
| pH | 6,7 ± 0,2 | - | - | 9,35-9,70 | 4,7 | Singh et al., (2010); Baharuddin et al., (2009); Poh et al., (2020b); Tay (1990); |
| Grasa y aceite | - | - | - | - | 4.000 mg/L | Singh et al., (2010); Baharuddin et al., (2009); Poh et al., (2020b) |

Nota: % Este valor también se puede determinar por la diferencia entre el contenido de C, H, N y S (en%) y el total del 100%, en peso seco.

Tabla 16.

Comparación de la composición física y química de POME de las agroindustrias del departamento de Casanare frente a referentes teóricos.

| | Parámetro | Temperatura | pH^a | Tasa de flujo | DBO^{5 d} | DQO^e | SVT^f | NKT^g | GA^k |
|---------------------------------|------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| | Unidad | °C | - | m³/h | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L | mg/L |
| Agroindustria A ^h | | 53-61 | 4,3-4,4 | 18,8 | 31.287 | 64.242 | 25.452 | 590 | 7.680 |
| Agroindustria B ^h | | 58 | 4,45 | 7,2 | 33.250 | 67.800 | 24.582 | 590 | 7.500 |
| Agroindustria C ^h | | - | 4,3 | - | 33.458 | 66.570 | 24.500 | 545 | 7.770 |
| Agroindustria D ⁱ | | 51-62 | 4,4 | 28-38 | 36.458 | 57.500 | 19.200 | 480 | 6.800 |
| Agroindustria E ^h | | 54 | 4,4 | 32 | 29.500 | 59.700 | 18.500 | 490 | 6.850 |
| Agroindustria F ⁱ | | - | 4,4 | - | 35.400 | 64.500 | 24.200 | 580 | 7.650 |
| <i>Promedio</i> | | <i>56,5</i> | <i>4,4</i> | <i>22,8</i> | <i>33.225,5</i> | <i>63.385,3</i> | <i>22.739,0</i> | <i>545,8</i> | <i>7.375,0</i> |
| <i>Desviación estándar</i> | | <i>1,7</i> | <i>0,1</i> | <i>12,2</i> | <i>2.564,0</i> | <i>3.995,7</i> | <i>3.049,1</i> | <i>50,0</i> | <i>435,1</i> |
| Autores referentes | | | | | | | | | |
| Poh et al., (2010) ^b | | 45,8-62,1 | 4,4-4,5 | 7,8-25,4 | 12.520-42.630 | 27.840-85.267 | 12.000-47.667 | 230-780 | 2.500-16.100 |
| Poh et al., (2010) ^c | | 54-66,5 | 4,18-4,7 | 5,4-65,0 | 32.100-56.700 | 67.900-87.300 | 41.180-47.060 | 525-1.350 | 11.004-15.880 |
| Ma & Ong (1985) | | 80-90 | 4,5 | - | 25.000 | - | - | - | 8.000 |
| Admad et al., (2003) | | - | 4,7 | - | 25.000 | 50.000 | - | - | 4.000 |
| Oswat et al., (2002) | | - | 5 | - | 11.000 | 246.000 | - | - | - |
| Choorit & Wisarnwan (2007) | | - | 4,4 | - | 65.714 | 102.696 | 72.058 | 1.381 | 9.341 |
| García (1993) ^j | | 53 | 5,25 | - | 38.647 | 47.667 | 59.970 | - | 15.492 |
| Singh et al., (2010) | | - | 4,7 | - | 25.000 | 50.000 | 34.000 | 750 | 4.000 |
| <i>Promedio</i> | | <i>63,05</i> | <i>4,68</i> | <i>25,90</i> | <i>32.792,00</i> | <i>90.073,79</i> | <i>47.996,30</i> | <i>893,38</i> | <i>9.082,14</i> |
| <i>Desviación estándar</i> | | <i>14,98</i> | <i>0,30</i> | <i>13,15</i> | <i>16.635,33</i> | <i>71.602,68</i> | <i>17.770,37</i> | <i>370,19</i> | <i>4.340,44</i> |

Nota: ^a No unidades para pH; ^b temporada baja de cosecha; ^c temporada alta de cosecha; ^d Demanda Bioquímica de Oxígeno; ^e Demanda Química de Oxígeno; ^f Sólidos volátiles totales; ^g Nitrógeno Kjeldahl Total; ^h Los valores soportados por agroindustrias corresponden al periodo 2019; ⁱ Los valores soportados por agroindustrias corresponden al periodo 2020; ^j Valores de referencia de planta zona oriental de Colombia; ^k Grasas y aceites.

La Fibra contiene la mejor proporción de nutrientes en comparación con los otros subproductos orgánicos, tales como nitrógeno, potasio y fósforo (ver Tabla 15), no obstante, presenta un alto contenido de metales tales como hierro ($723,2 \pm 7,8$), cobre ($24,2 \pm 0,05$), aluminio ($749,1 \pm 14$), entre otros. Dicho escenario dificulta la implementación como acondicionador de suelo, ya que puede favorecer a la acumulación de sales y metales. Por tal razón, su enfoque de aprovechamiento se centra en la incineración, dado al poder calorífico y grado de ignición. La relación para obtener el mayor poder calorífico es 60:40 a 90:10 en combinación con cascarilla (Sundram, 2013; Vijaya et al., 2008).

La Cascarilla presenta un alto contenido de carbono y potasio, sin embargo, un bajo contenido de magnesio, nitrógeno y fósforo. Asimismo, presenta la mejor capacidad de poder calorífico entre los residuos y subproductos derivados del RFF (19,5-20,75 MJ/kg) con bajo contenido de ceniza (3%), lo que favorece su implementación en la incineración en calderas coadyuvado con fibra (ver Tabla 15). Adicional, la cascarilla presenta una porosidad del 37%, lo que beneficia la capacidad de absorción de agua (21 – 33%) (Shafiq et al., 2010).

La Ceniza es producto de la combustión de los RSO, tales como fibra, cascarilla y EFB, principalmente. Posee una estructura granular y porosa, de tamaño fino la mayor parte (Nalaya et al., 2020; N. Ramírez et al., 2011). Este subproducto posee condiciones nulas de incineración, sin embargo, presenta una relación significativa de nutrientes tales como carbono, potasio y magnesio, y un bajo contenido de metales pesados lixiviables (menor a 0,2 mg/L de cadmio, plomo, cobre y níquel) (Yin, Kadir, Lim, Syed-Arifin, & Zamzuri, 2008), por lo que es usado en combinación de procesos de compostaje de RSO.

Por otro lado, el residuo líquido POME proveniente del proceso de molienda, centrifugado, sedimentación y otros procesos, contiene el menor grado de contenido de carbono (40,17%), sin embargo, presenta la mejor composición de nutrientes tales como nitrógeno, potasio, fosforo y zinc en comparación con otros residuos y subproductos (ver Tabla 15). Adicional, dicho residuo presenta un alto potencial de poder calorífico (16,1-17,65 MJ/kg), derivado de la transformación anaeróbica del efluente.

Tabla 17.

Parámetros físicos y químicos posterior al tratamiento de POME en las agroindustrias de Casanare.

| Parámetro | Unidad | Agroindustrias de Casanare | | | | | | | Referente Orinoquia Lemus (2019) |
|-----------------|--------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|----------|------------|----------------------------------|
| | | A | B | C | D | E | Promedio | Desviación | |
| pH | pH | 6,82 | 7,4 | 7,5 | 7,2 | 7,1 | 7,204 | 0,267 | 7,37 |
| DBO | mg/L | 2.140 | 1.150 | 1.200 | 1.450 | 1.450 | 1.478 | 395,184 | 1.200 |
| DQO | mg/L | 5.480 | 5.800 | 5.900 | 6.400 | 6.100 | 5.936 | 342,754 | 6.122 |
| SST | mg/L | 4.500 | 4.900 | 4.900 | 5.100 | 4.900 | 4.860 | 219,089 | 5.380 |
| GA | mg/L | 43 | 40 | 40 | 38 | 39 | 40 | 1,871 | 37 |
| Nitrógeno total | mg/L | 450 | 415 | 420 | 380 | 390 | 411 | 27,477 | 336 |
| Fosforo total | mg/L | 75 | 80 | 81 | 86 | 80 | 80,4 | 3,912 | 81 |
| Potasio | mg/L | 2.050 | 1.750 | 1.800 | 1.900 | 1.900 | 1.880 | 115,109 | 1.925 |
| Calcio | mg/L | 160 | 165 | 160 | 180 | 175 | 168 | 9,083 | 175 |
| Magnesio | mg/L | 210 | 200 | 200 | 210 | 210 | 206 | 5,477 | 199 |
| Cloruros | mg/L | 1.190 | 1.060 | 1.082 | 1.130 | 1.200 | 1.132,4 | 62,600 | 1.179 |

| Parámetro | Unidad | Agroindustrias de Casanare | | | | | | | Referente |
|-----------|--------|----------------------------|-----|---|-----|-----|----------|------------|---------------------------|
| | | A | B | C | D | E | Promedio | Desviación | Orinoquia Lemus (2019) |
| Sulfatos | mg/L | 315 | 300 | - | 230 | 230 | 268,75 | 45,162 | 232 |
| Boro | mg/L | - | - | 6 | 6,7 | 6,4 | 6,366 | 0,351 | 5,15 |

La concentración de DBO, DQO, ST, STV y GA de las aguas residuales varían según la cantidad de agua implementada en procesos de transformación de RFF (ver Tabla 17). El POME del departamento de Casanare presenta una tempera de $56,5^{\circ} \text{C} \pm 1,7^{\circ} \text{C}$, producto del proceso de esterilización que implementa el recurso hídrico a una temperatura de 140°C aproximadamente; un valor de pH de 4,4; una tasa de flujo de $22,8 \text{ m}^3 \pm 12,2 \text{ m}^3$, la cual varía según la capacidad productiva de la planta de beneficio; y un valor de DBO⁵ y DQO por encima del promedio de referencia teórico ($33.225,5 \pm 2.564 \text{ mg/L}$ y $63.385,3 \pm 3.995,7 \text{ mg/L}$ respectivamente).

Posterior al tratamiento de las aguas proveniente de POME, se obtiene un efluente con sustancias disueltas que genera restricción de vertimientos, dado a que supera valores máximos de DBO, DQO, Cl, SST, y otros compuestos según la normativa nacional vigente²¹ (Tabla 17). No obstante, contiene nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, entre otros, que son favorables de reincorporación, ya que no superan los valores máximos²² establecidos para fines de reutilización. Al comparar los valores registrados por las agroindustrias del departamento de Casanare, se refleja de manera general poca discrepancia en relación al referente cuyo estudio se realizó en la zona oriental. El nitrógeno total, magnesio, cloruros, sulfatos y boro están por encima del referente, mientras que el fósforo total, potasio y calcio están por debajo de este.

6.1.3. Identificación y evaluación de los impactos ambientales asociados a los residuos y/o subproductos de RFF

La generación de residuos y subproductos de RFF descritos anteriormente, originan una variedad de impactos ambientales asociado a la gestión y disposición de estos. No obstante, su reutilización y reúso bajo el marco de la economía circular, contribuyen a la mitigación y control de efectos sobre el suelo, atmósfera y cuerpos de agua cercanos a los puntos de disposición. Por tal fin, se evaluó los impactos compilados en la Tabla 18 para comprender los principales procesos fuentes y factores ambientales críticos por la gestión de las salidas de RFF.

Los principales procesos que generan impactos ambientales por ser procesos fuentes de residuos y subproductos de palma de aceite corresponden a (i) esterilización, (ii) prensado, (iii) clarificación y (iv) palmistería. Lo anterior, se debe a que el primer y tercer proceso mencionados son la fuente de residuos líquidos producto de subprocesos mecánicos bajo condiciones controladas (temperatura, presión, humedad, entre otros), tal como efluente residual POME con sus respectivos lodos; mientras que el segundo y cuarto proceso son fuente de residuos sólidos orgánico tales como EFB, fibra y cascarilla.

²¹ Resolución 631 de 2015 (MinAmbiente, 2015)

²² Resolución 1207 de 2014 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014)

Tabla 18.

Evaluación de factores ambientales en relación a los procesos fuentes de generación de residuos y subproductos de RFF.

| COMPONENTES | Impactos ambientales | ACCIONES | Procesamiento de CPO y PKO | | | | | | | PC ^c | SÍNTESIS | | | | | |
|----------------------|----------------------|-------------------------|---|----------------|------------|-----------|----------|---------------|---------------|-----------------|--------------------------|-----------------------|-------------------|-----------|-----|---|
| | | | Recepción de fruto | Esterilización | Desfrutado | Digestión | Prensado | Clarificación | Sedimentación | | Palmistería ^a | Planta de tratamiento | No. interacciones | Sumatoria | | |
| | | | | - | + | - | + | - | + | - | + | - | + | | | |
| FACTORES AMBIENTALES | Paisaje | Estética característica | - | - | - | - | - | - | - | - | -1 ^b | 1 | - | -3 | - | |
| | | Erosión | - | - | - | - | - | - | - | - | -2 | - | - | -7 | - | |
| | Suelo | Erosión | - | - | - | - | - | - | - | - | -1 | 1 | - | -1 | - | |
| | | Fertilidad | - | 1 | 1 | - | - | - | - | - | -3 | - | 3 | -3 | 3 | |
| | Físico | Calidad fisicoquímica | - | -2 | - | - | - | -2 | - | - | 1 | - | 3 | - | 9 | |
| | | Agua | Calidad bacteriológica | - | -3 | - | - | - | -3 | - | - | 3 | - | 3 | - | - |
| | | | Aguas subterráneas: calidad fisicoquímica | - | -2 | - | - | - | -2 | - | - | - | 2 | - | -4 | - |
| | | Atmosfera | Calidad del aire | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | - | -1 | - | - | 2 | - | -6 | - |
| | Biótico | Fauna | Ruido | -2 | -1 | -2 | -2 | -2 | - | -1 | - | - | 6 | - | -10 | - |
| | | | Diversidad de fauna | - | - | - | - | -1 | - | - | - | -1 | 3 | - | -3 | - |
| Socio-económico | | Comunidad | Bienestar social | - | - | - | - | -1 | - | -1 | -1 | 3 | - | -2 | - | |
| SÍNTESIS | Sumatoria | - | -1 | -4 | -2 | -1 | -4 | -6 | -1 | -2 | -4 | - | - | -25 | - | |
| | | + | -2 | -6 | -3 | -2 | -7 | -9 | -1 | -4 | -8 | - | - | -42 | - | |
| | | - | 1 | 1 | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | 6 | | |
| | | + | 3 | 3 | - | - | - | - | - | 3 | - | - | - | 9 | | |

Nota: ^a Palmistería comprende el proceso de quebrado y extracción de la almendra para la obtención de PKO; ^b El número fracción está conformado por la magnitud (espacialidad) en el numerador e importancia (grado de alteración del factor ambiental) en el denominador; ^c Proceso complementario.

El principal factor ambiental que presenta una mayor presión corresponde a la calidad del aire, debido a la emisión de material particulado y vapor, producto de la combustión, trituración de cascarilla y esterilización. Es relevante destacar que la combustión empleada por las agroindustrias utiliza carbón como activador, combinado en diferentes proporciones con residuos sólidos orgánicos como cascarilla y EFB, en algunos casos.

Adicional, la emisión de CO₂ genera un impacto significativo sobre el ambiente. Basado en la metodología de Stichnothe & Schuchard (2011) y Krishnan et al. (2017), quienes aplicaron el modelo del IPCC (2006) para calcular la emisión de GEI asociadas a LCA del sistema de palma de aceite²³, se estimó un aproximado de 12.380,07 t CO₂-eq/año²⁴ producto del EFB y POME del departamento de Casanare bajo el supuesto de disposición a cielo abierto.

El componente atmosfera presenta afectaciones adicionales como el ruido forjado por las maquinarias en los procesos de desfrutado y prensado, sin embargo, su impacto no afecta áreas mayores a 150 metros a la redonda. Adicional, es relevante mencionar que la calidad del aire afectada el bienestar social por la generación de malos olores, cuyo proceso principal se relaciona con el procesamiento de aguas residuales.

El componente de diversidad de fauna también se ve afectado por los aspectos resalados en el componente de atmosfera y agua, ya que el ruido, olores ofensivos y la baja calidad de agua limitan la transición, refugio y aprovisionamiento de alimento para especies tales como mamíferos, herpetofauna y avifauna.

El siguiente factor ambiental con presión significativa corresponde a la calidad fisicoquímica del agua, por motivo de los vertimientos generados por las plantas de tratamiento. El efluente contiene altas cargas de DBO, DQO, GA y SST, cuya disposición en suelo sin previo tratamiento podría generar afectación a la capacidad de fertilidad del sustrato y erosión por acumulación de sales, y vertimiento a cuerpos de agua sin cumplir los valores permitidos generaría eutrofización. Los principales procesos que contribuyen al factor ambiental corresponden al proceso de esterilización y clarificación, quienes emplean el recurso hídrico en condiciones controladas tales como presión y temperatura.

Otro factor ambiental vulnerable ante la presente evaluación, corresponde a la estética característica del paisaje, debido a la acumulación de residuos en entornos abiertos para el respectivo secado o almacenamiento, lo que genera vectores sanitarios y perjudica el bienestar social de la población local. Los principales residuos que afectan este factor corresponden a EFB, fibra y POME, cuyos volúmenes son representativos y dificultan la respectiva gestión.

Por otro lado, se determinó un factor positivo relacionado con la fertilidad derivada del proceso de esterilización, desfrutado y planta de tratamiento de aguas residuales. Lo anterior se relaciona con la generación de ceniza, fibra, efluente y lodos, cuyos residuos y subproductos son empleados en campo como acondicionar de suelo y fuente de nutrientes.

²³ ,037 t CO₂-eq / t RFF, producto de la transformación y aprovechamiento de EFB y POME bajo condiciones anaeróbicas del 80%

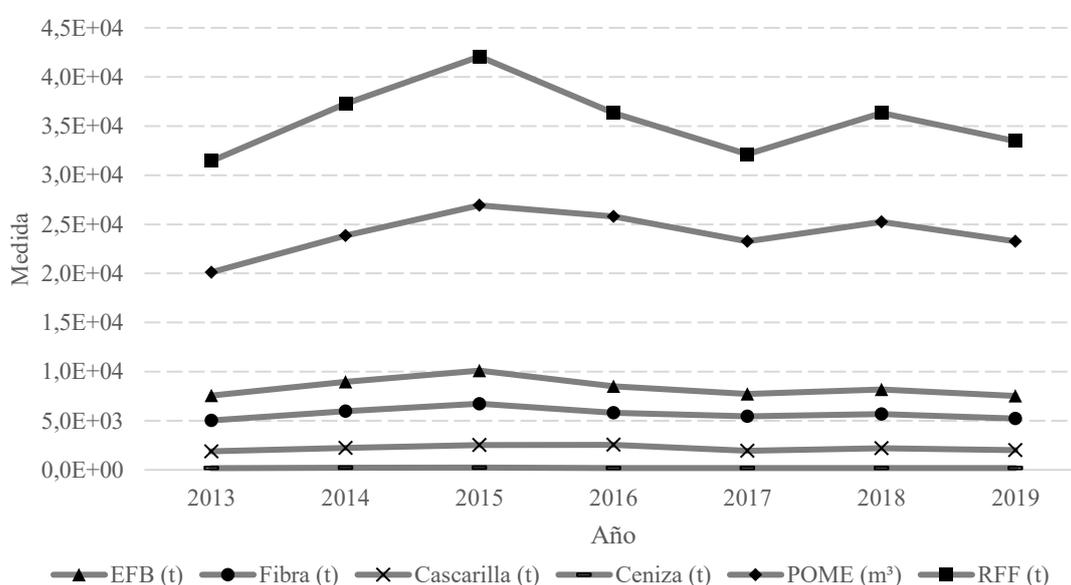
²⁴ Determinado a partir de valores de producción de residuos y subproductos del año 2019.

6.1.4. Producción de residuos y subproductos en el departamento de Casanare según constantes de producción determinados

La Tabla 19 plasma la generación de residuos y subproductos acorde a la dinámica del área de cosecha, tonelada de CPO año⁻¹, y rendimiento de tonelada de CPO ha⁻¹, la cual relaciona la tasa de residuos y subproductos acorde a los coeficientes de producción. Los coeficientes de RFF/CPO ($5.10 \pm 0,08$), EBF ($0.2349 \pm 0,007$), fibra ($0.1602 \pm 0,004$), cascarilla ($0.061 \pm 0,003$), ceniza ($0.0056 \pm 0,0002$) y POME ($0.677 \pm 0,036$), permitieron determinar la tasa de generación de residuos sólidos orgánicos y líquidos desde el 2013 al 2019 (ver Tabla 20).

Figura 6.

Tendencia de producción de residuos y subproductos de RFF (2013 – 2019).



Dichos coeficientes permitieron identificar que el área de cosecha tiene una relación positiva con las toneladas de CPO año⁻¹ (Prueba coeficiente de Pearson 0.797, sig.: 0.032), sin embargo, presenta una relación negativa con el rendimiento de CPO ha⁻¹ (Prueba coeficiente de Pearson -0.419, sig.: 0.350), lo que permite deducir que el área de cosecha no se relaciona con el rendimiento de CPO ha⁻¹, y por consiguiente no se relaciona con la tasa de toneladas de RFF procesado (Prueba coeficiente de Pearson 0,713, sig.: 0.072). Sin embargo, al analizar los datos, se evidencia que toneladas de RFF procesado y toneladas de CPO año⁻¹, existe una relación casi lineal (Prueba coeficiente de Pearson 0.989, sig.: 0.000), lo que valida la proyección de residuos y subproductos.

Asimismo, se evidencia una relación casi lineal entre RFF procesado y EFB (Prueba coeficiente de Pearson 0.963, sig.: 0.00), fibra (Prueba coeficiente de Pearson 0.964, sig.: 0.00), cascarilla (Prueba coeficiente de Pearson 0.862, sig.: 0.013), ceniza (Prueba coeficiente de Pearson 0.954, sig.: 0.01), y POME (Prueba coeficiente de Pearson 0.851, sig.: 0.015), lo que corrobora la proporción entre RFF y los coeficientes de residuos y subproductos determinados para el departamento de Casanare.

Tabla 19.

Proyección de residuos y subproductos del departamento de Casanare según coeficientes de producción.

| Año | Área sembrada | Área cosechada | Tonelada CPO/año | Rendimiento CPO/ha | FUENTE CPO/año | RFF Proce-sado (t) | EFB (t) | Fibra (t) | Cascarilla (t) | Ceniza (t) | POME (m³) |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|--|---------------------------|----------------|------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------|
| 2013 ^a | 74.622 | 45.640 | 158.787 | 3,48 | MinAgricultura (2018) | 31442,97 | 7549,46 | 5030,88 | 1886,58 | 172,94 | 20123,50 |
| 2014 ^a | 76.378 | 53.679 | 188.266 | 3,51 | MinAgricultura (2018) | 37280,40 | 8951,02 | 5964,86 | 2236,82 | 205,04 | 23859,45 |
| 2015 ^a | 77.838 | 59.923 | 212.508 | 3,55 | MinAgricultura (2018) | 42080,79 | 10103,60 | 6732,93 | 2524,85 | 231,44 | 26931,71 |
| 2016 ^b | 82.810 | 60.273 | 188.624 | 3,13 | MinAgricultura (2018, 2019); Fedepalma (2018a) | 36343,74 | 8511,70 | 5815,00 | 2544,06 | 199,89 | 25804,05 |
| 2017 ^c | 75.665 | 53.504 | 169.001 | 3,16 | MinAgricultura (2018, 2019); Fedepalma (2018a) | 32129,47 | 7711,07 | 5462,01 | 1927,77 | 192,78 | 23261,73 |
| 2018 ^d | 56.952 | 49.575 | 184.633 | 3,72 | Fedepalma (2019b) | 36345,08 | 8170,37 | 5662,56 | 2191,61 | 199,90 | 25259,83 |
| 2019 ^d | 57.794 | 49.052 | 169.975 | 3,47 | Fedepalma (2020a) | 33459,65 | 7521,73 | 5213,01 | 2017,62 | 184,03 | 23254,45 |
| Promedio | 71.723 | 53.092 | 181.685 | 3,43 | - | 35583,16 | 8359,85 | 5697,32 | 2189,90 | 198,00 | 24070,68 |
| Desviación estándar | 10.150 | 5.522 | 17.666 | 0 | - | 3.647,77 | 933,56 | 561,72 | 267,78 | 18,38 | 2219,22 |
| Coefficiente promedio | - | - | - | - | - | 5,08 | 0,225 | 0,156 | 0,060 | 0,006 | 0,695 |

Nota: Proyección de residuos y subproductos se usaron los siguientes coeficientes: ^a 5,05 t RFF/ t CPO; EFB (24,01%); fibra (16%); cascarilla (6%); ceniza (5,5%), POME (64%) adaptado a información Agroindustria A y D; ^b 5,19 t RFF/ t CPO; EFB (23,42%); fibra (16%); cascarilla (7%); ceniza (5,5%), POME (71%) adaptado a información Agroindustria C y E; ^c 5,26 t RFF/ t CPO; EFB (24%); fibra (17%); cascarilla (6%); ceniza (6%), POME (72,4%) adaptado a información Agroindustria F; ; ^d 5,08 t RFF/ t CPO; EFB (22,48%); fibra (15,58%); cascarilla (6,03%); ceniza (0,55%), POME (69,5%) ajustado a VAC.

Tabla 20.

Correlación entre las principales variables productivas relacionadas con la generación de residuos y subproductos del departamento de Casanare.

| | | Área Cosechada | Tonelada de CPO año-1 | Tonelada de CPO ha-1 | RFF procesado | EFB (t) | Fibra (t) | Cascarilla (t) | Ceniza (t) | POME m ³ |
|------------------------------|------------------------|----------------|-----------------------|----------------------|---------------|---------|-----------|----------------|------------|---------------------|
| Área Cosechada | Correlación de Pearson | 1 | ,797* | -,419 | ,713 | ,749 | ,807* | ,868* | ,789* | ,817* |
| | Sig. (bilateral) | | ,032 | ,350 | ,072 | ,053 | ,028 | ,011 | ,035 | ,025 |
| | N | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Tonelada de CPO año-1 | Correlación de Pearson | ,797* | 1 | ,213 | ,989** | ,957** | ,979** | ,894** | ,975** | ,904** |
| | Sig. (bilateral) | ,032 | | ,646 | ,000 | ,001 | ,000 | ,007 | ,000 | ,005 |
| | N | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Tonelada de CPO ha-1 | Correlación de Pearson | -,419 | ,213 | 1 | ,332 | ,216 | ,155 | -,038 | ,177 | ,049 |
| | Sig. (bilateral) | ,350 | ,646 | | ,466 | ,642 | ,740 | ,935 | ,704 | ,916 |
| | N | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| RFF procesado | Correlación de Pearson | ,713 | ,989** | ,332 | 1 | ,963** | ,964** | ,862* | ,954** | ,851* |
| | Sig. (bilateral) | ,072 | ,000 | ,466 | | ,000 | ,000 | ,013 | ,001 | ,015 |
| | N | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| EFB (t) | Correlación de Pearson | ,749 | ,957** | ,216 | ,963** | 1 | ,981** | ,817* | ,950** | ,749 |
| | Sig. (bilateral) | ,053 | ,001 | ,642 | ,000 | | ,000 | ,025 | ,001 | ,053 |
| | N | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Fibra (t) | Correlación de Pearson | ,807* | ,979** | ,155 | ,964** | ,981** | 1 | ,829* | ,991** | ,840* |
| | Sig. (bilateral) | ,028 | ,000 | ,740 | ,000 | ,000 | | ,021 | ,000 | ,018 |
| | N | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Cascarilla (t) | Correlación de Pearson | ,868* | ,894** | -,038 | ,862* | ,817* | ,829* | 1 | ,799* | ,873* |
| | Sig. (bilateral) | ,011 | ,007 | ,935 | ,013 | ,025 | ,021 | | ,031 | ,010 |
| | N | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Ceniza (t) | Correlación de Pearson | ,789* | ,975** | ,177 | ,954** | ,950** | ,991** | ,799* | 1 | ,876** |
| | Sig. (bilateral) | ,035 | ,000 | ,704 | ,001 | ,001 | ,000 | ,031 | | ,010 |
| | N | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| POME m³ | Correlación de Pearson | ,817* | ,904** | ,049 | ,851* | ,749 | ,840* | ,873* | ,876** | 1 |
| | Sig. (bilateral) | ,025 | ,005 | ,916 | ,015 | ,053 | ,018 | ,010 | ,010 | |
| | N | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |

Nota: * La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral); ** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). Fuente: Adaptado de IBM Corp. (2020).

Las correlaciones entre los residuos sólidos orgánicos son positivas, lo que demuestra la relación entre la materia y los respectivos procesos que la generan, es decir, se mantiene las proporciones de dichos residuos (ver Tabla 20). No obstante, se encuentra una singularidad en los datos, ya que la tasa de EFB presenta relación positiva con la tasa de POME (Prueba coeficiente de Pearson 0.749, sig.: 0.053), sin embargo, no explica la variación del efluente en relación a la generación de EFB. Lo anterior se justifica, ya que las agroindustrias presentan variedad significativa en la tasa de producción de POME (rango entre 0,6 a 1,4 m³ por RFF).

Por lo expuesto en el presente apartado, se construye la Tabla 21, la cual compila los diferentes coeficientes o constantes de producción de residuos y subproductos a partir de la transformación de una tonelada de RFF en el departamento de Casanare. Los valores obtenidos difieren de manera significativa en variables como POME y Ceniza con respecto a las investigaciones registradas en la Tabla 14, dado a los flujos de materiales como proporciones o volúmenes que se emplean para el proceso de esterilizado o combustión de calderas. Por otro lado, las variables como generación de EFB, fibra y cascarilla no presentan una variación mayor a 1 punto porcentual.

Tabla 21.

Resumen de constante o coeficiente de generación de residuos y/o subproductos palma de aceite (% peso húmedo y peso seco).

| No. | Tipo de residuo y/o subproducto | Porcentaje estimado según su fuente en peso húmedo ^d y peso seco ^e |
|-----|---|--|
| 1 | Racimo de Frutos Vacío (EFB) | EFB se estimó el 23% de RFF, cuyo peso seco es 35% del peso total |
| 2 | Fibra (fibra de mesocarpio) | Fibra se estimó del 16% de RFF, cuyo peso es 60% del peso total |
| 3 | Cascarilla de palma de aceite | Cascarilla se estimó del 6% de RFF, cuyo peso es 85% del peso total |
| 4 | Efluente de palma de aceite (POME) | 0,677 m ³ de POME generado al procesar 1 t RFF |
| 5 | Lodos de efluente (POMS ^a) | Lodos se estimó el 18%- de RFF ^e |
| 6 | Ceniza de combustible de palma de aceite (POFA ^b) | Producto de la combustión de fibra y cascarilla en calderas produjo 5% POFA |
| 7 | Clinker de palma de aceite (POC ^c) | Producto de la combustión de fibra y cascarilla en calderas produjo 15% POC |

Nota: ^a Palm oil mill sludge (POMS); ^b Palm oil fuel ash (POFA); ^c Palm oil clinker (POC); ^d Porcentaje obtenido a partir de los coeficientes de correlación de tasa de residuos y/o subproductos del departamento de Casanare; ^e Porcentaje obtenido de Liew et al., (2017).

6.2. Enfoques y variables utilizados en la valoración de residuos y subproductos del sector palmicultor que se generan en el proceso transformación de RFF

En los últimos años, se registra un incremento en la búsqueda y desarrollo de nuevas actividades enfocadas a la conversión de residuos y subproductos en energía y/o fuente de materiales, con énfasis en los procesos fuentes para implementar prácticas que integren ciclos cerrados (Kabongo, 2013). Diferentes disciplinas académicas enfocan esfuerzos en

la investigación y desarrollo de metodologías bajo esquemas de bucles cerrados, que permitan incorporar las salidas, visualizadas como residuos y/o subproductos, a los procesos fuentes o procesos complementarios. Los bucles, procesos o ciclos cerrados, son una analogía que rescata la economía circular, basado en los flujos de materia y energía que son susceptibles a reincorporar las salidas como fuente de materia o energía (en estado de grado) bajo las metodologías de valoración.

La valoración implementa diferentes metodologías apropiadas por la economía circular, tales como reciclaje, usado principalmente en Europa, Asia y América del Sur, y reutilización o beneficio en América del Norte (Nzihou & Lifset, 2010). Nzihou & Lifset (2010), resaltan que la valorización de residuos y subproductos hace referencia al tratamiento para obtener un beneficio como materia prima o complemento, o energía, con la finalidad de reducir las emisiones y los impactos ambientales relacionados (p. 2), cuyo beneficio puede ser estimado económicamente.

Asimismo, al generar bucles cerrados, se obtienen impactos positivos para los componentes sociales y económicos de los actores directos e indirectos de los procesos productivos. Por tal fin, el presente apartado inicia con la identificación de los enfoques de aprovechamiento y tecnológicos en relación a los residuos y subproductos de palma de aceite, y posterior estima el beneficio económico por implementación de dichas alternativas según el potencial de departamento de Casanare.

6.2.1. Enfoques de valoración de residuos y subproductos de aceite de palma.

Los residuos y subproductos de palma de aceite presentan composición química y física variada (ver Tabla 15), tales como humedad, poder calorífico, composición nutricional, retención de agua, entre otros, lo que genera un abanico de alternativas de implementación según los requerimientos del proceso final. Para tal fin, se emplean diferentes metodologías, coadyuvadas por procesos físicos, químicos y/o biológicos, para generar productos derivados de la transformación de los residuos y subproductos, con viabilidad de sustituir o complementar otros procesos productivos.

En la Tabla 22, se compiló las tendencias de los últimos 10 años en relación a valoración de residuos y subproductos de palma de aceite, con énfasis en las tendencias globales, enfoques de aprovechamiento y enfoques tecnológicos. Es importante resaltar que la tendencia geográfica en investigación se concentró en Asia (73%), dado a la producción actual de CPO, soporta principalmente en tres naciones del continente asiático, correspondiente a Indonesia, Malasia y Tailandia, las cuales generan alrededor de 66.200 miles toneladas de CPO, lo que equivale al 88,16% de la producción mundial de CPO (USDA, 2021, p. 19). Asimismo, se evidenció investigaciones en el continente de América (16%) y África (7%), dado a su participación en la producción mundial de CPO, cuyos continentes contribuyen en casi 11,84%, equivalente a 8.893 miles toneladas de CPO (USDA, 2021, p. 19).

Las tendencias geográficas en relación a los enfoques de aprovechamiento, no presentaron correlación (Prueba Chi-cuadrado de Pearson 0,813; df:12), lo que valida que no existe un enfoque determinado de aprovechamiento según la zona geográfica, sino que existe variedad de alternativas de valoración de residuos y subproductos.

Tabla 22.

Concentraciones de tendencias claves para la valoración de residuos y subproductos de planta de beneficio de palma de aceite.

| Autor | Zona geográfica ^a | | | | | Enfoque de aprovechamiento ^b | | | | | Enfoque tecnológico ^c | | | Residuo y/o subproducto ^d | | | | |
|-------------------------------|------------------------------|----|----|----|----|---|----|----|----|----|----------------------------------|----|----|--------------------------------------|----|----|----|------|
| | AM | EU | AS | AF | DL | NS | EA | BF | CS | OI | PQ | PF | PB | EFB | FI | CA | CE | POME |
| Fokam et al., (2021) | | | | x | | | | | x | | | x | | | x | | | |
| Quayson et al., (2020) | | | | x | | | | x | | | x | | | | | x | | x |
| Aprianti et al., (2020) | | | x | | | | | x | | | | x | | x | | | | |
| Foong et al., (2020) | | | | | x | x | | x | | | | x | | x | x | x | | |
| Gallego et al., (2020) | x | | | | | | | x | | | | x | | x | | | | |
| Hau, et al., (2020) | | | x | | | x | | | | | | | x | x | | | x | x |
| Prasetyo et al., (2020) | | | x | | | | | | | x | | x | | | | x | | |
| Intasit et al., (2019) | | | x | | | | x | x | | | x | | | x | | | | |
| Lemus (2019) | x | | | | | x | | | | | | x | | | | | | x |
| Lam et al., (2019) | | | x | | | | | x | | | | x | | x | | | | |
| Vasu et al., (2019) | | | x | | | | | x | | | | x | | | | x | | x |
| Sinjaroonsak et al., (2019) | | | x | | | | x | | | | x | | x | x | | | | |
| Chin et al., (2019) | | | x | | | | | x | | | | | x | x | | | | x |
| Burimsitthigul et al., (2019) | | | x | | | | | x | | | x | | x | | | x | | |
| Dias et al., (2019) | x | | | | | x | | | | x | | x | | | | x | x | |
| Quintero & Torres (2019) | x | | | | | x | | | | | | x | | x | x | x | | |
| Shanmugarajah et al., (2018) | | | x | | | | | | | x | x | | | x | | | | |
| Zulkarnain et al., (2018) | | | x | | | | x | | | | x | | x | x | | | | |
| Liew et al., (2018) | | | x | | | x | | | | | | x | | x | x | x | x | |
| Ahmad et al., (2018) | | | x | | | | | | x | | | x | | x | | | | |
| Bukhari et al., (2018) | | | x | | | x | x | | | | x | | x | | | | | x |
| Cheah et al., (2018) | | | x | | | | | x | | x | x | | x | | | | | x |
| Misnon et al., (2018) | | | x | | | | x | | | x | x | x | | | | x | | |

| Autor | Zona geográfica ^a | | | | | Enfoque de aprovechamiento ^b | | | | | Enfoque tecnológico ^c | | | Residuo y/o subproducto ^d | | | | |
|----------------------------|------------------------------|----|------|------|------|---|------|------|------|------|----------------------------------|------|------|--------------------------------------|------|------|------|------|
| | AM | EU | AS | AF | DL | NS | EA | BF | CS | OI | PQ | PF | PB | EFB | FI | CA | CE | POME |
| Sukira et al., (2017) | | | | | x | x | | x | | | | x | | x | x | x | x | |
| Yoo et al., (2017) | | | x | | | | | x | | | | x | | x | | | | |
| Ong et al., (2017) | | | x | | | | | | x | | | x | | | | | x | |
| Kamsani et al., (2017) | | | x | | | | x | | | | x | | x | x | | | | |
| Idris et al., (2017) | | | x | | | | | x | | | | | x | | | | | x |
| Thinagaran & Sudesh (2017) | | | x | | | | | | | x | x | | x | | | | | x |
| Junpadit et al., (2017) | | | x | | | | x | | | | x | | x | | | | | x |
| Agudelo et al., (2016) | x | | | | | | | | x | | | x | | | | x | x | |
| Lim & Wu (2016) | | | x | | | x | | | | | | x | x | | | | | x |
| Silveira et al., (2016) | x | | | | | | x | | | | | | x | | x | | | |
| Tsouko et al., (2016) | x | | | | | x | x | | | | x | | x | | x | x | | |
| Fatriasari et al., (2016) | | | x | | | | x | | | | x | | | x | | | | |
| Nyakuma (2015) | | | x | | | | | x | | | | x | | x | x | x | | |
| Louhasakul et al., (2015) | | | x | | | | x | x | | | | | x | | | | | x |
| Neoh et al., (2015) | | | x | | | | x | | | | | | x | x | | | | x |
| Iwuagwu & Ugwuanyi (2014) | | | | x | | | x | | | | x | | x | | | | | x |
| Ishola et al., (2014) | | | x | | | | x | | | | x | | x | x | | | | |
| Nazir et al., (2013) | | | x | | | | x | | | | x | x | | x | | | | |
| Stemann et al., (2013) | | | x | | | x | | x | | | | x | | x | | | | |
| Salema & Ani (2012) | | | x | | | | | x | | | | x | | x | | | | |
| Nahrul et al., (2012) | | | x | | | x | | | | | | | x | x | | | | x |
| Promedio | 0,16 | 0 | 0,73 | 0,07 | 0,05 | 0,27 | 0,34 | 0,39 | 0,14 | 0,09 | 0,39 | 0,5 | 0,43 | 0,57 | 0,2 | 0,3 | 0,14 | 0,32 |
| Desviación estándar | 0,37 | 0 | 0,45 | 0,25 | 0,21 | 0,45 | 0,48 | 0,49 | 0,35 | 0,29 | 0,49 | 0,51 | 0,5 | 0,5 | 0,41 | 0,46 | 0,35 | 0,47 |
| Datos en relación | 7 | 0 | 32 | 3 | 2 | 12 | 15 | 17 | 6 | 4 | 17 | 22 | 19 | 25 | 9 | 13 | 6 | 14 |
| Datos considerados | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 |

Nota. ^a AM = América; EU = Europa; AS = Asia; AF = África; DL = Diferentes lugares. ^b NS = Fuente de nutrientes; EA = Actividad enzimática; BF = Biocombustible; CS = Construcción; OI = Otros intereses. ^c PQ = Proceso químico; PF = Proceso físicos; PB = Proceso biológico. ^d EFB = Racimos de Fruta Vacía; FI = Fibra; CA = Cascarilla; CE = Ceniza; y POME = Efluente residual de planta de molienda (incluye lodos).

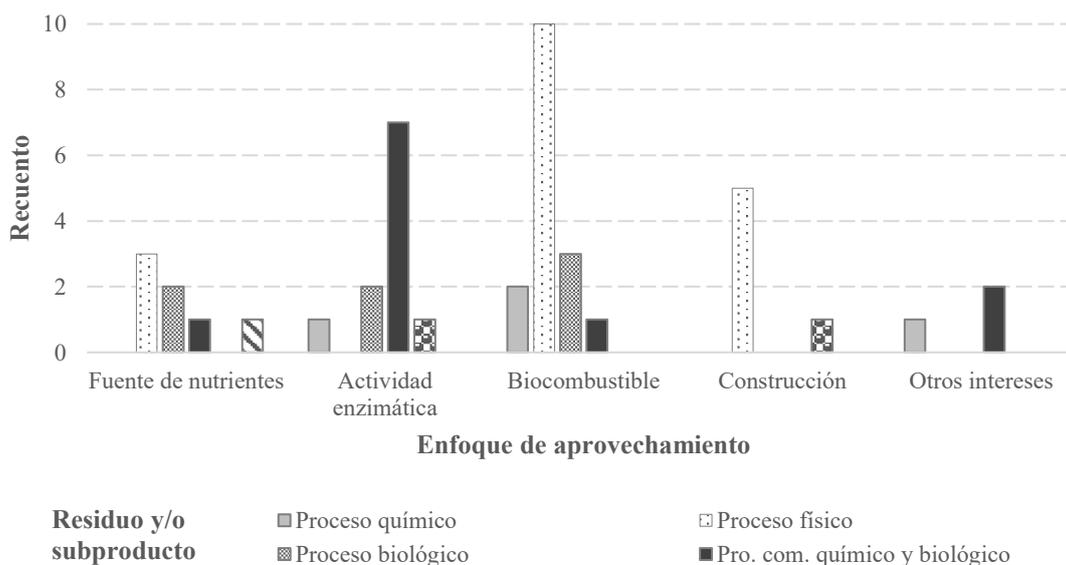
Adicional, se evidenció que no existe una correlación entre la tendencia geográfica y enfoque tecnológico (Prueba Chi-cuadrado de Pearson 0,907; df:15), ya que existe variedad de investigaciones con metodologías variadas en diferentes escalas geográficas. Por otro lado, se evidenció que existe correlación entre los enfoques de aprovechamiento y el tipo de residuo y/o subproducto de RFF (Prueba Chi-cuadrado de Pearson 0,001; df:26), lo que ratifica que cada salida del proceso del RFF presenta una tendencia de aprovechamiento según sus composición física y química. No obstante, se evidenció que no existe correlación entre el enfoque tecnológico y el tipo de residuo y/o subproducto de RFF (Prueba Chi-cuadrado de Pearson 0,031; df:40), ya que se emplean una variedad de alternativas para transformar las salidas del proceso de RFF según la necesidad final. Sin embargo, si existe correlación entre el enfoque de aprovechamiento y el enfoque tecnológico (Prueba Chi-cuadrado de Pearson 0,06; df:22), lo que corroboró que existen métodos específicos según el enfoque de aprovechamiento.

6.2.1.1. Enfoque de aprovechamiento y tecnológico de residuos y/o subproductos de palma de aceite

Como se resaltó previamente, el enfoque de aprovechamiento tiene correlación con el tipo de residuo y/o subproducto de palma de aceite, lo cual genera tendencias acordes a las propiedades físicas y químicas de las salidas del proceso de RFF. Las tendencias del enfoque de aprovechamiento se compilan en 5 categorías, correspondientes a biocombustibles, actividad enzimática, fuente de nutrientes, construcción, y otros intereses, cuyo promedio en la revisión sistemática correspondió al 39%, 35%, 15%, 7% y 4% respectivamente.

Figura 7.

Concentración de enfoques de aprovechamiento según el tipo de residuo y/o subproducto de palma de aceite.

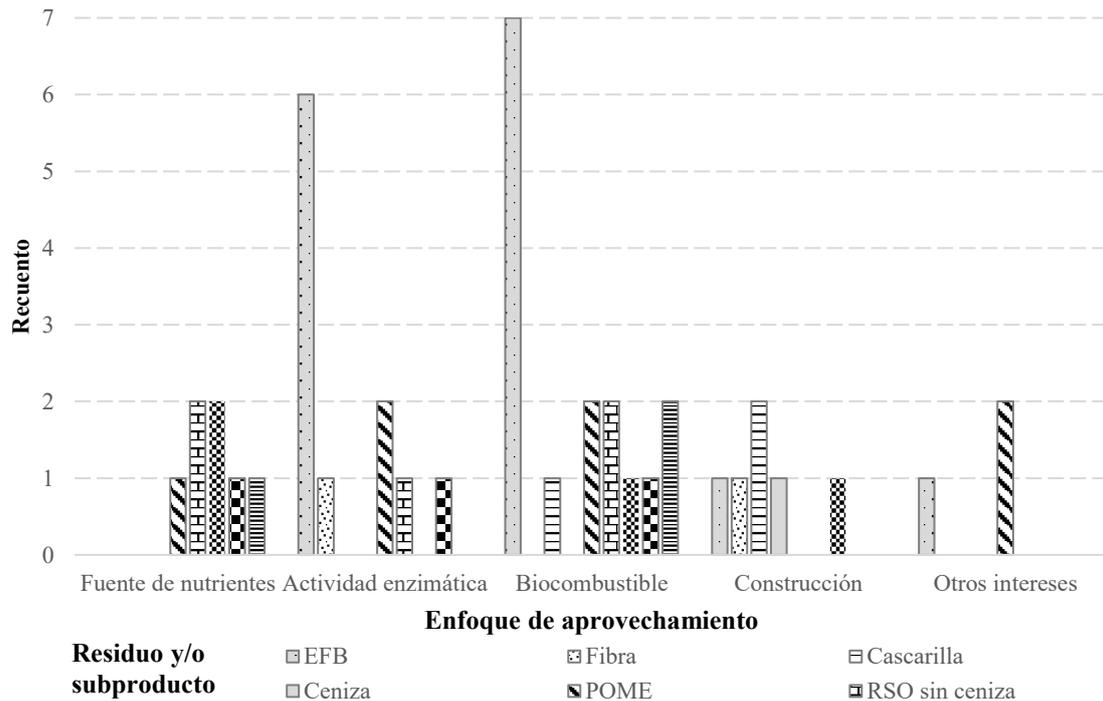


En la Figura 7 se concentró las tendencias y enfoques de aprovechamiento destinado a la variedad de residuos y/o subproductos, que en algunos casos se emplean de manera

individual o en conjunto para obtener un bien o servicio complementario o sustituto. Es pertinente destacar que, el principal subproducto con mayor relevancia corresponde a EFB, dado a la abundancia producida luego de transformar una tonelada de RFF²⁵, seguido por cascarilla y fibra, mientras que el principal residuo corresponde a POME, seguido por ceniza (o procesos complementarios que emplean residuos y subproductos, en conjunto con la ceniza).

Figura 8.

Concentración de enfoques tecnológicos para la valoración de residuo y/o subproducto de palma de aceite.



De otro modo, la Figura 8 evidenció la concentración de los enfoques de aprovechamiento para la valoración de residuos y/o subproductos de palma de aceite. Dicha concentración, corroboró la no correlación entre enfoque de aprovechamiento y el enfoque tecnológico, ya que existe diversidad de metodologías de transformación según la tendencia de aprovechamiento. Es significativo resaltar que el principal proceso corresponde al físico (50%), seguido por proceso biológico (43%) y proceso químico (39%), que se emplearon de manera individual o en conjunto para la transformación de los residuos.

6.2.1.1.1. Biocombustibles

El principal enfoque de aprovechamiento de los residuo y/o subproducto de RFF, corresponde a biocombustibles (39% de la revisión total), donde los residuos sólidos orgánicos como EFB, fibra, cascarilla y el residuo líquido POME son empleados en este en-

²⁵ En la presente investigación, el promedio de EFB posterior al procesamiento de 1 t de RFF, equivale al 23,59% del peso inicial.

foque (Quayson et al., 2020; Quintero & Torres, 2019). Los biocombustibles provenientes de los residuos resaltados son abordados desde diferentes perspectivas, tales como (i) materia complementaria o sustituta para la generación de calor en calderas; (ii) materia sustituta o complementaria para la generación eléctrica; y (iii) materia sustituta para la obtención de biodiesel. Lo anterior, se apoya en procesos físicos tales como combustión directa, carbonización gasificación, pirolisis, torrefacción, termólisis, y procesos biológicos como la digestión anaeróbica (Lam et al., 2019; Mekhilef, Saidur, Safari, & Mustaffa, 2011; Sukiran et al., 2017)

Nyakuma (2015) evaluó el potencial de bioelectricidad que puede generar el aprovechamiento de EFB, fibra y cascarilla en diferentes proporciones, obteniendo un potencial de 74,5-119MWh de electricidad por año según la eficiencia del proceso de conversión, tal como pirólisis (65%), gasificación (50%) y combustión directa (80%). En dicha investigación, determinó que acorde al poder calorífico de los residuos sólidos orgánicos, la cascarilla presenta el mayor aporte, seguido por la fibra y EFB. Asimismo, resaltó la complejidad de transformación del EFB, dado al alto contenido de humedad y contenido alcalino, por lo que recomienda no implementar como combustible único en calderas, sino combinar en diferentes proporciones con otros residuos sólidos orgánicos. No obstante, otros autores como Aprianti et al. (2020), sugieren que el EFB puede ser empleada como única materia para el proceso de combustión, lo anterior, basado en procesos de gasificación (350-550 °C), ya que presenta una composición rica en metano (22,64% vol.), monóxido de carbono (29,22% vol.) y dihidrógeno (3,4% vol.), lo que establece propiedades eficientes en conversión de carbón (95,74%) y eficiencia de gas frío (81,65%).

Quintero & Torres (2019) diagnosticaron el potencial energético de los residuos y subproductos de palma de aceite del departamento del Cesar, Colombia, por medio de la combinación de diferentes proporciones de EFB, fibra y cascarilla. En dicho estudio, determinaron que la combinación de fibra y cascarilla, con un 30% de EFB, presentó el mejor potencial de producción eléctrica de KW y vapor, no obstante, requiere una mayor capacidad en área de calderas. Adicional, determinaron que la cascarilla presentó el mayor poder calorífico entre los residuos y subproductos, menor contenido de azufre y humedad, lo que resalta su mejor uso.

Quayson et al. (2020), evaluaron la producción de biocombustible a partir la cascarilla (subproducto) y POME (residuo), en un proceso físico coadyuvado por actividad enzimática de *Aspergillus oryzae*. La cascarilla fue sometida a proceso de carbonización (80 °C, 24 h), para generar una estructura con microporos capaz de retener impurezas, mientras que el POME fue empleado como fuente de nutrientes para extraer la lipasa inmovilizada bajo el método de metanólisis. Como resultado, obtuvieron éster metílico con un índice de cetano 48,8 y propiedades favorables de flujo en frío, lo cual, genera un biodiesel apto para su uso. Un proceso similar fue desarrollado por Vasu et al. (2019), donde usaron la proporción 50:50 de cascarilla y lodo de POME, bajo procesos de pirolisis.

Intasit et al.(2019), realizaron un proceso similar para la obtención de biodiesel, a partir de EFB y POME, coadyuvado por procesos biológicos de fermentación en estado sólido no estéril con *Aspergillus tubingensis* TSIP9 (hongo presente en la biomasa residual de palma de aceite) y biorreactores. Como producto, obtuvieron un biodiesel con un bajo contenido de potasio y alto contenido de celulosa.

Otra investigación enfocada en POME, fue realizada por Idris et al. (2017), donde emplearon microalgas *Chlorella vulgaris* UNMACC 001 en lecho suspendido para extraer biodiesel. Como resultado, obtuvieron una alta tasa de crecimiento ($0,29 \text{ día}^{-1}$), equivalente a $0,12 \pm 0,02 \text{ g litro}^{-1} \text{ día}^{-1}$ de biomasa, cuyo escenario es favorable para la extracción de éster con un contenido del 69,9% de ácidos grasos. Los dos anteriores autores son relevantes destacar, ya que en el departamento no se emplea el tratamiento biológico de aguas residuales con biorreactor, por tal fin, fines de valoración como estos no fueron considerados en el modelo de economía circular.

En contraposición metodológica, Lam et al. (2019), emplearon EFB en conjunto con un residuo de operación de maquinaria (aceite usado), para generar un biocombustible sólido a partir del método de torrefacción de temperatura controlada de 250 °C . Como resultado, obtuvieron un combustible sólido con alto poder calorífico ($28,0 \text{ MJ/kg}$) y contenido medio de carbono (68,3%). Lo anterior, es pertinente resaltar, ya que emplea tecnología de microondas para el proceso de torrefacción, cuyo proceso es de bajo costo. Del mismo modo, Gallego et al. (2020), emplearon una investigación de variación de calor, por medio de técnicas de ganancia de energía de respuesta como alternativa al rendimiento de energía variable, para determinar la eficiencia del proceso de torrefacción en la generación de biocombustibles sólidos. Como resultado, obtuvieron un rendimiento de 37 t/día de biocarbón, producto de la transformación de 100 t/día de EFB, con potencial de electricidad de $0,36 \text{ MW}$.

6.2.1.1.2. *Actividad enzimática*

El segundo enfoque de aprovechamiento de los residuos y/o subproductos de RFF es la actividad enzimática (35% de la revisión total), en el que los residuos sólidos orgánicos como EFB, y el residuo líquido POME son empleados bajo este enfoque, dado al alto contenido de carbono, nitrógeno, fósforo, potasio y celulosa. El principal método químico empleado para el presente enfoque corresponde a hidrólisis, coadyuvado por procesos biológicos de fermentación.

Iwuagwu & Ugwuanyi (2014) emplearon como única fuente de carbono y nitrógeno al residuo POME, sin un tratamiento previo con concentraciones de 76.000 mgL^{-1} de sólidos totales, 15.128 mgL^{-1} de carbón orgánico, 114.800 mgL^{-1} de DQO, $3,9 \text{ pH}$, entre otros, para la obtención de levaduras. Para tal fin, emplearon fermentación a 150 rpm , $28 \pm 2 \text{ °C}$, con bacterias propias del proceso de tratamiento de agua residual, tal como *Saccharomyces sp* L31. Como resultado obtuvieron un crecimiento rentable de levadura seca, con una concentración de $4,42 \text{ gL}^{-1}$, cuyo contenido de aminoácidos fue superior al estándar FAO/OMS. Cabe resaltar que dicho proceso generó un valor agregado, ya que presentó una descomposición del 83% del DBO inicial.

Una investigación similar para la generación de enzimas que usó residuos y/o subproductos como fuente de carbono, fue desarrollada por Silveira et al. (2016), quienes emplearon fibra y cascarilla triturada con diámetro de $1 - 2 \text{ mm}$, en conjunto con *Aspergillus niger* C BRMCTAA 82 en fermentación sumergida. Como resultado, obtuvieron un rendimiento favorable con residuos de fibra y cascarilla al comparar la producción de lipasa con otros residuos de otros cultivos, dado a su contenido natural de ácido palmítico y ácidos grasos, los cuales representan una mayor fuente de carbono, y por consiguiente, una mayor generación de lipasa como producto sustituto de enzimas industriales.

Nazir et al. (2013), desarrollaron una metodología con ácido fórmico (20% p/v) y peróxido de hidrogeno (10% v/v) para extraer celulosa a partir de fibras de EFB, con un resultado del 64% (p/p) de celulosa, lo que registra uno de los valores más altos de los referentes comparados. Otra investigación enfatizada en la extracción de celulosa, fue realizada por Sinjaroonsak et al. (2019), quienes extrajeron celulosa y xilanas a partir del Racimo de Fruta Vacía (EFB) pretratada con peróxido de aluminio, coadyuvado por cepas *Streptomyces*.

Otra investigación relevante fue realizada por Zulkarnain et al. (2018), quienes extrajeron biovainilla a partir del aprovechamiento de EFB, subproducto rico en lignocelulosa. Dicho proceso se realizó por medio hidrolisis alcalina con un resultado del 41% de ácido vanílico y 39% biovainilla.

Aunque los resultados experimentados en dicha categoría son muy interesantes por las diferentes aplicaciones que ostenta, dicho enfoque no presenta viabilidad técnica según las condiciones tecnológicas de las agroindustrias del departamento de Cansare, por tal motivo no fueron considerados bajo el modelo de economía circular.

6.2.1.1.3. Fuente de nutrientes

El tercer enfoque de aprovechamiento de los residuos y/o subproductos de RFF, corresponde a fuente de nutrientes (15% de la revisión total), donde los residuos sólidos orgánicos como EFB, fibra y ceniza, y el residuo líquido POME se utilizan. Este es empleado en la obtención de productos complementarios o sustitutos, dado al contenido nutricional rico en fósforo, nitrógeno, potasio y magnesio, y bajo contenido de metales, coadyuvado por procesos biológicos y físicos principalmente, tales como compostaje, biorreactores, pirólisis, entre otros. Es notable recalcar que, este enfoque presenta la unión de residuos y subproductos de palma de aceite u otra actividad productiva, para generar productos estables con mejor capacidad de asimilación por los sustratos.

Lim & Wu (2016) emplearon POME (específicamente el efluente generado en el proceso de centrifugado), ya que este residuo presenta un alto contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y aceite suspendido, con una composición del 76% de agua, 12% de aceite residual y el restante en celulosa, lignina y otras impurezas. Para generar un compostaje apto a los requerimientos nutricionales, emplearon la relación 2:1 de POME y paja de arroz, con una duración de 4 semanas a una temperatura control de 60 °C. Como resultado, obtuvieron un compostaje de 9,76 C/N, calcio ($1,13 \pm 0,05$ g/kg), potasio ($25,47 \pm 0,32$ g/kg), magnesio ($4,87 \pm 0,19$ g/kg) sodio ($7,40 \pm 0,03$ g/kg) y fósforo ($3,62 \pm 0,27$ g/kg).

Hau et al. (2020), emplearon la combinación de EFB, POME, cenizas y residuos de otros procesos productivos, para generar un compostaje rico en carbono y nitrógeno. Para tal fin, usaron diferentes relaciones variadas de residuos en camas de 40 días con temperatura controlada, cuya materia fue descompuesta por *Eisenia Fetida*. Como resultado, obtuvieron un rendimiento superior de compostaje por su composición nutricional al combinar EFB más POME con una relación de 1:1, con contenido de 31,9% C, 1,08% N, 3,8% K y una relación de 29,45 C/N. Dicho estudio, también generó un compostaje conformado por ceniza de EFB, sin embargo, presentó un rendimiento bajo de contenido de carbono, nitrógeno y potasio, pero un contenido medio de fósforo.

Un estudio con resultados similares, fue desarrollado por Nahrul et al. (2012), donde emplearon diferentes proporciones de EFB con POME. Para ello, emplearon a *Eisenia Fetida* en camas de compostaje con tiempos de 40 a 45 días, con comparación inicial y final de la relación C/N. En las diferentes proporciones analizadas, determinaron una reducción de 1/3 de la relación inicial, con una mayor eficiencia en la proporción 50:50 de EFB con POME, respectivamente.

Lemus (2019) empleó el efluente proveniente del tratamiento POME bajo procesos facultativos y maduración, con la finalidad de obtener un producto sustituto de la fertilización en cultivo. Para ello, realizó un análisis de componente físicos y químicos que limitan o favorecen la productividad de t RFF/ha, tales como K, Cl, N, P, S, Mg, Ca, metales pesados, entre otros. Posterior, implementó un riego en suelo por más de un año para determinar el incremento en parámetros foliares, t RFF/ha, salinización, retención de sustancias en sustrato y transferencia de sustancias químicas al nivel freático. Como resultado, obtuvo un producto sustituto de bajo costo, que únicamente implica la inversión del sistema de riego por aspersión, incrementa el crecimiento foliar y t RFF/ha, y no genera retención de sustancias en el nivel freático. Adicional, obtuvo una reducción significativa de costos asociados a tasa retributiva y fertilización.

6.2.1.1.4. Construcción

El último enfoque de aprovechamiento corresponde a construcción (14% de la revisión total), el cual emplea la fibra, cascarilla y ceniza, por sus propiedades físicas de resistencia y capacidad de retención de humedad. En dicho enfoque emplea procesos físicos de secado a temperatura controlada para garantizar las propiedades mecánicas del subproducto, lo que favorece a la generación de productos complementarios.

Fokam et al. (2021), emplearon fibras del mesocarpio del RFF provenientes del proceso de separación de nueces, las cuales fueron sometidas previamente a secado (105° C en 24 horas). Usaron diferentes proporciones en combinación con cemento industrial para determinar la rigidez del mortero. Como resultado obtuvieron un montero más resistente, cuya composición contenía 3,5% de fibra residual de palma de aceite. Por otro lado, Ong et al. (2017), emplearon un estudio comparativo entre residuos de palma de aceite (cascarilla), siderúrgicas (escoria de acero) y plantas de energía (cenizas de fondo de carbón), combinado con concreto, para determinar la rigidez (medida en Mpa), como resultado, se obtuvo una resistencia del mortero inferior al referente a los 28 días (39,44 MPa), pero superior al referente a los 90 días (44,08 Mpa) al emplear concreto con cascarilla de palma de aceite.

Aunque la implementación de residuos y subproductos de palma de aceite favorecen las condiciones de generación de nuevos productos más resistentes, este enfoque no fue contemplado en el modelo de economía circular, ya que la capacidad instalada en el departamento no satisface las condiciones base para esta implementación.

6.2.2. Valoración económica de los enfoques de aprovechamiento de residuos y subproductos bajo el método de costos evitados.

Previamente se resaltaron los diferentes enfoques de aprovechamiento de residuos y subproductos de palma de aceite; sin embargo, las condiciones tecnológicas actuales del

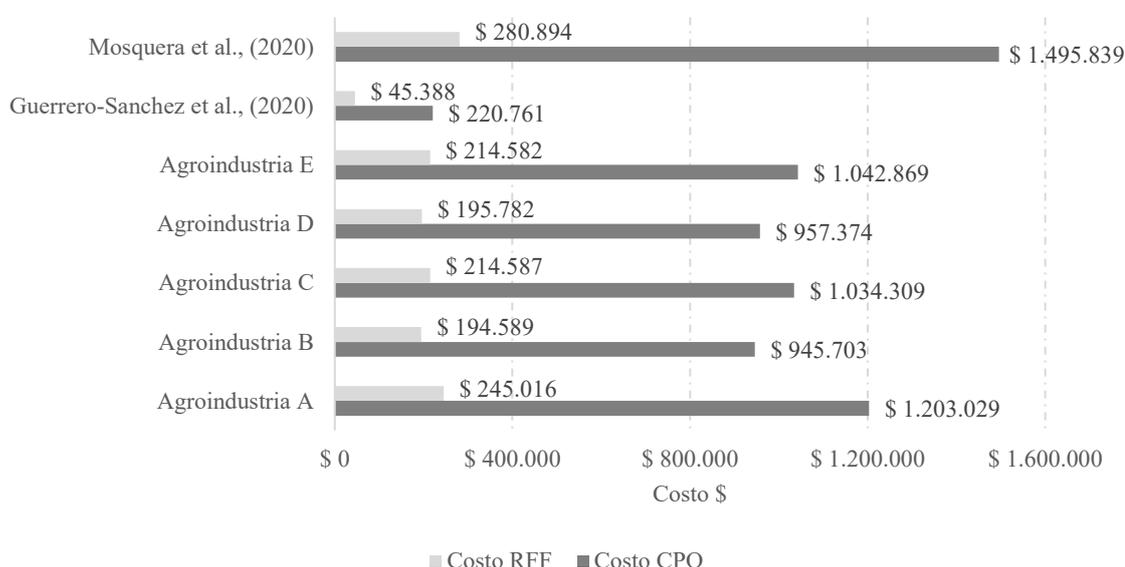
departamento de Casanare limitan la aplicación a biocombustibles, fuente de nutrientes y en algunos casos, a construcción.

Al indagar las estadísticas de las agroindustrias del departamento de Casanare²⁶, se evidenció que el costo promedio de transformación de una tonelada de RFF que contempla mano de obra, operación e insumos para la transformación, corresponde a \$212.911 pesos COP /t (\pm \$20.404), y el costo de procesar una tonelada de CPO equivale a \$1.029.307 pesos COP /t (\pm \$106.748), con una razón de 4,83 \$CPO/\$RFF. Se comprobó que existe una correlación entre el costo de t CPO y costo t RFF (prueba de correlación de Pearson 0,998; sig. 0,000), no obstante, no existe correlación entre la razón \$CPO/\$RFF con las otras variables de costo t CPO (prueba de correlación de Pearson 0,865; sig. 0,058) y costo t RFF (prueba de correlación de Pearson 0,828; sig. 0,084).

Al contrastar los costos con Guerrero-Sánchez et al. (2020), se evidencia que existe una diferencia mayor de 0,005 \$CPO/\$RFF, dado que la zona oriental requiere un mayor costo asociado a la operación del sistema de riego y tecnología implementada para la transformación. Es clave mencionar que los valores de costo tonelada RFF y tonelada CPO son menores, dado que dichos estudios no contemplan costos asociados al control de malezas y cambio regenerativo de plantaciones. Con relación al estudio de Mosquera et al. (2020), se registra -459.182 pesos COP/t CPO, -67.982 pesos COP/t RFF y -0,46 \$CPO/\$RFF, ya que dicho estudio involucra el costo de oportunidad de la tierra (ver Figura 9).

Figura 9.

Comparación de costo de producción de una t CPO y t RFF en pesos.



Según Guerrero-Sánchez et al. (2020), el principal costo corresponde a la mano de obra, que representa alrededor del 48%, seguido por el mantenimiento a las instalaciones del 37%, y por último un 15% asociado al consumo de agua y energía. El último porcentaje, está conformado por costos de tasa por uso del agua, tasa retributiva y combustibles

²⁶ Información del año 2019.

para calderas, cuyos costos presentan viabilidad de disminución dado a la reutilización de residuos y subproductos de palma de aceite bajo el marco de la economía circular, ya que estos ostentan condiciones idóneas para sustituir de manera total o proporcional las fuentes de energía y abastecimiento de agua (para una fracción del cultivo).

Con base al decreto 3100 de 2003, por medio del cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales (Ministerio de Ambiente, 2003), se estimó un valor aproximado de \$1,006MM pesos COP por la concesión a las agroindustrias²⁷, cuyo valor puede ser disminuido a cero bajo el marco de la economía circular, apoyado en la resolución 1207 de 2014, por el cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). La tasa retributiva de m³/año no presenta variación significativa con valores otorgados en otras localizaciones de la Orinoquia, dado que la carga de contaminante y la tarifa regional no presentan fluctuaciones relevantes.

Asimismo, se estimó un costo de aprovechamiento y/o disposición de \$126.000 pesos CPO por una t EFB, \$98.000 pesos CPO por t fibra, y \$95.000 pesos CPO t de cascarilla, cuyos valores no incorporan un aprovechamiento específico sino variado, con aplicación como fuente de nutrientes (acondicionador de suelo) o energía.

6.2.2.1. Estimación económica por costos evitados al implementar alternativas de valoración en residuos y subproductos de palma de aceite.

Dado a los principales enfoques de aprovechamiento y capacidad instalada en el departamento de Casanare, se construyó el potencial de reutilización y reúso según los enfoques energéticos y nutricional de los residuos y subproductos del procesamiento de una tonelada de RFF o tonelada de CPO. El potencial se determinó por medio de los valores referentes que fueron extraídos de la revisión sistemática.

En la Tabla 23 se registra el potencial energético del departamento de Casanare, equivalente a 675,67 TJ año⁻¹, producto de la proyección de residuos y subproductos del año 2019, cuyo valor es resultado del reúso total de los residuos bajo este enfoque. No obstante, la infraestructura local (espacio de calderas y tipo de tratamiento de efluentes) y el contenido de humedad de algunos residuos (en especial EFB) limitan el potencial, ya que la humedad disminuye el poder calorífico y requiere ser coadyuvado con otro tipo de combustible o proceso físico previo. Con base a lo anterior, el potencial se reduce en un 79,18% del valor inicial. Adicional, presenta una complejidad al requerir grandes áreas y volúmenes para su aprovechamiento, dado que los residuos de EFB y POME corresponden al 80,59% del volumen total de residuos y subproductos generados posterior a la transformación de RFF.

²⁷ Valor estimado a partir de la información entregada por la agroindustria B, donde especifica valor de m³/año, y la proyección de POME para el año 2019.

Tabla 23.*Potencial energético de residuos y subproductos de RFF del departamento de Casanare.*

| Poder calorífico | Tipo de residuo | | | | |
|-------------------------|------------------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|
| | EFB | Fibra | Cascarilla | Ceniza | POME |
| Rango teórico (MJ/kg)* | 18-19,92 | 18,8-19,58 | 19,5-20,75 | - | 16,1-17,65 |
| Promedio (MJ/kg) | 18,96 | 19,19 | 20,125 | - | 16,875 |
| Residuos 2019 (t) | 7.521,72 | 5.213,01 | 2.017,61 | - | 23.254,45 |
| Potencial (MJ/t) | 142.611.969,4 | 100.037.715,5 | 40.604.534,76 | - | 392.418.906,9 |
| Potencial (GJ/t) | 142.611,96 | 100.037,71 | 40.604,53 | - | 392.418,90 |
| Potencial (TJ/t) | 142,61 | 100,03 | 40,60 | - | 392,41 |

* Valores promediados de investigaciones de Sohni et al. (2018), Soh (2016), Loh & Choo (2013), Loh et al (2012), Abdullah et al., (2011) y Singh et al., (2010).

Por lo anterior, el potencial real de producción de energía a partir de la combustión, corresponde a 140,64 TJ/año, producto del aprovechamiento del 100% de la fibra y cascarilla, sin importar la proporción. Cabe resaltar que, su proporción recomendada correspondería a 60:40 a 90:10 de fibra y cascarilla (Sundram, 2013; Vijaya et al., 2008). Al respecto del aprovechamiento energético, se supliría el 100% del combustible empleado como carbón o coque. Paralelamente, el aprovechamiento energético generaría 289,22 – 361,53 t de ceniza, apta como acondicionar de suelo en conjunto con otros residuos o de aplicación individual.

Bajo este escenario de aprovechamiento energético con el potencial resaltado, el costo evitado correspondería a \$959.796.114 pesos COP, producto de sustituir la fuente de combustible (coque y/o carbón) para la obtención de energía en calderas. A la vez, generaría otros beneficios como la reducción de contaminación atmosférica (emisión de CO₂, otros gases y material particulado), los cuales son abordados en el siguiente apartado del modelo de economía circular.

Por otro lado, el efluente proveniente del tratamiento de aguas residuales de palma de aceite presenta un potencial significativo de reincorporación dado a las propiedades físico-químicas. El estudio realizado por Lemus (2019) en una planta de beneficio del departamento del Meta, demostró un alto grado de favorabilidad de implementación del efluente como sistema de fertirriego, con circulación del 100% al campo del cultivo.

Con base en el cálculo de proyección de residuos y subproductos de POME del año 2019 y la metodología implementada por Lemus (2019), se estimó un aprovechamiento total con impacto de 23,2ha para satisfacer una lámina de $\pm 2\text{mm ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Dicho valor, es equivalente a $20\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ o $7.300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, sin embargo, Schuchardt et al. (2005), sugieren que valores mayores a $89 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ contaminan el ambiente. No obstante, la investigación realizada por Lemus (2019), no presentó afectaciones en el corto plazo, por tal razón, será conveniente seguir evaluando los parámetros ambientales y productivos en escalas de tiempo de mediano y largo plazo.

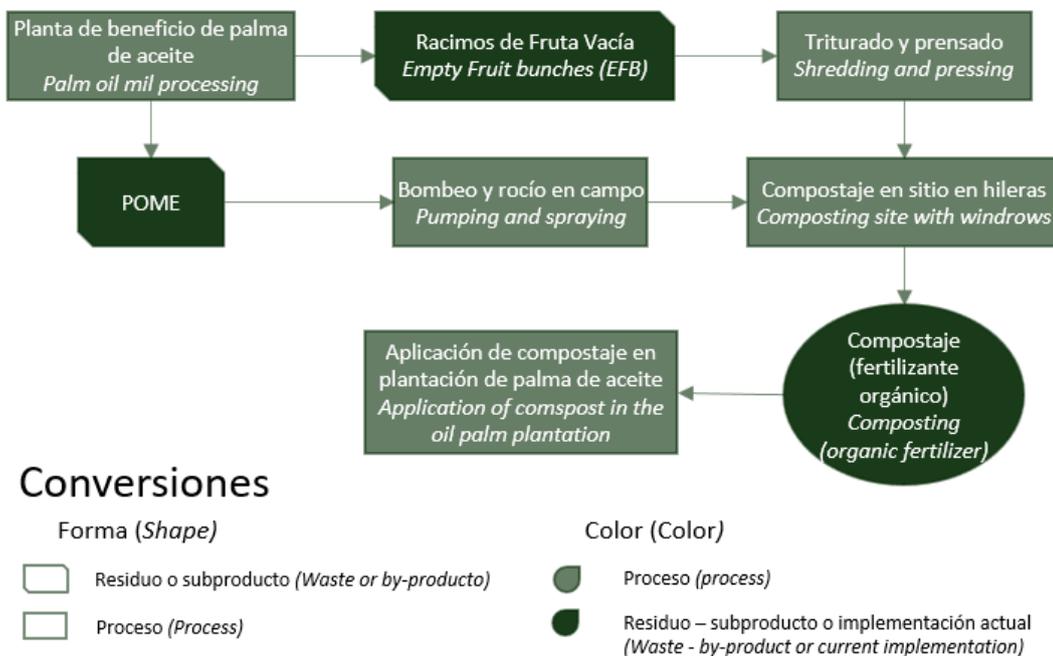
En caso de implementar la alternativa de fertirriego con efluente proveniente del tratamiento de POME, se estimó un costo evitado de \$632.643.491 pesos COP, resultado de evitar el pago de tasa retributiva y fertilizante inorgánico. No obstante, este costo evitado requiere una adaptación de infraestructura y tecnología, lo que conlleva a invertir 17,77 millones ha⁻¹ bajo este enfoque de aprovechamiento.

Por otro parte, en una plantación de palma de aceite, uno de los costos más representativos corresponde al proceso de fertilización, equivalente para el departamento de Casanare al 32-37% del costo total producción RFF. Dicho valor, se encuentra en los rangos de costos para plantaciones tropicales, correspondiente a 27-35% del costo de producción de RFF (Leng, Shukri, Ong, & Zainuriah, 2010). Hecho esta observación sobre los costos de fertilización, se crea una ventana para implementar los EFB y otros subproductos como fuente de nutrientes, que disminuyen la fertilización química, y a la vez, disminuyen los costos asociados a la producción.

El principal método para transformar los EFB de manera individual o colectiva con otros residuos y subproductos, corresponde a compostaje (ver Figura 10). El compostaje implementa hileras bajo sistemas controlados coadyuvado por la transformación anaeróbica y/o aeróbica, para obtener productos sustitutos o complementarios con la finalidad de satisfacer la demanda de nutrientes en plantaciones de palma de aceite u otros cultivos.

Figura 10.

Diagrama de transformación de EFB y POME de palma de aceite bajo el enfoque de fuente de nutrientes (compostaje). Adaptado de Leng et al., (2010).



La transformación directa de EFB en compostaje, requiere hileras de $\pm 3m$, $\pm 1,7m$ y $\pm 50m$, con periodo de giros durante 45 a 60 días, para obtener un contenido de nutrientes de N (1,8%), P₂O₅ (1,2%), K₂O (2,3%) y MgO (0,9%), sin embargo, al combinarlo con efluente tratado de POME (regado con 40 al 60% las hileras de efluente tratado), se obtiene N (2%), P₂O₅ (1,2%), K₂O (5,1%) y MgO (1,2%) (Leng et al., 2010). Lo anterior,

valida una alternativa complementaria que disminuye los riesgos asociados a la implementación del efluente directo a campo, y mejora las condiciones nutricionales del fertilizante orgánico. Tras esta digestión, la implementación de EFB como fuente única de compostaje o EFB en conjunto de POME, genera una reducción del 25-50% del uso de fertilizante inorgánico (Chai et al., 2013; Hau et al., 2020; Leng et al., 2010; Schuchardt et al., 2005).

Los escenarios planteados previamente de compostaje con EFB, obtendrían un rendimiento de 450 – 576 kg de compost posterior de procesar 1 tonelada de RFF (Galindo & Hernán, 2012; Hau et al., 2020; Schuchardt et al., 2005; R. Torres, Acosta, & Chinchilla, 2004). Por lo anterior, el potencial del departamento de Casanare para generar compostaje a partir de EFB correspondería a 15.056 t/año– 19.272 t/año. Dado a que el requerimiento nutricional es variante según el tipo de suelo y edad de la palma, algunos referentes teóricos emplean un valor equivalente de 9,5t de compostaje ha⁻¹. Así que, basado en el potencial del departamento, podría satisfacer la demanda nutricional de 1.584 ha año⁻¹. La alternativa de fertilización con residuos y subproductos mixtos, representa el mayor impacto económico, ya que implementa la mayor fuente de residuos generados posterior a la transformación de una tonelada de RFF. El costo evitado bajo esta alternativa correspondió a \$2.476.364.736 pesos COP, producto de evitar la disposición en campo abierto y utilización de fertilización inorgánica.

Por último, como se resaltó en el presente apartado, la ceniza es producto de la obtención energética en el proceso de combustión de fibra y cascarilla, la cual generaría entre 289,22 – 361,53 t de ceniza apta para la implementación en campo como acondicionador de suelo por su alto contenido potasio y proporciones menores de otros nutrientes. Ramirez et al., sugieren una aplicación de 1 a 2 t ha⁻¹ de ceniza por hectárea cuando las condiciones edafológicas generan un pH menor a 5,5, o dosis para incrementar el déficit de potasio y magnesio por palma de 1 – 3kg o 140kg ± 5kg – 420kg ± 15kg²⁸ ha⁻¹ año⁻¹ (2011, p. 36). Por tal razón, acorde al enfoque podría suplirse 144 – 180 ha año⁻¹ como acondicionador de suelo o 688 – 860 ha año⁻¹ como fuente de nutrientes (principalmente potasio y magnesio) en palmas con déficit nutricional, lo que representaría un costo evitado de \$518.691.187 pesos COP.

Por todo lo expuesto previamente en relación a los costos evitados, se determinó un valor de \$2.714.886.003 pesos COP basado en la proyección de residuos y subproductos de palma de aceite del 2019 (ver Tabla 24 y Figura 11). El valor es producto del aprovechamiento total de las cuatro alternativas potenciales para el departamento de Casanare. Dado que la alternativa 2 y 3 implementan efluente residual, se ajustó el valor de 60% y 40% del efluente total generado para cada alternativa, para evitar solapamiento en los cálculos.

²⁸ Las plantaciones reportaron una densidad de 135 a 145 palmas por hectárea.

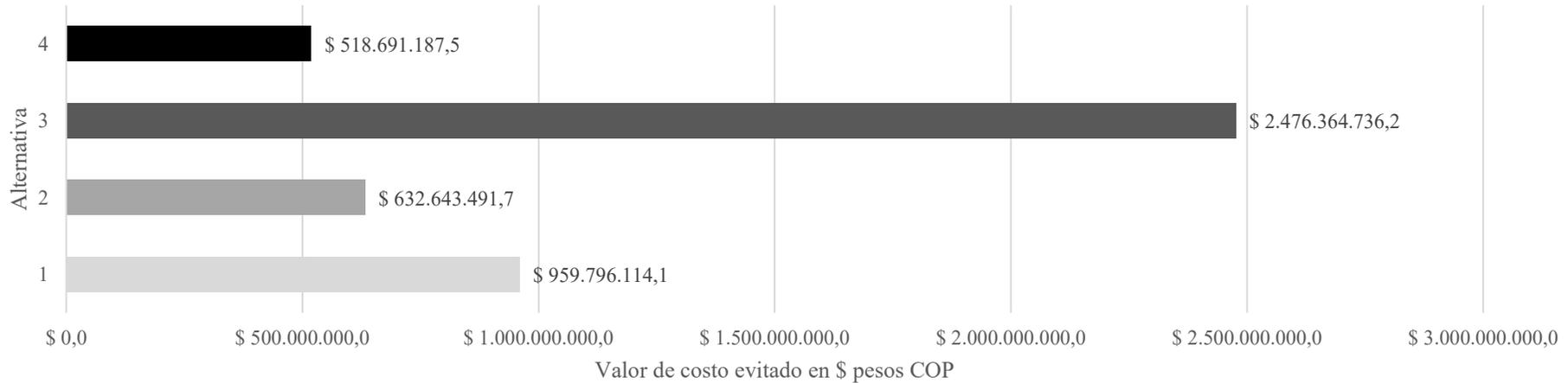
Tabla 24.

Costos evitados por la implementación de enfoques de aprovechamiento en residuos y subproductos de palma de aceite en el departamento de Casanare.

| No | Alternativa | Tipo de residuo o subproducto | Cantidad de residuo o subproducto (t o m³) | Costo por disposición y traslado | Costo asociado a mano de obra | Costo de materia sustituida o reemplazada | Costo total evitado |
|----|-----------------------------------|-------------------------------|--|----------------------------------|-------------------------------|---|---------------------|
| 1 | Obtención energética en calderas | Fibra + Cascari-lla | 7.230,62 t | \$ 83.152.130,0 | \$ 10.845.930,0 | \$ 865.798.054,1 | \$ 959.796.114,1 |
| 2 | Fertirriego con efluente | Efluente (POME) | 13.953,45 m³ | \$ 603.755.037,3 | - | \$ 28.888.454,4 | \$ 632.643.491,7 |
| 3 | Fertilización con residuos mixtos | EFB + POME ± Ceniza | 7.521,72 t + 9.301 m³ | \$ 492.699.108,2 | \$ 11.281.500,0 | \$ 1.972.384.128,0 | \$ 2.476.364.736,2 |
| 4 | Fertilización con ceniza | Ceniza | 325,38 t | \$ 4.067.187,5 | - | \$ 514.624.000,0 | \$ 518.691.187,5 |

Figura 11.

Representación gráfica de los costos evitados por la implementación de alternativas en la valoración de residuos y subproductos de palma de aceite en el departamento de Casanare.



6.3. Modelo de economía circular para la reincorporación de residuos y subproductos del sector palmicultor del departamento de Casanare.

El modelo de economía circular reincorpora a los residuos y subproductos del sector palmicultor bajo indicadores cuantitativos de Flujo de Materiales (*Material Flow*) y Otro ciclo de vida basado (*Other life cycle based*), ajustado a los planteamiento de Moraga et al. (2019), Elia et al. (2016), Rossi et al. (2019), y Salguero-Puerta et al. (2019). El modelo se ajusta a las estrategias de economía circular que corresponde a (i) preservar la función de los productos con características multifuncionales (estrategia 1), (ii) conservar los componentes del producto mediante la reutilización, recuperación y reutilización de piezas (estrategia 5), (iii) conservar la energía incorporada por medio de la recuperación de instalaciones de incineración, y (iv) medir la economía lineal como escenario de referencia para comparar bajo supuestos y/o implementaciones de modelos circulares (estrategia 6).

El presente modelo corresponde a un tipo de medición específica bajo el aspecto *sensu stricto*²⁹, de indicadores de flujo de materiales y Otro ciclo de vida basado, lo que lo convierte en un modelo de parámetros mixtos. Al comparar su rango de implementación con respecto a Moraga et al. (2019), corresponde a indicadores de propiedades físicas de ciclos tecnológicos con énfasis en la reutilización, reciclabilidad y recuperación (alcance 1) e indicadores que valoran efectos (cargas y beneficios) con respecto a preocupaciones ambientales, económicas y/o sociales (alcance 2). El rango de implementación se ajusta a nivel micro, ya que se enfoca en un determinado sector y proceso de transformación de RFF.

6.3.1. Indicador de Reincorporación de Residuos y Subproductos por Flujo de Materiales – RRSMF, del sector palmicultor del departamento de Casanare

En los apartados anteriores, se determinó los coeficientes o constantes de generación de residuos y subproductos de palma de aceite del departamento de Casanare, los cuales permitieron construir la proyección de generación de residuos y subproductos para el periodo 2013 – 2019. Se extrajo de la proyección los resultados del año 2019, que corresponde a la línea base para la formulación del indicador RRSFM.

En la Tabla 25 se proyectan las variables que construyen el indicador RRSFM de economía circular a partir de la línea base previamente indagada en relación a la generación de residuos y subproductos de transformación del RFF en las agroindustrias del departamento de Casanare. El factor corresponde al aporte individual de cada agroindustria con respecto a la producción total. La variable Generación Total (Gt) de residuos y subproductos corresponde al producto del aporte de RFF/h de cada agroindustria por el residuo o subproducto del año 2019. Es relevante mencionar que el 75% del procesamiento de RFF/h o de CPO/h se concentra en cuatro de las ocho agroindustrias o plantas de beneficio reportadas para el departamento de Casanare.

La variable Aprovechamiento Actual (Ac) de residuos y subproductos no es igual en todas las agroindustrias, por tal razón, la tasa de reincorporación varía según cada planta

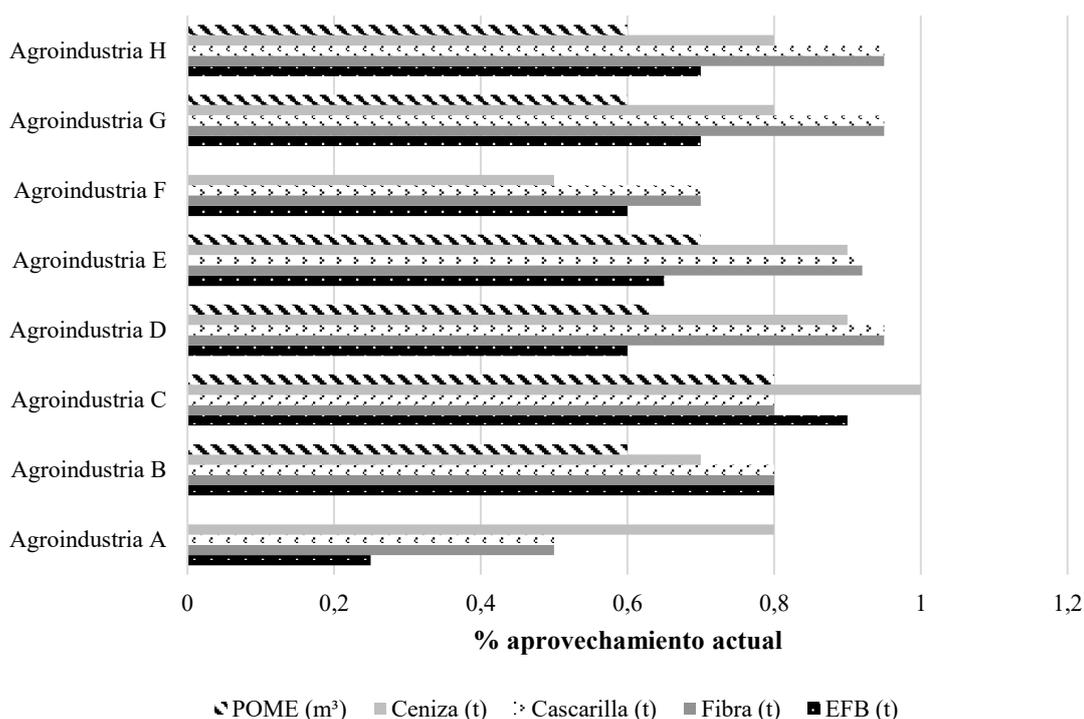
²⁹ Cuantifica aspectos de calidad y cantidad.

de beneficio (ver Figura 12). El residuo y subproducto con mayor promedio de reincorporación como producto de segundo uso corresponde a Fibra (84,12%), Cascarilla (80%) y Ceniza (80%). Sin embargo, el valor restante se relaciona a la baja gestión que emplean dos agroindustrias, ya que emplean solamente el 60% ± 10% de estos residuos en procesos de incineración o compostaje, lo que convierte a estas dos plantas en una fuente significativa de externalidades negativas.

En relación a EFB, presenta un promedio de implementación del 65% en las plantaciones aledañas a las agroindustrias, siendo crítica la agroindustria A, que emplea únicamente el 25% de la generación total, y el restante se dispone a cielo abierto. En relación al POME, solo el 49,12% del efluente total se emplea en segundo uso, por lo cual, lo convierte en el residuo con el menor grado de incorporación. Es relevante destacar su afectación negativa a las dimensiones del desarrollo, ya que el 50,88% (9.199 m³/año), son vertidos a cuerpos superficiales.

Figura 12.

Porcentaje o grado de aprovechamiento actual de residuos y subproductos de palma de aceite en agroindustrias del departamento de Casanare.



Al diagnosticar el estado de aprovechamiento actual por cada agroindustria, se evidencia que la agroindustria A y F ostentan el menor grado de avance, dado a su poco tiempo de formación industrial. Por otro lado, las agroindustrias restantes presentan un mayor avance dado a las políticas de gestión ambiental que actualmente emplean (ver Figura 12). Sin embargo, todas las plantas de beneficio bajo esta caracterización presentan un alto potencial para mejorar su grado de incorporación de residuos y subproductos.

Tabla 25.

Generación total (Gt), aprovechamiento actual (Ac), aprovechamiento potencial (Ap) de residuos y subproductos de palma de aceite del departamento de Casanare por agroindustria o planta de beneficio.

| Agroindustria Cod | Factor | Generación Total (Gt) | | | | | Aprovechamiento Actual (Ac) | | | | |
|-------------------|----------|-----------------------|----------------|----------------|---------------|------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|---------------|------------------------|
| | | EFB (t) | Fibra (t) | Cascarilla (t) | Ceniza (t) | POME (m ³) | EFB (t) | Fibra (t) | Cascarilla (t) | Ceniza (t) | POME (m ³) |
| Agroindustria A | 0,04 | 300,87 | 208,52 | 80,70 | 7,36 | 930,18 | 75,22 | 104,26 | 40,35 | 5,89 | 0,00 |
| Agroindustria B | 0,18 | 1353,91 | 938,34 | 363,17 | 33,13 | 4185,80 | 1083,13 | 750,67 | 290,54 | 23,19 | 2511,48 |
| Agroindustria C | 0,17 | 1278,69 | 886,21 | 343,00 | 31,29 | 3953,26 | 1150,82 | 708,97 | 274,40 | 31,29 | 3162,61 |
| Agroindustria D | 0,08 | 601,74 | 417,04 | 161,41 | 14,72 | 1860,36 | 361,04 | 396,19 | 153,34 | 13,25 | 1172,02 |
| Agroindustria E | 0,1 | 752,17 | 521,30 | 201,76 | 18,40 | 2325,45 | 488,91 | 479,60 | 185,62 | 16,56 | 1627,81 |
| Agroindustria F | 0,03 | 225,65 | 156,39 | 60,53 | 5,52 | 697,63 | 135,39 | 109,47 | 42,37 | 2,76 | 0,00 |
| Agroindustria G | 0,15 | 1128,26 | 781,95 | 302,64 | 27,60 | 3488,17 | 789,78 | 742,85 | 287,51 | 22,08 | 2092,90 |
| Agroindustria H | 0,25 | 1880,43 | 1303,25 | 504,41 | 46,01 | 5813,61 | 1316,30 | 1238,09 | 479,18 | 36,81 | 3488,17 |
| <i>Total</i> | <i>1</i> | <i>7521,73</i> | <i>5213,01</i> | <i>2017,62</i> | <i>184,03</i> | <i>23254,45</i> | <i>5400,60</i> | <i>4530,11</i> | <i>1753,31</i> | <i>151,82</i> | <i>14054,99</i> |

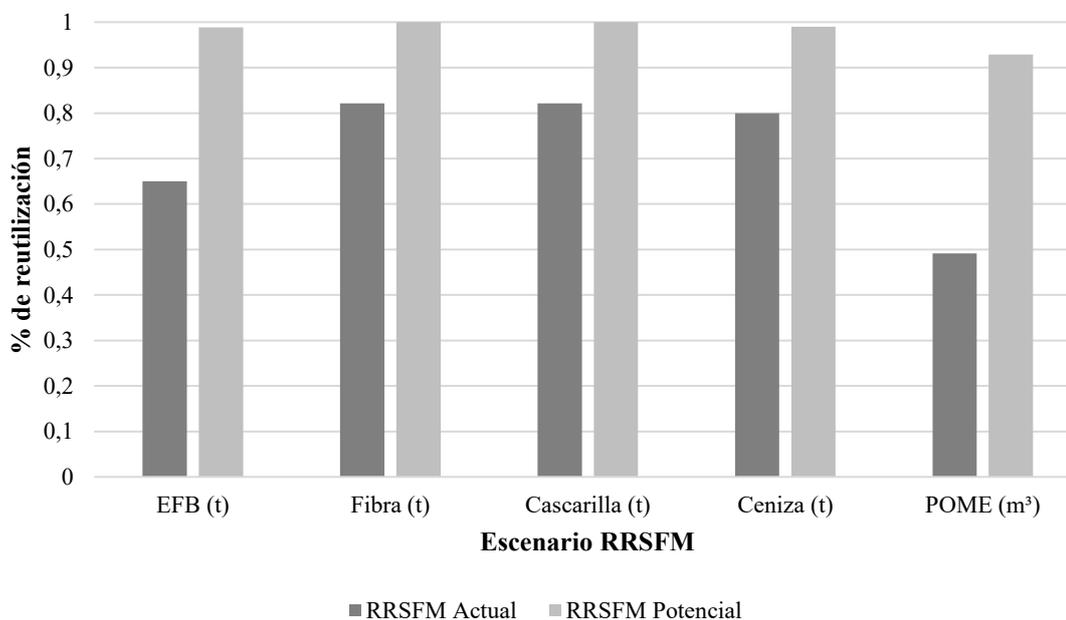
| Agroindustria Cod | Factor | Aprovechamiento Potencial (Ap) | | | | | Indicador RRSFM | Normalización (scaling) |
|-------------------|----------|--------------------------------|---------------|----------------|--------------|------------------------|-----------------|-------------------------|
| | | EFB (t) | Fibra (t) | Cascarilla (t) | Ceniza (t) | POME (m ³) | | |
| Agroindustria A | 0,04 | 210,61 | 104,26 | 40,35 | 0,88 | 697,63 | 4,62 | 0,924 |
| Agroindustria B | 0,18 | 270,78 | 187,67 | 72,63 | 9,94 | 1674,32 | 5 | 1 |
| Agroindustria C | 0,17 | 127,87 | 177,24 | 68,60 | 0,00 | 790,65 | 5 | 1 |
| Agroindustria D | 0,08 | 240,70 | 20,85 | 8,07 | 1,47 | 558,11 | 4,93 | 0,986 |
| Agroindustria E | 0,1 | 263,26 | 41,70 | 16,14 | 1,84 | 697,63 | 5 | 1 |
| Agroindustria F | 0,03 | 81,23 | 46,92 | 18,16 | 2,76 | 523,23 | 4,71 | 0,942 |
| Agroindustria G | 0,15 | 338,48 | 39,10 | 15,13 | 5,52 | 1395,27 | 5 | 1 |
| Agroindustria H | 0,25 | 564,13 | 65,16 | 25,22 | 9,20 | 2325,45 | 5 | 1 |
| <i>Total</i> | <i>1</i> | <i>2097,06</i> | <i>682,90</i> | <i>264,31</i> | <i>31,62</i> | <i>8662,28</i> | <i>-</i> | <i>-</i> |

La última variable que influye en el modelo cuantitativo corresponde al Aprovechamiento Potencial (AP) bajo el escenario de 2026, cuyo valor se estimó según la capacidad instalada y cambio de prospectiva territorial asociado a los informes de sostenibilidad y las conversaciones mantenidas con algunos profesionales ambientales de cada planta de beneficio. Bajo esta variable, los residuo y subproducto con mayor grado potencial de reutilización correspondería a fibra (100%) y cascarilla (100%), dado al uso en calderas que sustituye de manera parcial o total el combustible, y seguido por las cenizas (99%) (implementado de manera conjunta con EFB y efluente residual tratado para el compostaje y acondicionador de suelo).

Se evidencia que la mayor dificultad del residuo a implementar bajo un marco de segundo uso corresponde al POME (92,87%), cuyo efluente presenta composiciones altas de DBO y DQO que requieren de sistemas de tratamiento eficiente para ajustar a los valores máximos permitidos. Sin embargo, bajo la metodología planteada por Lemus (2019), que se acopla a las condiciones nutricionales y meteorológicas del departamento de Casanare (abordado en el subcapítulo 6.2.2. Valoración económica de los enfoques de aprovechamiento de residuos y subproductos bajo el método de costos evitados.), se podría realizar el fertirriego a un costo relativamente bajo cuya inversión se recobra por la ausencia del pago de tasa retributiva y fertilización.

Figura 13.

Comparación del modelo de economía circular bajo el escenario actual y potencial de reincorporación de residuos y subproductos de palma de aceite del departamento de Casanare.



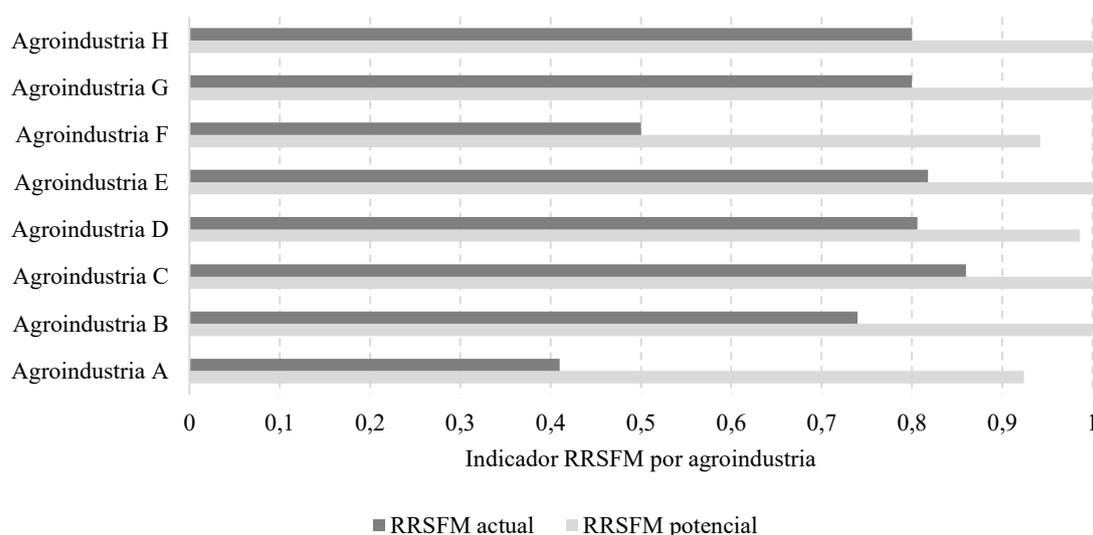
Al procesar el modelo bajo las variables cuantitativas (ver Tabla 25), se identificó dos momentos del modelo RRSFM (ver Figura 13). El primer momento corresponde al escenario actual de las agroindustrias, cuyo aprovechamiento no es del 100% en ningún tipo de residuo o subproducto. Este momento genera una disposición en vertedero o cielo

abierto de 2.121 t de EFB, 682 t de fibra, 264 t de cascarilla y 32 t de ceniza, y vertimiento de 9.199 m³ de efluente residual.

El segundo momento corresponde a un escenario optimista donde las agroindustrias según su prospectiva ambiental del año 2026 aumentarían la capacidad de recirculación bajo la hipótesis de mejorar las condiciones físicas para adoptar un mayor grado de segundo uso de residuos y subproductos. A partir de este escenario, la reutilización de EFB y ceniza correspondería al 99%, fibra y cascarilla al 100%, y POME al 92%, lo que equivale a un desperdicio del 1,47% del total de generación de residuos y subproductos, principalmente aportado por la baja gestión en incorporación de POME. No obstante, bajo un escenario más optimista la incorporación podría ser del 100%, ya que el volumen de POME no incorporado correspondería a 537m³/año, que podría satisfacer la demanda de hídrica y fertilizante de 0,53 ha con una lámina de $\pm 2\text{mm ha}^{-1}\text{ día}^{-1}$.

Figura 14.

Indicador RRSFM actual y potencial de las agroindustrias del departamento de Casanare bajo el enfoque de Flujos de Materiales.



Por otro lado, se evidenció que en la actualidad ninguna agroindustria del departamento de Casanare presenta un indicador superior del 86%. De hecho, cinco se agrupan en valores en el rango 80-86%, una del 51-80% y dos del 0-50%. Esto se correlaciona con el tiempo de formación industrial en el departamento, donde las dos agroindustrias con menor puntaje corresponden a nuevas plantas de beneficio de los últimos años (ver Figura 14). Adicional, es pertinente mencionar que aquellas agroindustrias con valores mayores al 80% presentan lineamientos de la norma RSPO (Roundtable on Sustainable Palm Oil) del 2018.

En relación al momento potencial, se evidenció un incremento del 26% del indicador RRSFM (ver Figura 14), producto del aumento de incorporación de residuos y subproductos. Lo anterior se traduce en una disminución de externalidades negativas, mejora de la gestión ambiental y disminución de los impactos negativos a las dimensiones del desarrollo sostenible.

6.3.2. Indicador Huella de Carbono de la Reincorporación de Residuos y Subproductos – HCRRS, del sector palmicultor del departamento de Casanare

Ahora, el modelo estableció un segundo indicador relacionado con la incorporación de Flujos de Materiales bajo un enfoque de Otro ciclo de vida basado (*Other life cycle based*), denominado Huella de Carbono de la Reincorporación de Residuos y Subproductos - HCRRS, que corresponde a una medición complementaria como lo sugiere Elia et al. (2016), y Moraga et al. (2019). Lo anterior se basa en la cuantificación de CO₂-eq/t RFF * año 2019, emitida por dar una disposición a los residuos y subproductos que emiten GEI (ver Tabla 26).

Tabla 26.

Factores de emisión de residuos y subproductos de palma de aceite según el tipo de alternativo o disposición.

| Residuo y subproducto | kg CO ₂ eq/t RFF ^a | kgCO ₂ /kg EFB | kgCO ₂ /kg cascarilla + fibra | kgCO ₂ /m ³ POME | Alternativa o disposición |
|-----------------------|--|---------------------------|--|--|-------------------------------------|
| EFB | 230 | 1,026 | - | - | Cielo abierto |
| EFB | 1083,86 | 4,838 | - | - | Incinerado (no energía en calderas) |
| POME | 140 | - | - | 0,2014 | Cielo abierto |
| EFB + POME | 0,0231 | 2,51E-05 | - | - | Biochar |
| EFB + POME | 110 | 0,119 | - | - | Compostaje |
| Fibra + Cascarilla | 941,94 | - | 4,358 | - | Incineración (energía en caldera) |

^a Adaptado de Moreno et al. (2018), Krishnan et al. (2017), Andarini et al. (2017), Subramaniam et al. (2020), Rivera-Méndez et al. (2017), y Stichnothe & Schuchard (2011).

El momento uno (M1) del indicador RRSFM (ver Figura 15), representa el escenario negativo de reutilización de salidas del proceso, bajo las tendencias actuales correspondientes a: (i) EFB dispuesto en la totalidad al cielo abierto; (ii) fibra y cascarilla incinerado en la totalidad; y (iii) POME colocado en lagunas de sedimentación a cielo abierto. El escenario mencionado emitiría 43.925 t CO₂eq, donde el mayor aporte corresponde a la incineración de la fibra y cascarilla.

Basado en el M1, se extrae segundo momento (M2) con un cambio en la fuente de combustible, en el cual se reemplaza la incineración de fibra y cascarilla, por una fuente no renovable como el carbono. Bajo dicho supuesto, la emisión equivalente correspondería a 104.857 t CO₂eq.

El tercer momento (M3), corresponde al escenario actual del indicador RRSFM, que corresponde a: (i) aprovechamiento del 65% del EFB en compostaje y el restante a cielo abierto; (ii) implementación de fibra y cascarilla del 82,14% en calderas y el restante a cielo abierto; y (iii) reúso del 60,4% de efluente para compostaje y/o fuente de nutrientes y el restante vertido. Lo anterior emite 33.860 t CO₂eq, donde el 77,3% es producto de la incineración de fibra y cascarilla para calderas. No obstante, este valor es susceptible de ser disminuido con prácticas de economía circular.

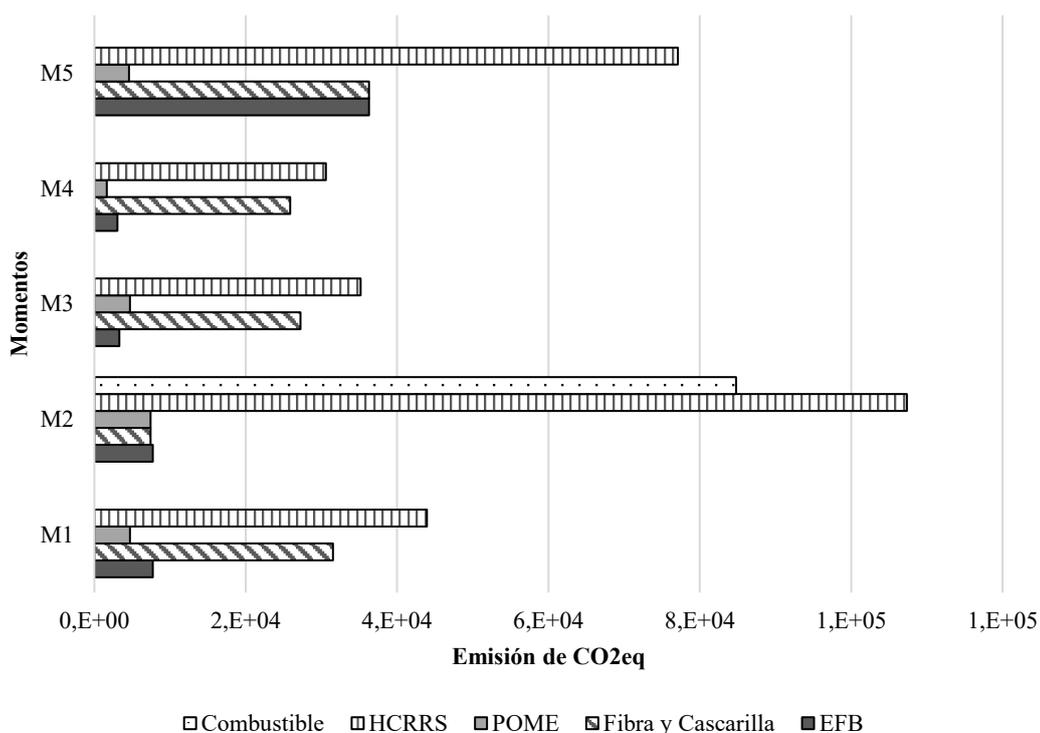
Por otro lado, el cuarto momento (M4) corresponde al escenario RRSFM potencial, cuyo supuesto establece (i) aprovechamiento total de EFB como compostaje, combinado

en proporción 2:1 POME y EFB; (ii) incorporación del 82% de fibra y cascarilla como combustible, y el restante como biochar; y (iii) aprovechamiento del 64,47% de POME en compostaje, y el restante usado como fertirriego. Acorde a las condiciones mencionadas, la emisión correspondería a 30.573 t CO_{2eq}.

Por último, el quinto momento (M5) representa el escenario de no incorporación de residuos y subproductos, los cuales son incinerados en su totalidad. Este supuesto generaría 77.107 t CO_{2eq}.

Figura 15.

Estimación del indicador HCRRS – emisión CO_{2eq} de los momentos diagnosticados por el indicador RRSFM.



Al comparar el momento potencial del RRSFM (M4) con los otros escenarios, se evidencia que existe una reducción del 30,39% con respecto a M1; 71,52% en relación a M2; 13,11% con respecto a M3; y 60,34% en relación a M5. Es prudente resaltar que, la reducción sería mayor si la capacidad tecnológica y proyección empresarial se inclinaran a la incorporación de biodigestores y biochar.

Por último, basado en la ley 1819 de 2016, que estableció el Impuesto Nacional al Carbono (INAC), el costo evitado por implementar practicas circulares (M4) en relación al momento actual RRSFM, correspondería a \$ 75.757.208,8 pesos COP, lo que equivalente a otro costo evitado bajo el modelo de economía circular analizado.

7. CONCLUSIONES

Los procesos fuentes de generación de residuos y subproductos de aceite de palma corresponde a esterilización, extracción, digestión o prensado, clarificación, centrifugado, desfibración y trituración. Dichos procesos generan una variedad de residuos y subproductos en estado sólido y líquido, cuyo porcentaje varían según la tecnología implementada. Al contrastar con la revisión literaria, se evidenció valores por debajo del referente teórico en EFB ($22,48\% \pm 0,8$), fibra ($15,58\% \pm 0,49$), cascarilla ($6,03\% \pm 0,66$) y ceniza ($0,55\% \pm 1,67$), y un valor encima en POME ($69,5\% \pm 7,56$) en relación a la tasa de producción de residuos y subproductos en la transformación de la tonelada de RFF o tonelada de CPO.

Las características físicas y químicas según el residuo y subproducto permitieron identificar el potencial y restricción de utilidad según su contenido de nutrientes, poder calorífico, humedad, sustancias disueltas, entre otras. Cabe destacar que, según la revisión literaria, los residuos y subproductos presentan una diversidad de aplicaciones dado a su variedad de composición física y química, tales como fuente de nutrientes, actividad enzimática, bioenergía, biorremediación y otros usos.

Aunque el área de palma de aceite del departamento de Casanare presenta fluctuaciones anuales dado a la renovación de hectáreas, se evidenció una correlación positiva entre el área de cosecha y la producción de toneladas de CPO año⁻¹, sin embargo, presenta una correlación negativa con el rendimiento de CPO ha⁻¹, lo que demostró que el área de cosecha no tiene relación directa con la tasa de producción de residuos y subproductos, sino que depende de la tecnología implementada. Asimismo, se comprobó la correlación casi lineal entre RFF procesado y tonelada de CPO año⁻¹, lo que validó la proyección de residuos y subproductos con la relación t RFF/ t CPO ($5.10 \pm 0,08$).

A partir de lo anterior, se construyó las constantes o coeficientes de producción de residuos y subproductos de palma de aceite a partir del análisis de información de seis agroindustrias del departamento de Casanare, correspondiente a RFF/CPO ($5.10 \pm 0,08$), EBF ($0.2349 \pm 0,007$), fibra ($0.1602 \pm 0,004$), cascarilla ($0.061 \pm 0,003$), ceniza ($0.0056 \pm 0,0002$) y POME ($0.677 \pm 0,036$). Dichos coeficientes fueron corroborados a partir de la Prueba de correlación bilateral de Pearson, lo que demostró correlación casi lineal entre RFF procesado y los residuos sólidos orgánicos, sin embargo, no demostró una correlación positiva entre RFF y POME, lo que demuestra que la cantidad de efluente varía independiente de la cantidad de RFF procesado.

La valoración apoyada en la revisión sistemática permitió identificar las tendencias geográficas en relación al aprovechamiento y enfoque tecnológico de los residuos y subproductos de palma de aceite. Se demostró que no hay correlación entre la tendencia geográfica y el enfoque de aprovechamiento, y la tendencia geográfica y enfoque tecnológico, ya que existe variedad de alternativas de valoración según el tipo de residuo y/o subproducto. No obstante, se demostró correlación entre los enfoques de aprovechamiento y el tipo de residuo y/o subproducto de RFF, lo que ratificó la tendencia de transformación según sus composición física y química.

El principal enfoque de valoración de residuos y subproductos de palma de aceite corresponde a biocombustibles, seguido por actividad enzimática, fuente de nutrientes, construcción, y otros intereses, cuyo promedio en la revisión sistemática correspondió al

39%, 35%, 15%, 7% y 4% respectivamente. Cada enfoque presenta fortalezas y debilidades que deben ser evaluados según la capacidad instalada y tipo de residuo a transformar.

A partir de los enfoques de aprovechamiento se estimó el costo asociado a la valoración de residuos y subproductos de palma de aceite por medio de la metodología de costos evitados, la cual, reveló un valor evitado de \$2.714.886.003 pesos COP³⁰, producto del aprovechamiento total de fibra y cascarilla como fuente de energía de calderas (\$959.796.114,1), fertirriego con el 60% del volumen total de efluente proveniente de POME (\$632.643.491,7), fertilización con residuos mixtos, exactamente EFB, POME (40% del efluente) y ceniza (\$ 2.476.364.736,2), y fertilización con ceniza (\$ 518.691.187,5). Lo expuesto demostró un esquema de reutilización y reúso de la totalidad de residuos bajo el enfoque de la economía circular, que posterior fue cuantificado con el indicador RRSFM (Reincorporación de Residuos y Subproductos por Flujo de Materiales) y HCRRS (Huella de Carbono de Reincorporación de Residuos y Subproductos).

Por último, se construyó un modelo de EC con indicadores mixtos bajo el aspecto *sensu stricto* que satisface cuatro estrategias y dos alcances de la economía circular. El modelo ostenta enfoque de Flujo de Materiales (*Material Flow*) y Otro ciclo de vida basado (*Other life cycle based*), que permite cuantificar el grado de reincorporación y reutilización de residuos y subproductos del proceso de transformación de RFF del departamento de Casanare por medio del indicador RRSFM, y la huella de carbono asociada al indicador de reincorporación a través del indicador HCRRS.

El indicador RRSFM estimó un grado de mejora del 26% de reincorporación al 2026 en comparación con la línea base del 2019, producto de la prospectiva ambiental de las agroindustrias del departamento de Casanare. Adicional, el indicador reveló que cinco agroindustrias presentan en la actualidad un rango mayor del 80%, una entre el 51-80%, y dos entre el 0-50% de reincorporación de residuos y subproductos del proceso de RFF. Paralelamente se cuantificó la emisión de CO_{2eq} en cuatro momentos de aprovechamiento de residuos y subproductos bajo el enfoque de segundo uso del RRSFM, por medio del indicador HCRRS. El indicador reveló una reducción del 30,39%, 71,52%, 13,11% y 60,34% de las emisiones de CO_{2eq} en comparación con el momento potencial del indicador RRSFM.

El modelo de economía circular de residuos y subproductos del proceso de transformación de RFF de palma de aceite demostró una disminución de externalidades negativas, mejora de la gestión ambiental y disminución de los impactos negativos a las dimensiones del desarrollo sostenible.

³⁰ COP del 2019.

8. RECOMENDACIONES

Frente al desarrollo de la presente investigación se definen las siguientes recomendaciones:

- Para un análisis de los coeficientes de producción de residuos y subproductos deben contemplar diversas variables, procesos y series de tiempo relacionada con RFF, con el propósito de diagnosticar la trazabilidad y generar los coeficientes que permitan proyectar la generación de residuos y subproductos según la escala de tiempo o flujo de masa a analizar.
- Para determinar los enfoques óptimos de aprovechamiento de residuos y subproductos de palma de aceite deben contar con información de características físicas y químicas de las salidas, con el fin de proponer la alternativa más adecuada según sea la capacidad de poder calorífico, humedad, nutricional, entre otros, de los residuos y subproductos.
- Para estimar los costos evitados por las diferentes alternativas de aprovechamiento es indispensable contar con información directa e indirecta de la disposición o tratamiento de cada residuo.
- Para evaluar el indicador RRSFM (Reincorporación de Residuos y Subproductos por Flujo de Materiales) es importante contar con información de la tasa total de generación, tasa de aprovechamiento actual y tasa de aprovechamiento potencial según la prospectiva ambiental de los residuos y subproducto del proceso de RFF. Adicional, es importante estandarizar las medidas según la conversión o unidades requeridas para procesar en la formula.
- Para un análisis complementario del indicador HCRRS (Huella de Carbono de Reincorporación de Residuos y Subproductos), se debe cuantificar en la emisión de CO_{2eq} por cada residuo y subproducto basado en los lineamientos de la IPCC y/o RSPO bajo el contexto de las agroindustrias.

REFERENCIAS

- Abas, R., Kamaruddin, M., Nordin, A., & Simeh, M. (2011). A study on the Malaysian Oil Palm biomass sector - Supply and perception of palm oil millers. *Oil Palm Industry Economic Journal*, 11(1), 28-41.
- Abdullah, N., & Sulaiman, F. (2013). The Oil Palm Wastes in Malaysia. En M. Darko (Ed.), *Biomass now - Sustainable Growth and Use* (pp. 75-99). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/55302>
- Abdullah, N., Sulaiman, F., & Gerhauser, H. (2011). Characterisation of Oil Palm Empty Fruit Bunches for Fuel Application. *Journal of Physical Science*, 22(1), 1-24.
- Abdurahman, N. ., Rosli, Y. ., & Azhari, N. . (2011). Development of a membrane anaerobic system (MAS) for palm oil mill effluent (POME) treatment. *Desalination*, 226(1-3), 208-212. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.08.028>
- Agudelo, B. S., Rodriguez, D. F., & Rodriguez, A. T. (2016). *Elaboración de bloques estructurales en mortero adicionado con ceniza de cuesco de la palma de aceite africana, para la ciudad de Villavicencio (Meta)*. Universidad Cooperativa de Colombia.
- Aguilar, H., & Álvarez, R. (2002). Valoración económica de bienes ambientales. *Semestre económico*, 5(9), 1-12.
- Aguilera, A. (2017). El costo-beneficio como herramienta de decisión en la inversión en actividades científicas. *Cofin Habana*, 11(2), 322-343.
- Ahmad, A. F., Abbas, Z., Obaiys, S. J., & Zainuddin, M. F. (2018). Effect of Untreated Fiber Loading on the Thermal, Mechanical, Dielectric, and Microwave Absorption Properties of Polycaprolactone Reinforced with Oil Palm Empty Fruit Bunch Biocomposites. *Polymer Composites*, 39(S3), 1778-1787. <https://doi.org/10.1002/pc.24792>
- Ahmad, A. L., Ismail, S., & Bhatia, S. (2003). Water Recycling from Palm Oil Mill Effluent (POME) Using Membrane Technology. *Desalination*, 157(1-3), 87-95.
- Albán, A., & Rosero, J. R. (2016). Colonialidad de la naturaleza: ¿imposición tecnológica y usurpación epistémica? Interculturalidad, desarrollo y re-existencia. *Nómadas*, (45), 27-41.
- Alhawari, O., Awan, U., Bhutta, M. K. S., & Ülkü, M. A. (2021). Insights from Circular Economy Literature: A Review of Extant Definitions and Unravelling Paths to Future Research. *Sustainability*, 13(2), 859. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su13020859>
- Ali, A., Othman, M., Shirai, Y., & Hassan, M. (2015). Sustainable and integrated palm oil biorefinery concept with value-addition of biomass and zero emission system. *Journal of Cleaner Production*, 91, 96-99. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.030>
- Anaya, R., & Molina, D. (2018). Evaluación económica y financiera de las alternativas de uso de los residuos de la materia prima de una planta industrial de extracción de aceite de palma. *Dictamen Libre*, (22), 77-89.

<https://doi.org/https://doi.org/10.18041/2619-4244/dl.22.5029>

- Andarani, P., Nugraha, W. D., & Widdya. (2017). Energy balances and greenhouse gas emissions of crude palm oil production system in Indonesia (Case study: Mill P, PT X, Sumatera Island). *International Conference on Chemistry, Chemical Process and Engineering (IC3PE)*, 1823(1), 020064. <https://doi.org/10.1063/1.4978137>
- Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics on the circular economy. *Sustainability science*, 2(1), 133-140. <https://doi.org/10.1007/s11625-006-0013-6>
- Aprianti, N., Faizal, M., Said, M., & Nasir, S. (2020). Valorization of Palm Empty Fruit Bunch Waste for Syngas Production Through Gasification. *Journal of Ecological Engineering*, 21(7), 17-26. <https://doi.org/10.12911/22998993/125461>
- Aragón, J. (2012). *Políticas económicas ortodoxas y heterodoxas: ¿cuál elegir?*
- Arakaki, C., & Rikap, C. (2015). La ortodoxia y la heterodoxia en la ciencia económica, una falsa discusión. En V. Wainer (Ed.), *La enseñanza de la economía en el marco de la crisis del pensamiento económico* (pp. 75-93).
- Awuku, E., & Asamoah, Y. (2020). Not really a waste! Exploring sustainable ways of managing waste from post-harvest processing of oil palm by households in Twifo Wawase community of the Central Region of Ghana. *IJARIE*, 6(6), 2201-2209.
- Azqueta, D. (1994). Valorización económica del Medio Ambiente: Algunas consideraciones previas. En *Economía y Medio Ambiente* (p. 13).
- Baharuddin, A. ., Wakisaka, M., Shirai, Y., Abd-Aziz, S., Abdul Rahman, N., & Hassan, M. . (2009). Co-Composting of Empty Fruit Bunches and Partially Treated Palm Oil Mill Effluents in Pilot Scale. *International Journal of Agricultural Research*, 4(2), 69-78. <https://doi.org/10.3923/ijar.2009.69.78>
- Barcelos, S. M. B. D., Salvador, R., Barros, M. V., de Francisco, A. C., & Guedes, G. (2021). Circularity of Brazilian silk: Promoting a circular bioeconomy in the production of silk cocoons. *Journal of Environmental Management*, 296, 113373. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113373>
- Barros, M. V., Salvador, R., de Francisco, A. C., & Piekarski, C. M. (2020). Mapping of research lines on circular economy practices in agriculture: From waste to energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 109958. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109958>
- Bernal, F. N. (2001). *El cultivo de la palma de aceite y su beneficio: Guía general para el nuevo palmicultor* (Fedepalma, Ed.).
- Blanco, A., Delgado, M., Martín, J. M., & Polo, M. P. (2009). AIEIA: Software for fuzzy environmental impact assessment. *Expert Systems with Applications*, 36(5), 9135-9149. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.12.055>
- Borrero, C. (2019). Cultivo de la Palma de Aceite (Parte I). Recuperado 3 de noviembre de 2019, de Infoagro website: https://www.infoagro.com/documentos/cultivo_palma_aceite__parte_i_.asp
- Bukhari, N. ., Loh, S. ., Nasrin, A. ., & Jahim, J. . (2018). Enzymatic Hydrolysate of Palm Oil Mill Effluent as Potential Substrate for Biofloculant BM-8 Production. *Waste*

and Biomass Valorization, 11(1), 17-29. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0421-8>

- Burimsitthigul, T., Tirapanichayakul, C., Chantrangsuan, P., & Prasassarakich, P. (2019). Two-Stage Liquefaction of Oil Palm Shell in Alkali Supercritical Ethanol–Water for Enhanced Bio-Oil Production. *Waste and Biomass Valorization*, 11(6), 2745-2754. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00614-z>
- Cadavid, S., & Bolaños, V. (2015). Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. *Energética*, (46), 23-28. Recuperado de www.revistas.unal.edu.co/energetica
- Callejo, J., Parra, T., & Manrique, T. (2015). *Evaluación de la producción de los subproductos agroindustriales en Andalucía*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35044.94089>
- Camana, D., Manzardo, A., Toniolo, S., Gallo, F., & Scipioni, A. (2021). Assessing environmental sustainability of local waste management policies in Italy from a circular economy perspective. An overview of existing tools. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 613-629. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.029>
- Cardenas, P., Rodriguez, J. ., & Castillo, A. (2020). Alternatives utilization of waste: technical and environmental considerations in the agribusiness sector. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 10(3), 15659-15676.
- Castillo, E., & Martínez, A. (2015). Tecnologías para Biodiesel. En J. Rincón, E. Martínez, & E. Silva (Eds.), *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad* (p. 332).
- Cenipalma. (2005). *Statistical data collected for benchmarking in oilmills by Cenipalma*. Recuperado de ww.cenipalma.org
- Chai, E. W., H'ng, P. S., Peng, S. H., Wan-Azha, W. M., Chin, K. L., Chow, M. J., & Wong, W. Z. (2013). Compost feedstock characteristics and ratio modelling for organic waste materials co-composting in Malaysia. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 34(20), 2859-2866. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.795988>
- Chandrasekaran, M. (2012). *Valorization of Food Processing By-Products* (Ilustrada; Prensa CRS, Ed.).
- Chávez, Á., & Rodríguez, A. (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. *Revista Academia & Virtualidad*, 9(2), 90-107. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18359/ravi.2004>
- Cheah, W. ., Show, P. ., Juan, J. ., Chang, J. ., & Ling, T. . (2018). Waste to energy: the effects of Pseudomonas sp. on Chlorella sorokiniana biomass and lipid productions in palm oil mill effluent. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, 2037-2045. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1505-7>
- Chen, J. Z. (2009). Material Flow and Circular Economy. *Systems Research and Behavioral Science*, 26(2), 269-278. <https://doi.org/10.1002/sres.968>
- Chin, K. L., Nurliyana, M. Y., H'ng, P. S., Lee, C. L., Go, W. Z., Khoo, P. S., ... Ashikin,

- S. N. (2019). Effects of Bacterial Bio-augmentation on the Methane Potential from Facultative Digestion of Palm Oil Mill Effluent and Empty Fruit Bunch. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 3407-3418. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00680-3>
- Choorit, W. ., & Wisarnwan, P. (2007). Effect of Temperature on the Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent. *Electronic Journal of Biotechnology*, 10(3), 376-386. <https://doi.org/10.2225 / vol10-issue3-fulltext-7>
- COM. (2007). *Comunicación interpretativa sobre residuos y subproductos*. Recuperado de <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/?fuseaction=list&coteId=1&year=2007&number=59&version=ALL&language=es>
- Cortés, C., Cayón, D., Aguirre, V., & Chávez, B. (2006). Respuestas de palmas de vivero a la aplicación de residuos de la planta extractora. *Revista Palmas*, 27(3), 23-32.
- Costanza, R., Cumberland, J., Daly, H., Goodland, R., Norgaard, R., Kubiszewki, I., & Franco, C. (2014). The historical development of economics and ecology. En *An introduction to Ecological Economics* (CRC Press, p. 466).
- Cristeche, E., & Penna, J. A. (2008). *Métodos de valoración económica de los servicios ambientales*.
- Cruz, B. (2014). Las relaciones entre sociedad, espacio y medio ambiente en las distintas conceptualizaciones de la ciudad. *Estudios demográficos y urbanos*, 29(1), 183-205. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-72102014000100183
- Cury, K., Aguas, Y., Martínez, A., Olivero, R., & Chams, L. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista colombiana de ciencia animal-RECIA*, 9(S1), 122-132. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.530>
- Dalton, G. (1961). Economic theory and primitive society. *American anthropologist*, 63(1), 1-25.
- Daly, H. (1998). *Introducción a la Economía en Estado Estacionario*. México.
- DANE. (2021). *Economía circular. Tercer reporte 2021*. Bogotá.
- Dias, Y., Souza, E., da Costa, H. S., Azevedo, L. C., Penido, E., do Amarante, C., ... Rodrigues, A. (2019). Biochar produced from Amazonian agro-industrial wastes: properties and adsorbent potential of Cd²⁺ and Cu²⁺. *Biochar*, 1(4), 389-400. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42773-019-00031-4>
- Dislich, C., Keyel, A., Salecker, J., Kisel, Y., Mayer, K., Auliya, M., ... Wiegand, K. (2017). A review of the ecosystem functions in oil palm plantations, using forests as a reference system. *Biological Reviews*, 92(3), 1539-1569. <https://doi.org/doi.org/10.1111/brv.12295>
- Elia, V., Grazia, M., & Tornese, F. (2016). Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2741-2751.
- Elias, M. A., Hadibarata, T., & Sathishkumar, P. (2021). Modified oil palm industry solid

- waste as a potential adsorbent for lead removal. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 3, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.10.003>
- Ellen MacArthur Foundation. (2015a). *Circularity indicators - An approach to measuring circularity (Methodology)*.
- Ellen MacArthur Foundation. (2015b). *Hacia una economía circular: motivos económicos para una transición acelerada*.
- Embrandiri, A., Ibrahim, M., & Singh, R. (2013). Palm Oil Mill Wastes Utilization; Sustainability in the Malaysian Context. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 24(3), 389-393.
- Escobar, A. (2007). La economía y el espacio del desarrollo: Fábulas de crecimiento y capital. En *La invención del Tercer Mundo. Construcción y deconstrucción del desarrollo* (1st ed., pp. 101-176). Caracas: Fundación Editorial el perro y la rana.
- Espaliat, M. (2017). *Introducción a los principios de la Economía Circular y de la Sostenibilidad*.
- European Palm Oil Alliance. (2016). *Producción del aceite de palma*. Recuperado de <https://www.palmoilandfood.eu/es/producción-del-aceite-de-palma>
- Extractorora el Roble S.A.S. (2016). *Estudio de Impacto Ambiental de las actividades de extracción de aceite de palma de las organización extractora el Roble S.A.S.*
- Fatriasari, W., Anita, S., & Risanto, L. (2016). Microwave Assisted Acid Pretreatment of Oil Palm Empty Fruit Bunches (EFB) to Enhance Its Fermentable Sugar Production. *Waste and Biomass Valorization*, 8, 379-391. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9573-6>
- Fedepalma. (1994). *Anuario Estadístico. El Cultivo de la Palma de Aceite en Colombia y el Mundo: Estadísticas 1989-1993*. Recuperado de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/948>
- Fedepalma. (2009). *Anuario Estadístico. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo (2004-2008)*. Recuperado de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/933>
- Fedepalma. (2011). *Boletín económico del sector palmero colombiano en 2010*.
- Fedepalma. (2015). *Anuario Estadístico. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo (2010-2014)*. Recuperado de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/article/view/11721/11712>
- Fedepalma. (2018a). *Anuario Estadístico. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo (2013-2017)*. Recuperado de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/1408>
- Fedepalma. (2018b). *Anuario Estadístico. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia (2013 - 2017)*. Bogotá.
- Fedepalma. (2018c). *El palmicultor. Edición Febrero 2018 No. 552*. Recuperado de www.fedepalma.org
- Fedepalma. (2019a). *Anuario Estadístico. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia (2014-2018)*. Recuperado de

- <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/1452>
- Fedepalma. (2019b). *La palma de aceite en el departamento de Casanare 2018*. Recuperado de <http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/infografias/infografia-palmadeaceite-casanare-2019.pdf>
- Fedepalma. (2020a). *Anuario estadístico 2020. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia (2015 -2019)*. Recuperado de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/1505>
- Fedepalma. (2020b). *La palma de aceite en el departamento de Casanare 2019*. Recuperado de <https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Infografía Casanare 2020.pdf>
- Fedepalma. (2021). *Balance 2020 y perspectivas 2021 de la agroindustria de la palma de aceite*. Bogotá.
- Fernandez-Mendoza, J., Velasco-Muñoz, J., Aznar-Sánchez, J., & Gallego-Schmid, A. (2021). Circular economy implementation in the agricultural sector: Definition, strategies and indicators. *Resources, Conservation and Recycling, 170*, 105618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105618>
- Ferronato, N., Rada, E., Gorrity, M., Cioca, L., Ragazzi, M., & Torretta, V. (2019). Introduction of the circular economy within developing regions: A comparative analysis of advantages and opportunities for waste valorization. *Journal of Environmental Management, 230*, 366-378. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.095>
- Fokam, C. ., Toumi, E., Kenmeugne, B., Wiriyikfu, N. ., & Mevaa, L. (2021). Experimental study of the addition of oil palm mesocarp fiber on the physical and mechanical properties of fiber cement mortar composites. *SN Applied Sciences, 3*(1), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04037-7>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2009). Value-added utilization of oil palm ash: A superior recycling of the industrial agricultural waste. *Journal of Hazardous Materials, 172*, 523-531. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.091>
- Foong, S. Y., Liew, R. K., Yang, Y., Cheng, Y. W., Yuh, P. N., Wan, W. A., ... Shiung, S. (2020). Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions. *Chemical Engineering Journal, 398*, 124401. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124401>
- Franklin-Johnson, E., Figge, F., & Canning, L. (2016). Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance. *Journal of Cleaner Production, 133*, 589-598. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.05.023>
- Fuentes, L., & Serrano, A. (2006). *Valoración económica de los impactos socioeconómicos y ambientales ocasionados por el manejo de los residuos sólidos urbanos en el relleno sanitario “La Esmeralda” del municipio de Barrancabermeja: aplicación del método multicriterio*. Universidad Industrial de Santander.
- Gabarda, J. (2019). Una visión estratégica y holística de la economía circular en las ciudades. *Actas Icono, 14*(1), 374-395.
- Galindo, T., & Hernán, R. (2012). *Compostaje de subproductos de la agroindustria de*

palma de aceite en Colombia: estado del arte y perspectivas de investigación.
Recuperado de www.cenipalma.org

- Gallego, L. J., Cardona, S., Martínez, E., & Rios, L. A. (2020). Valorization of Palm-Oil Residues: Integrated Production of a Good Quality Bio-coal and Electricity via Torrefaction. *Waste and Biomass Valorization*, 11(5), 2273-2284.
- García, J., Cárdenas, M., & Yáñez, E. (2010). Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas*, 31(2), 41-48.
- García, J. M. (1993). Estado actual del manejo de efluentes en Colombia. *Revista Palmas*, 14, 141-148.
- García, R., Núñez, A., Ramírez, T., & Jaimes, S. (2013). Caracterización de la fase upstream de la cadena de valor y abastecimiento de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. *Dyna*, 8, 79-89. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/496/49627363010.pdf>
- Geisendorf, S., & Pietrulla, F. (s. f.). The circular economy and circular economic concepts-a literature analysis and redefinition. *Thunderbird International Business Review*, 60(5), 771-782. <https://doi.org/10.1002/tie.21924>
- Geng, Y., Fu, J., Sarkis, J., & Xue, B. (2012). Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 216-224.
- Geng, Y., Zhang, P., Côté, R. P., & Qi, Y. (2008). Evaluating the applicability of the Chinese eco-industrial park standard in two industrial zones. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 15(6), 543-552.
- Gherghel, A., Teodosiu, C., & De Gisi, S. (2019). A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of cleaner production*, 228, 244-263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.240>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32.
- Google. (2021). Google Earth Pro.
- Gowdy, J. (1995). Trade and Environmental Sustainability: Evolutionary Perspective. *Review of Social Economy*, 53(4), 493-510. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00346769500000015>
- Guerra, A. (1987). La experiencia colombiana en el desarrollo de la palma de aceitera. *Revista Palmas*, 8(4), 7-11.
- Guerrero-Sánchez, A. E., Muñoz-Z., H. S., Obando-C., D. del S., Marsiglia-R., E. A., Gantiva-S., J. C., Muñoz-M., J. A., ... Mosquera-Montoya, M. (2020). Estimación de los costos de extracción de aceite de palma *E. Guineensis* en 2019 para plantas de beneficio ubicadas en la Zona Norte. *Revista Palmas*, 41(3), 24-36.
- Guhl, E. (2006). *Reflexiones sobre la sostenibilidad.*
- Guimaraes, O. (2019). *Influencia del estado de la madurez y condiciones de esterilización de los frutos, en el rendimiento y calidad de aceite crudo de palma africana (Elaeis Guineensis) de la Planta Extractora Oleaginosas Amazónicas S.A* (Universidad

Nacional de la Amazonia). Recuperado de http://repositorio.unia.edu.pe/bitstream/unia/205/1/T084_47719787_T.pdf

- Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Heinz, M. (2015). How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005: How Circular is the Global Economy? *Journal of Industrial Ecology*, *19*(5), 765-777.
- Hagman, L., & Feiz, R. (2021). Advancing the Circular Economy Through Organic by-Product Valorisation: A Multi-criteria Assessment of a Wheat-Based Biorefinery. *Waste and Biomass Valorization*, *12*, 6205-6217.
- Hau, L. ., Shamsuddin, R., Mai, A. K. A., Saenong, A., Lazim, A. M., Narasimha, M., & Low, A. (2020). Mixed Composting of Palm Oil Empty Fruit Bunch (EFB) and Palm Oil Mill Effluent (POME) with Various Organics: An Analysis on Final Macronutrient Content and Physical Properties. *Waste and Biomass Valorization*, *11*(10), 5539-5548. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00993-8>
- Helander, H., Petit-Boix, A., Leipold, S., & Bringezu, S. (2019). How to monitor environmental pressures of a circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, *23*, 1278-1291. <https://doi.org/10.1111/jiec.12924>
- Hernández, L. A. (2014). El concepto jurídico de residuo, subproducto y materia prima secundaria (fin de la condición de residuo) y su relación con el reach. *Actualidad Jurídica Ambiental*, (32), 1-34.
- Hidalgo, A. (1998). *El pensamiento económico sobre desarrollo: De los Mercantilistas al PNUD* (ilustrada; Universidad de Huelva, Ed.). Huelva, España.
- Homrich, A., Galvao, G., Abadia, L., & Carvalho, M. (2018). The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. *Journal of Cleaner Production*, *175*, 525-543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.064>
- Huailuek, N., Silalertruksa, T., & Gheewala, S. (2019). Life cycle assessment and cost-benefit analysis of palm biorefinery in Thailand for different empty fruit bunch (EFB) management scenarios. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, *10*, 65-73.
- Huamao, X., & Fengqi, W. (2007). Circular Economy Development Mode Based on System Theory. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, *5*(4), 92-96. <https://doi.org/10.1080/10042857.2007.10677537>
- Huysman, S., De Schaepmeester, J., Ragaert, K., Dewulf, J., & De Meester, S. (2017). Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, *120*, 46-54. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2017.01.013>
- Huysveld, S., Hubo, S., Ragaert, K., & Dewulf, J. (2019). Advancing circular economy benefit indicators and application on open-loop recycling of mixed and contaminated plastic waste fractions. *Journal of Cleaner Production*, *211*, 1-13. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.110>
- IBM Corp. (2020). *IBM SPSS Statistics para Windows, versión 27.0*. Armonk, Nueva York.
- Idris, N. A., Loh, S. K., Lau, H. L. N., Mustafa, E. M., Vello, V., Tan, C. ., & Phang, S. .

- (2017). Cultivation of microalgae in medium containing palm oil mill effluent and its conversion into biofuel. *Journal of Oil Palm Research*, 29(2), 291-299.
- Intasit, R., Cheirsilp, B., Louhasakul, Y., Boonsawang, P., Chairapat, S., & Yeesang, J. (2019). Valorization of Palm Biomass Wastes for Biodiesel Feedstock and Clean Solid Biofuel through Non-sterile Repeated Solid-State Fermentation. *Bioresourcetechnology*, 298, 122551. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122551>
- IPCC. (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Recuperado de www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html
- Ishola, M. M., & Taherzadeh, M. J. (2014). Effect of fungal and phosphoric acid pretreatment on ethanol production from oil palm empty fruit bunches (OPEFB). *Bioresourcetechnology*, 165, 9-12. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.053>
- Iwuagwu, J. ., & Ugwuanyi, J. . (2014). Treatment and Valorization of Palm Oil Mill Effluent through Production of Food Grade Yeast Biomass. *Journal of Waste Management*, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2014/439071>
- Jun, H., & Xiang, H. (2011). Development of circular economy is a fundamental way to achieve agriculture sustainable development in China. *Energy Procedia*, 5, 1530-1534. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.262>
- Junpadit, P., Suksaroj, T. ., & Boonsawang, P. (2017). Transformation of Palm Oil Mill Effluent to Terpolymer Polyhydroxyalkanoate and Biodiesel Using *Rummeliibacillus pycnus* Strain TS8. *Waste and Biomass Valorization*, 8(4), 1247-1256. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9711-1>
- Kabongo, J. D. (2013). Waste Valorization. En S. O. Idowu, N. Capaldi, L. Zu, & A. D. Gupta (Eds.), *Encyclopedia of Corporate Social Responsibility*. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-28036-8_680
- Kamsani, N., Salleh, M. M., Basri, S. A., Mohamad, S. E., Aziz, S. A., & Kamaruddin, K. (2017). Effects of Surfactant on the Enzymatic Degradation of Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB). *Waste and Biomass Valorization*, 9(5), 845-852. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9838-8>
- Kardung, M., Cingiz, K., Costenoble, O., Delahaye, R., Heijman, W., Lovrić, M., ... Zhu, B. (2021). Development of the Circular Bioeconomy: Drivers and Indicators. *Sustainability*, 13(1), 413. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su13010413>
- Kaur, G., Uisan, K., Ong, K. L., & Ki Lin, C. S. (2018). Recent trends in green and sustainable chemistry & waste valorisation: rethinking plastics in a circular economy. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 9, 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.11.003>
- Kerschner, C. (2008). Economía en estado estacionario vs. decrecimiento económico: ¿opuestos o complementarios? *Ecología Política*, (35), 13-16.
- Khatiwada, D., Palmén, C., & Silveira, S. (2021). Evaluating the palm oil demand in Indonesia: production trends, yields, and emerging issues. *Biofuels*, 12(2), 135-147. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1461520>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 127, pp. 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

- Kong, S. H., Loh, S. K., Bachmann, R. T., Rahim, S. A., & Salimon, J. (2014). Biochar from oil palm biomass: a review of its potential and challenges. *Renew Sustain Energy Rev*, 39, 729-739.
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46.
- Krishnan, Y., Bong, C. P. C., Azman, N. F., Zakaria, Z., Othman, N., Abdullah, N., ... Hara, H. (2017). Co-composting of palm empty fruit bunch and palm oil mill effluent: Microbial diversity and potential mitigation of greenhouse gas emission. *Journal of Cleaner Production*, 146, 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.118>
- Labandeira, X., León, C., & Vázquez, X. (2017). *Economía ambiental* (Pearson Ed). Madrid.
- Lam, S. S., Tsang, Y. F., Yek, P. N. Y., Liew, R. K., Osman, M., Peng, W., ... Park, Y.-K. (2019). Co-processing of oil palm waste and waste oil via microwave co-torrefaction: A waste reduction approach for producing solid fuel product with improved properties. *Process Safety and Environmental Protection*, 128, 30-35. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.034>
- Lau, H. L. N., Choo, Y. M., Ma, A. N., & Chuah, C. H. (2006). Quality of residual oil from palm-pressed mesocarp fiber (*Elaeis guineensis*) using supercritical CO₂ with and without ethanol. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 83(10), 893-898. <https://doi.org/10.1007/s11746-006-5043-9>
- Leff, E. (1986). *Ecología y capital. Hacia una perspectiva ambiental del desarrollo*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Leitão, A. (2015). Economía circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. *Revista portuguesa de finanças, gestão y contabilidad*, 1(2), 148-171.
- Lemus, E. (2019). Determinación del efecto ambiental y agronómico en el suelo y aguas de nivel freático por la aplicación de efluentes tratados, en sistemas de fertirrigación en cultivos de palma de aceite. *XV reunión técnica nacional de Palma de Aceite*, 22. Bucaramanga.
- Leng, T., Shukri, M., Ong, K. P., & Zainuriah, A. (2010). Alternative oil palm fertilizer sources and management. *Oil Palm Bulletin*, (61), 11-32.
- Levitt, K. (2021). Chapter 1. From mercantilism to neoliberalism and the financial crisis of 2008. En E. Gutiérrez & R. Reddock (Eds.), *Decolonial Perspectives on Entangled Inequalities: Europe and The Caribbean* (Anthem Pre, p. 322).
- Li, R. H., & Su, C. H. (2012). Evaluation of the circular economy development level of Chinese Chemical enterprises. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 1595-1601.
- Liew, R. K., Nam, W. L., Chong, M. Y., Phang, X. Y., Su, M. H., Yek, P. N. Y., ... Lam, S. S. (2018). Oil palm waste: An abundant and promising feedstock for microwave pyrolysis conversion into good quality biochar with potential multi-applications. *Process Safety and Environmental Protection*, 115, 57-69. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.10.005>
- Liew, W. L., Muda, K., Azraai, M., Affam, A. C., & Kheang, S. (2017). Agro-industrial waste sustainable management - A potential source of economic benefits to palm oil

- mills in Malaysia. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 11(1), 108-118.
- Lim, S. L., & Wu, T. Y. (2016). Characterization of matured vermicompost derived from valorization of palm oil mill by-product. *Journal of Agricultural and food chemistry*, 64(8), 1761-1769. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00531>
- Loh, S. K. (2012). *Oil palm biomass energy resource data* (Malaysian Palm Oil Board, Ed.). <https://doi.org/9789679611854>
- Loh, S. K. (2016). Biocombustibles de segunda generación de la biomasa de palma de aceite. *Revista Palmas*, 37(Especial Tomo II), 137-148.
- Loh, S. K. (2017). The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source. *Energy Conversion and Management*, 141, 285-298. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.081>
- Loh, S. K., & Choo, Y. M. (2013). Prospect, challenges and opportunities on biofuels in Malaysia. En R. Pokagu & H. . Sarbatly (Eds.), *Advances in biofuels* (pp. 3-14). Boston, MA: Springer.
- Lomineth, D. (2020). *Dinámica espacial y difusión del cultivo de palma de aceite en el Caribe colombiano*. Universidad de Córdoba.
- Lonca, G., Muggéo, R., Tétreault-Imbeault, H., Bernard, S., & Margni, M. (2018). A Bi-dimensional as-sessment to Measure the Performance of Circular Economy: A case study of tires End-of-Life Management. En *Designing Sustainable Technologies, Products and Policies* (pp. 32-42). https://doi.org/10.1007/978-3-319-66981-6_4
- Louhasakul, Y., Cheirsilp, B., & Prasertan, P. (2015). Valorization of Palm Oil Mill Effluent into Lipid and Cell-Bound Lipase by Marine Yeast *Yarrowia lipolytica* and Their Application in Biodiesel Production. *Waste and Biomass Valorization*, 7(3), 417-426. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9451-7>
- Ma, A. N., & Ong, A. S. H. (1985). Pollution Control in Palm Oil Mills in Malaysia. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 62(2), 261-266.
- Maceno, M., Pilz, T., & Oliveira, D. (2022). Life Cycle Assessment and Circular Economy: A Case Study of a Photovoltaic Solar Panel in Brazil. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 10(1), 91-111. <https://doi.org/10.5890/JEAM.2022.03.008>
- Mahanty, S., Boons, F., Handl, J., & Batista-Navarro, R. (2019). Studying the Evolution of the 'Circular Economy' Concept Using Topic Modelling. *International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learnin*, 259-270. Springer, Cham.
- Maina, S., Kachrimanidou, V., & Koutinas, A. (2017). A roadmap towards a circular and sustainable bioeconomy through waste valorization. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 8, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.07.007>
- Mandeu, N. (2018). *Postdesarrollo, decrecimiento y el buen vivir: un análisis comparativo* (IUDC-UCM). Madrid.
- Martínez, A., & Porcelli, M. (2018). Estudio sobre la economía circular como una alternativa sustentable frente al ocaso de la economía tradicional (primera parte).

Lex: Revista de la Facultad de Derecho y Ciencia Política de la Universidad Alas Peruanas, 16(22), 301-334.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21503/lex.v16i22.1659>

- Martínez, J., & Roca, J. (2015). *Economía ecológica y política ambiental* (FCE - Fondo de Cultura Económica, Ed.).
- Masullo, A. (2017). Organic wastes management in a circular economy approach: Rebuilding the link between urban and rural areas. *Ecological Engineering*, 101, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.005>
- McDowall, W., Geng, Y., Huang, B., Barteková, E., Bleischwitz, R., Türkeli, S., ... Doménech, T. (2017). Circular economy policies in China and Europe. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 651-661. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jiec.12597>
- Meadows, D., Meadows, L., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *The Limits to Growth*.
- Meijaar, E., Brooks, T., Carlson, K., Slade, E., García-Ulloa, J., Gaveau, D., ... Sheil, D. (2020). The environmental impacts of palm oil in context. *Nature Plants*, 6(12), 1418-1426. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-00813-w>
- Mejías, N., Orozco, E., & Galáan, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(6), 27-41.
- Mekhilef, S., Saidur, R., Safari, A., & Mustaffa, W. E. S. B. (2011). Biomass energy in Malaysia: current state and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7), 3360-3370. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.016>
- Mesa, J. (1990). Situación actual y perspectivas del cultivo de la palma aceitera en Colombia. *Revista Palmas*, 11(1), 61-68.
- Mesa, Jaime, González-Quiroga, A., & Maury, H. (2020). Developing an indicator for material selection based on durability and environmental footprint: A Circular Economy perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 160, 104887. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.104887>
- MinAgricultura. (2018). *Evaluaciones Agropecuarias - EVA y Anuario Estadístico del Sector Agropecuario. Casanare 2015*. Bogotá.
- MinAgricultura. (2019). *Evaluaciones Agropecuarias - EVA y Anuario Estadístico del Sector Agropecuario. Palma de Aceite 2017*. Bogotá.
- MinAgricultura. (2020). *Cadena de palma de aceite. Indicadores e instrumentos, Noviembre de 2020*. Bogotá.
- MinAmbiente. (2015). *Resolución 631 de 2015*.
- MinComercio. (2021). *Información: Perfiles económicos departamentales*. Recuperado de <https://www.mincit.gov.co/getattachment/60551a37-011a-4295-b8f1-c6b21d272066/Casanare.aspx>
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2003). *Decreto número 3100 de 2003*. Recuperado de https://www.corporinoquia.gov.co/files/Concesion de Aguas Superficiales o Subterranas y Exploracion de Aguas Subterranas/Decreto_3100_de_2003.pdf

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Resolución 1207 de 2014*. Recuperado de <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1207-de-2014.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 - 2015: Decreto Único Reglamiento del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, & Ministerio de Comercio Industria y Turismo. (2019). *Estrategia nacional de economía circular: Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio* (A. J. Saer & L. E. González, Eds.). Bogotá.
- Miranda, H., Schuchardt, F., Wulfert, K., & Tjahjono, D. (2007). Manejo sostenible de efluentes y tusas: en plantas de beneficio de palma de aceite mediante un nuevo proceso. *Revista Palmas*, 28, 191-198.
- Mison, I. I., Mohd, N. K., & Jose, R. (2018). Conversion of Oil Palm Kernel Shell Biomass to Activated Carbon for Supercapacitor Electrode Application. *Waste and Biomass Valorization*, 10(6), 1731-1740. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0196-y>
- Molina-Moreno, V., Leyva-Díaz, J. C., Llorens-Montes, F. J., & Cortés-García, F. (2017). Design of Indicators of Circular Economy as Instruments for the Evaluation of Sustainability and Efficiency in Wastewater from Pig Farming Industry. *Water*, 9(9), 1-13. <https://doi.org/10.3390/w9090653>
- Mora-Villalobos, J., Aguilar, F., Carballo-Arce, A., Vega-Baudrit, J., Trimino-Vazquez, H., Villegas-Peñaranda, A., ... Liese, A. (2021). Tropical agroindustrial biowaste revalorization through integrative biorefineries—review part I: coffee and palm oil by-products. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13399-021-01442-9>
- Moraga, G., Huysveld, S., Mathieux, F., Blengini, G., Alerts, L., Acker, K., ... Dewulf, J. (2019). Circular economy indicators: What do they measure? *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 452-461. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>
- Moreno, A. (1995). La medición de las externalidades ambientales: un enfoque espacio-temporal. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, (15), 458-496.
- Moreno, J. E., Martínez, L. A., Belalcázar, L. C., & Rojas, N. Y. (2018). Corporate Carbon Footprint of a Palm Oil Mill. *Tecciencia*, 13(24), 1-10. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2018.24.2>
- Moriguchi, Y. (2007). Material flow indicators to measure progress toward a sound material-cycle society. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 9(2), 112-120.
- Mosquera, M., Ruiz, E., Munévar, D., Castro, L., Díaz, L., & López, D. (2020). Costos de producción 2019 para la palmicultura colombiana. Estudio de referenciación competitiva entre empresas que han adoptado mejores prácticas. *Revista Palmas*, 4(1), 1-14.
- Mujica, C., Torres, E., & Vargas, M. (2010). *Evolución del sector palmicultor*. Bucaramanga.

- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of business ethics*, 140(3), 369-380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- Nahrul, Z., Astimar, A. ., Anis, M., Ibrahim, M. ., Khalil, H. P. ., & Ibrahim, Z. (2012). Vermicomposting of empty fruit bunch with addition of palm oil mill efuent solid. *Journal of Oil Palm Research*, 24, 1542-1549.
- Nakajima, N. (2000). A Vision of Industrial Ecology: State-of-the-Art Practices for a Circular and Service-Based Economy. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 20(1), 54-69.
- Nalaya, P., Wahid, S., & Izuan, H. E. M. (2020). Characterization of Empty Fruit Bunch Biochar Pyrolyzed at Different Temperatures with Respect to Activated Carbon and their Sorption Capacities for Pentachlorophenol. *Journal of Water and Environment Technology*, 18(5), 314-326. <https://doi.org/https://doi.org/10.2965/jwet.20-013>
- Nazir, M., Wahjoedi, B., Yussoff, A. W., & Abdullah, M. A. (2013). Eco-friendly extraction and characterization of cellulose from Oil palm Empty Fruit Bunches. *Bioresour. Technol.*, 8(2), 2161-2172.
- Neoh, C., Lam, C., Yahya, A., Ware, I., & Ibrahim, Z. (2015). Utilization of Agro Industrial Residues from Palm Oil Industry for Production of Lignocellulolytic Enzymes by *Curvularia clavata*. *Waste and Biomass Valorization*, 6(3), 385-390.
- Núñez-Cacho, P., Górecki, J., Molina-Moreno, V., & Cospas-Iglesias, F. (2018). What Gets Measured, Gets Done: Development of a Circular Economy Measurement Scale for Building Industry. *Sustainability*, 10, 2340. <https://doi.org/10.3390/su10072340>
- Nyakuma, B. B. (2015). Bioelectricity potential of oil palm waste in Malaysia. *3rd International Conference Research & Education in Natural Sciences (HERTSPO 2015)*, 6.
- Nzihou, A., & Lifset, R. (2010). Waste Valorization, Loop-Closing, and Industrial Ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 14(2), 196-199. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00242.x>
- Ogunmakinde, O. (2019). A Review of Circular Economy Development Models in China, Germany and Japan. *Recycling*, 4(3), 1-14. <https://doi.org/10.3390/recycling4030027>
- Oliveira, M., Coccozza, A., Zucaro, A., Santagata, R., & Ulgiati, S. (2021). Circular economy in the agro-industry: Integrated environmental assessment of dairy products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111314. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111314>
- Olmos, A. (2014). *Conflictos ambientales asociados al aprovisionamiento y regulación hídrica, generados por la expansión de cultivos de palma africana. Zona oriental colombiana*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ong, S. ., Mo, K. ., Alengaram, U. ., Jumaat, M. ., & Ling, T. . (2017). Valorization of Wastes from Power Plant, Steel-Making and Palm Oil Industries as Partial Sand Substitute in Concrete. *Waste and Biomass Valorization*, 9(9), 1645-1654. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9937-6>

- Ortiz, A. (2019). *La palma de aceite como ejemplo para la agroindustria en Colombia*. Fundación Universitaria de América.
- Osorio, J. (2020). Visión poskeynesiana sobre la producción: crítica de Sraffa a la teoría neoclásica. *Pensamiento crítico*, 25(2), 5-37. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15381/pc.v25i2.19526>
- Osorio, L. L. D. R., Flórez-López, E., & Grande-Tovar, C. D. (2021). The Potential of Selected Agri-Food Loss and Waste to Contribute to a Circular Economy: Applications in the Food, Cosmetic and Pharmaceutical Industries. *Molecules*, 26(2), 515-557. <https://doi.org/>. <https://doi.org/10.3390/molecules26020515>
- Oswal, N., Sarma, P. M., Zinjarde, S. S., & Pant, A. (2002). Palm oil mill effluent treatment by a tropical marine yeast. *Bioresour. Technol.*, 85(1), 35-37.
- Our World in Data. (2021). Land use for palm oil production. Recuperado 19 de mayo de 2021, de Our World in Data website: <https://ourworldindata.org/palm-oil>
- Palafox, G., Lee, S., Bouch, C., Hunt, D., & Rogers, C. (2017). *The little book of Circular Economy in cities* (Imaginatio; C. Dr Boyko & C. Dr Coulton, Eds.). Lancaster University.
- Pascual, U., Muradian, R., Brander, L., Gómez-Baggethun, E., Martín-López, B., Verma, M., ... Polasky, M. (2010). The economics of valuing ecosystem services and biodiversity. En P. Kumar (Ed.), *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: The Ecological and Economic Foundations* (pp. 183-256). Londres: Earthscan.
- Patterson, M. (1998). Commensuration and theories of value in ecological economics. *Ecological Economics*, 25(1), 105-125.
- Pearce, D. (1976). *Environmental Economics* (Longman). London.
- Pearce, D., & Turner, K. (1990). *Economics of natural resources and the environment* (JHUP).
- Pérez, M. (2012). Conceptualización sobre el Desarrollo Sostenible: operacionalización del concepto para Colombia. *Punto de vista*, 3(5), 139-158.
- Perez, N., & Gomero, L. (2020). *Valoración del biocombustible obtenido mediante fermentación de residuos agroindustriales*. Universidad Científica del Sur.
- Pires, A., & Martinho, G. (2019). Waste hierarchy index for circular economy in waste management. *Waste Management*, 95, 298-305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.014>
- Poh, P. E., Wu, T. Y., Lam, W. H., Poon, W. C., & Lim, C. S. (2020a). Oil Palm Plantation Wastes. En *Waste Management in the Palm Oil Industry* (pp. 5-20). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39550-6>
- Poh, P. E., Wu, T. Y., Lam, W. H., Poon, W. C., & Lim, C. S. (2020b). Palm Oil Milling Waste. En *Waste Management in the Palm Oil Industry* (pp. 21-44). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39550-6>
- Poh, P. E., Yong, W., & Chong, M. F. (2010). Palm oil mill effluent (POME) characteristics in high crop season and the applicability of high-rate anaerobic bioreactors for the treatment of POME. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(22), 11732-11740.

- Ponce, F., Silva, E., Yáñez, E., & Castillo, E. (2008). Potencial de generación de energía eléctrica en la agroindustria colombiana de palma de aceite: tres estudios de caso. *Revista Palmas*, 29(4), 59-72.
- Poponi, S., Arcese, G., Pacchiera, F., & Martucci, O. (2022). Evaluating the transition to the circular economy in the agri-food sector: Selection of indicators. *Resources, Conservation and Recycling*, 176, 105916. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105916>
- Porcelli, M., & Martínez, A. (2018). Análisis legislativo del paradigma de la economía circular. *Revista Direito GV*, 14(3), 1067-1105. <https://doi.org/10.1590/2317-6172201840>
- Prado, J. Q. A., & Noyola, M. C. (2016). Trueque, intercambio y reciprocidad: economía solidaria en las comunidades purépecha de Michoacán. *Revista Etnobiología*, 14(2), 79-91.
- Prasetyo, I., Mukti, N. I. ., Cahyono, R. ., Prasetya, A., & Ariyano, T. (2020). Nanoporous Carbon Prepared from Palm Kernel Shell for CO₂/CH₄ Separation. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 5599-5606. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01006-4>
- Prieto-Sandoval, V., Ormazabal, M., Jaca, C., & Viles, E. (2017). Key elements in assessing circular economy implementation in small and medium-sized enterprises. *Business Strategy and the Environment*, 28(7), 1525-1534. Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/bse.2210>
- Prieto, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (15), 85-95.
- Qaim, M., Sibhatu, K., Siregar, H., & Grass, I. (2020). Environmental, Economic, and Social Consequences of the Oil Palm Boom. *Annual Review of Resource Economics*, 12, 321-344. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-110119-024922>
- Quayson, E., Amoah, J., Rachmadona, N., Morita, K., Darkwah, L., Hama, S., ... Ogino, C. (2020). Valorization of palm biomass waste into carbon matrices for the immobilization of recombinant *Fusarium heterosporum* lipase towards palm biodiesel synthesis. *Biomass and Bioenergy*, 142, 9. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105768>
- Quintero, L. A., & Torres, C. I. (2019). Análisis de residuos sólidos de palma africana, como alternativa de aprovechamiento de energías renovables en el departamento del Cesar. *Ingenierías USBMed*, 10(1), 8-18.
- Rabta, B. (2020). An Economic Order Quantity inventory model for a product with a circular economy indicator. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106215. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2019.106215>
- Rakundo, R., Bergeron, S., Bacoum, I., Pelletier, N., & Doyon, M. (2021). A Methodological Approach to Designing Circular Economy Indicators for Agriculture: An Application to the Egg Sector. *Sustainability*, 13, 8656. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su13158656>
- Ramírez, N., Arévalo, A., & García, J. (2015). Inventario de la biomasa disponible en

- plantas de beneficio para su aprovechamiento y caracterización fisicoquímica de la tusa en Colombia. *Revista Palmas*, 36(4), 41-54.
- Ramírez, N., Silva, Á., Garzón, E., & Yáñez, E. (2011). *Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite*. Bogotá.
- Ramírez, V., & Antero, J. (2014). Evolución de las teorías de explotación de recursos naturales: hacia la creación de una nueva ética mundial. *Luna Azul*, 39, 291-313.
- Ramos, C., Zilber, M. A., Silva, L. F., Lhama, P., & Davila, F. (2019). Economía circular, innovación y sustentabilidad. *Brazilian Journal of Development*, 5(10), 21261-21276.
- Rashid, M. I., & Shahzad, K. (2021). Food waste recycling for compost production and its economic and environmental assessment as circular economy indicators of solid waste management. *Journal of Cleaner Production*, 317, 128467. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128467>
- Ritzén, S., & Sandström, G. (2017). Barriers to the Circular Economy – integration of perspectives and domains. *Procedia CIRP*, 64, 7-12.
- Rivera-Méndez, Y., Rodríguez, D., & Romero, H. (2017). Carbon footprint of the production of oil palm (*Elaeis guineensis*) fresh fruit bunches in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 149, 743-750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.149>
- Rivera. (2016). *La sostenibilidad del recurso hídrico en el Ecuador. Análisis Multicriterial de la gestión del Agua*.
- Rivera, A., & Cubides, A. (2018). *Incidencia socioeconómica del palma africana en el municipio de Puerto Gaitán - Meta y su evolución en el periodo (1991-2017)*. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (U.D.C.A).
- Rossi, E., Bertassini, A. C., dos Santos Ferreira, C., do Amaral, W. A. N., & Ometto, A. R. (2019). Circular Economy indicators for organizations considering Sustainability and Business Models: plastic, textile and electro electronic cases. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119-137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119137>
- Rubinsin, N., Daud, W., Kamarudin, S., Masdar, M., Rosli, M., Samsatli, S., ... Lim, K. (2020). Optimization of oil palm empty fruit bunches value chain in peninsular malaysia. *Food and Bioproducts Processing*, 119, 179-194. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.11.006>
- Sadh, P. K., Duhan, S., & Duhan, J. S. (2018). Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. *Bioresources and Bioprocessing*, 5(1), 1-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40643-017-0187-z>
- Sala, S., Farioli, F., & Zamagni, A. (2013). Progress in sustainability science: lessons learnt from current methodologies for sustainability assessment: part 1. *The international journal of life Cycle Assessment*, 18(9), 1653-1672. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0508-6>
- Salema, A., & Ani, F. (2012). Pyrolysis of oil palm empty fruit bunch biomass pellets using multimode microwave irradiation. *Bioresource technology*, 125, 102-107. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.002>

- Salguero-Puerta, L., Leyva-Díaz, J. C., Cortés-García, F., & Molina-Moreno, V. (2019). Sustainability Indicators Concerning Waste Management for Implementation of the Circular Economy Model on the University of Lome (Togo) Campus. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(12), 2234. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijerph16122234>
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *Bio-Tecnología*, 16(2), 14-16.
- Scheepens, A. E., Vogtländer, J. G., & Brezet, J. C. (2016). Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: making water tourism more sustainable. *Journal of Cleaner Production*, 114, 257-268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.075>
- Schuchardt, F., Wulfert, K., & Darnoko, D. (2005). New process for combined treatment of waste (EFB) and waste water (POME) from palm oil mills - Technical, economical and ecological aspects. *Landbauforschung Völkenrode*, 55(1), 47-60.
- Shafigh, P., Jumaat, M. Z., & Mahmud, H. (2010). Mix design and mechanical properties of oil palm shell lightweight aggregate concrete: A review. *International Journal of the Physical Sciences*, 5(14), 2127-01.4.
- Shanmugarajah, B., Chew, I. M., Mubarak, N. M., Choong, T. S., Yoo, C., & Tan, K. (2018). Valorization of palm oil agro-waste into cellulose biosorbents for highly effective textile effluent remediation. *Journal of Cleaner Production*, 210, 697-709. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.342>
- Sharma, B., Vaish, B., Singh, U. K., Singh, P., & Singh, R. P. (2019). Recycling of Organic Wastes in Agriculture: An Environmental Perspective. *International Journal of Environmental Research*, 13(2), 409-429. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s41742-019-00175-y>
- Silva, M., Marques, P., Coelho, L., Nestler, H., Castro, P., & Galhano, C. (2018). Promoting Sustainability Through Agro-industrial Waste Valorisation. En F. Alves, W. Leal, & U. Azeiteiro (Eds.), *Theory and Practice of Climate Adaptation* (pp. 363-373). Springer International Publishing.
- Silveira, E. A., Tardioli, P. W., & Farinas, C. S. (2016). Valorization of Palm Oil Industrial Waste as Feedstock for Lipase Production. *Biochem Biotechnol*, 179(4), 558-571. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2013-z>
- Singh, R. P., Ibrahim, M. H., Esa, N., & Iliyana, M. S. (2010). Composting of waste from palm oil mill: a sustainable waste management practice. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 9(4), 331-334. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9199-2>
- Sinjaroonsak, S., Chaiyaso, T., & Aran, H. (2019). Optimization of Cellulase and Xylanase Productions by *Streptomyces thermocophilus* TC13W Using Low Cost Pretreated Oil Palm Empty Fruit Bunch. *Waste and Biomass Valorization*, 189(1), 76-86. <https://doi.org/10.1007 / s12649-019-00720-y>
- Sohni, S., Nik, N. ., Hashim, R., Bahadar, S., Fadhullah, W., & Mohd, A. K. (2018). Physicochemical characterization of Malaysian crop and agro-industrial biomass residues as renewable energy resource. *Industrial Crops and Products*, 111, 642-

650. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.031>

- Stanković, J. J., Janković-Milić, V., Marjanović, I., & Janjić, J. (2021). An integrated approach of PCA and PROMETHEE in spatial assessment of circular economy indicators. *Waste Management*, *128*, 154-166. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.04.057>
- Stemann, J., Erlach, B., & Ziegler, F. (2013). Hydrothermal Carbonisation of Empty Palm Oil Fruit Bunches: Laboratory Trials, Plant Simulation, Carbon Avoidance, and Economic Feasibility. *Waste and Biomass Valorization*, *4*(3), 441-454. <https://doi.org/10.1007/s12649-012-9190-y>
- Stichnothe, H., & Schuchardt, F. (2010). Comparison of different treatment options for palm oil production waste on a life cycle basis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *15*(9), 907-915. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0223-0>
- Stichnothe, H., & Schuchardt, F. (2011). Life cycle assessment of two palm oil production system. *Biomass Bioenergy*, *35*(9), 3976-3984. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.001>
- Strazza, C., Magrassi, F., Gallo, M., & Del Borghi, A. (2015). Life Cycle Assessment from food to food: A case study of circular economy from cruise ships to aquaculture. *Sustainable Production and Consumption*, *2*, 40-51. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2015.06.004>
- Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., & Yu, X. (2013). A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. *Journal of Cleaner Production*, *42*, 215-227. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.020>
- Suárez-Eiroa, B., Fernández, E., Méndez-Martínez, G., & Soto-Oñate, D. (2019). Operational principles of circular economy for sustainable development: Linking theory and practice. *Journal of Cleaner Production*, *214*, 952-961. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.271>
- Subramaniam, V., Chow, M. C., & Ma, A. . (2004). Energy database of the Oil Palm. *Palm Oil Bulletin, Kuala Lumpur, Malaysia*, *70*, 15-22.
- Subramaniam, V., Hashim, Z., Loh, S. K., & Astimar, A. A. (2020). Assessing water footprint for the oil palm supply chain- a cradle to gate study. *Agricultural Water Management*, *237*, 106184. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106184>
- Sukiran, M. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., Abu Bakar, N., & Loh, S. K. (2017). A review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production. *Energy Conversion and Management*, *149*, 101-120. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.011>
- Sundram, S. (2013). The effect of Trichoderma in surface mulches supplemented with conidial drenches in the disease development of Ganoderma Basal Stem Rot in oil palm. *J Oil Palm Res*, *25*(3), 314-339.
- Suppen, N., & Hoof, B. (2005). *Conceptos básicos del Análisis de Ciclo de Vida y su aplicación en el Ecodiseño*.
- Tashkeel, Rafay Rajarathnam, G., Wan, W., Soltani, B., & Abbs, A. (2021). Cost-normalized Circular Economy Indicator and its application to post-consumer plastic pack-aging waste. *Polymers*, *13*, 3456. <https://doi.org/10.3390/polym13203456>

- Tay, J. H. (1990). Ash from oil-palm waste as concrete material. *Journal of Materials Civil Engineering*, 2(2), 94-105.
- Taylor, S. . (2016). *A Review of Sustainable Development Principles*. Recuperado de <http://mri.scnatweb.ch/en/afromontcontent/afromont-discussion-documents/2602-sustainable-development-review-2016/file>
- Thinagaran, L., & Sudesh, K. (2017). Evaluation of Sludge Palm Oil as Feedstock and Development of Efficient Method for its Utilization to Produce Polyhydroxyalkanoate. *Waste and Biomass Valorization*, 10(3), 709-720. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0078-8>
- Toro, J., Martínez, L., & Martelo, C. (2016). *Metodología para la Evaluación de Impactos Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá*.
- Torres, J., Yabarrena, W., Quispe, D., & Perdicci, J. (2015). *Planeamiento estratégico para la gestión del agua residual con economía circular*. Universidad Católica del Perú.
- Torres, R., Acosta, A., & Chinchilla, C. (2004). Proyecto comercial de compostaje de los desechos agroindustriales de la palma aceitera. *Revista Palmas*, 25(Especial Tomo II), 337-387.
- Tsouko, E., Kachrimanidou, V., dos Santos, A. ., do Nascimento Vitorino Lima, M. ., Machado de Castro, A., Guimarães, D. M., & Koutinas, A. (2016). Valorization of By-Products from Palm Oil Mills for the Production of Generic Fermentation Media for Microbial Oil Synthesis. *Applied microbiology and biotechnology*, 181(4), 1241-1256. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2281-7>
- Umar, M. ., Urmee, T., & Jennings, P. (2018). A policy framework and industry roadmap model for sustainable oil palm biomass electricity generation in Malaysia. *Renewable Energy*, 128, 275-284. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.060>
- USDA. (2021). Oilseeds: World Markets and Trade. Recuperado 29 de febrero de 2020, de United States Department of Agriculture website: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>
- Van Fan, Y., Lee, C. T., Lim, J. S., Klemeš, J. J., & Kim Le, P. T. (2019). Cross-disciplinary approaches towards smart, resilient and sustainable circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 232, 1482-1491. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.266>
- Vargas, Y., & Pérez, L. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 1(1), 59-72. <https://doi.org/https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>
- Vásquez, F. (2015). *Cambio Climático, Economía Ambiental y Estilos de Desarrollo*. Bogotá.
- Vasu, H., Wong, C., Vijaietnam, N., Chong, Y., Thangalazhy-Gopakumar, S., Gan, S., ... Ng, H. (2019). Insight into Co-pyrolysis of Palm Kernel Shell (PKS) with Palm Oil Sludge (POS): Effect on Bio-oil Yield and Properties. *Waste and Biomass Valorization*, 11(11), 5877-5889. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00852-1>
- Velenturf, A. P. M., & Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy.

Sustainable Production and Consumption, 27, 1437-1457.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018>

- Vergara, C., & Ortiz, D. (2016). Desarrollo sostenible: enfoques desde las ciencias económicas. *Apuntes del CENES*, 35(62), 15-52.
- Vijaya, S., Ma, A. ., Choo, Y. ., & Nik Meriam, N. . (2008). Life cycle inventory of the production of crude palm oil - A gate to gate case study of 12 palm oil mills. *Journal of Palm Research*, 20, 484-494.
- Villacis-Uvidia, J. F., Lara-Haro, D. M., & López-Villa, L. E. (2021). Las corrientes económicas desde el punto de vista de la Ortodoxia y Heterodoxa. *FIPCAEC*, 6(1), 634-647. <https://doi.org/https://doi.org/10.23857/fipcaec.v6i1.359>
- Villegas, J. . M., & Avila, H. (2014). Quick - scan estimating model of Higher Heating Value of oil palm empty fruit bunches based on ash from proximate analysis data. *Revista Ingeniería e Investigación*, 34(2), 33-38.
- Virtanen, M., Manskinen, K., Uusitalo, V., Syväne, J., & Cura, K. (2019). Regional material flow tools to promote circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1020-1025. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.06.326>
- Wang, N., Guo, Z., Meng, F., Wang, H., Yin, J., & Liu, Y. (2019). The circular economy and carbon footprint: A systematic accounting for typical coal-fuelled power industrial parks. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1262-1273. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.064>
- Wen, Z., & Meng, X. (2015). Quantitative assessment of industrial symbiosis for the promotion of circular economy: a case study of the printed circuit boards industry in China's Suzhou New. *Journal of cleaner production*, 90, 211-219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.041>
- WOO. (2020). *2020 World Oil Outlook 2045* (M. Sanusi, A. Al-Quahtani, & A. Benyoucef, Eds.). Vienna, Austria: World Oil Outlook.
- Yeo, J., How, B., Teng, S., Leong, W., Ng, W., Lim, C., ... Lam, H. (2020). Synthesis of Sustainable Circular Economy in Palm Oil Industry Using Graph-Theoretic Method. *Sustainability*, 12(19), 8081. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su12198081>
- Yin, C., Kadir, S. A. S. A., Lim, Y. P., Syed-Ariffin, S. N., & Zamzuri, Z. (2008). An investigation into physicochemical characteristics of ash produced from combustion of oil palm biomass waste in a boiler. *Fuel Processing Technology*, 89(7), 693-696. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.12.012>
- Yoo, H. M., Seo, Y. C., Park, S. W., Kang, J. J., Choi, H. S., & Oh, C. H. (2017). Removal Effect of Ash and Metallic Species by Washing from Empty Fruit Bunch Byproducts in Palm Mills on Pyrolytic Characteristics to Produce Bio-Crude Oil. *Waste and Biomass Valorization*, 9(3), 491-502. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9807-7>
- Yusoff, S. (2006). Renewable energy from palm oil e innovation on effective utilization of waste. *Journal of Cleaner Production*, 14(1), 87-93. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jclepro.2004.07.005>
- Yusuf, M. (2017). Agro-industrial Waste Materials and Their Recycled Value-Added Applications: Review. En L. Torres & O. Vasilievna (Eds.), *Handbook of Ecomaterial* (pp. 2700-2710). Springer.

- Zapata, J., & Chávez, M. (2018). Las corrientes ortodoxa y heterodoxa del desarrollo: algunas nociones conceptuales. *Opera*, 22, 163-183.
- Zinatizadeh, A. A. (2006). *Biological treatment of palm oil mill effluent (POME) using an up-flow anaerobic sludge fixed film (UASFF) bioreactor*. University Sains Malaysia (School of Chemical Engineering).
- Zuin, V., & Ramin, L. (2018). Green and Sustainable Separation of Natural Products from Agro-Industrial Waste: Challenges, Potentialities, and Perspectives on Emerging Approaches. *Top Curr Chem (Z)*, 376(3), 229-282. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s41061-017-0182-z>
- Zulkarnain, A., Bahrin, E., Ramli, N., Phang, L., & Abd-Aziz, S. (2018). Alkaline Hydrolysate of Oil Palm Empty Fruit Bunch as Potential Substrate for Biovanillin Production via Two-Step Bioconversion. *Waste and Biomass Valorization*, 9(1), 13-23. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9745-4>

ANEXO

Anexo 1 – Formato recolección tasa generación de residuos y subproductos por agroindustria.

NOMBRE AGROINDUSTRIA: _____

Cód.: _____

Personal que acompañó el recorrido: _____

Correo empresarial: _____

Fecha visita: _____

| Año: | | | |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|
| Variable | Toneladas | % | |
| Pr total | | | |
| Raquis/tusa | | | |
| Fibra | | | |
| Cascarilla | | | |
| Lodos | | | |
| Ceniza | | | |
| Total | | | |
| Variable | m ³ | % tratamiento | |
| Efluente residual | | | |
| Parámetro | Unidad medida - Entrada | Unidad medida - Salida | Valor Max (Res 1207 de 2014) |
| <i>Físicos</i> | | | |
| pH | | | 6,0-9,0 |
| Temperatura | | | |
| Conductividad | | | 1500 |
| <i>Químico (mg/L)</i> | | | |
| DBO5 | | | |
| DQO | | | |
| SST | | | |
| SSED | | | |
| Grasas y Aceite | | | |
| Fenoles Totales | | | 1,5 |
| Cloruros | | | 300 |
| Sulfatos | | | 500 |
| <i>Aprovechamiento de residuos</i> | | | |
| Variable | Volumen/Peso | % | |
| RSO | | | |
| RL | | | |
| Ceniza | | | |