

Análisis de la producción, composición y gestión de la biomasa residual de aceite de palma
en Colombia y Brasil

Xiomara Meneses Serrano y Gustavo Andrés Pedraza Pinzón

Trabajo de grado para optar por el título de Ingenieros Químicos

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña
Ingeniero Sanitario, MSc., PhD.

Codirectoras

Laura Plazas Tovar
Ingeniera Química, PhD.

Viviana Sánchez Torres
Doctora en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Los esfuerzos para la realización de este proyecto, así como el orgullo y satisfacción por la culminación de esta etapa los dedico a Dios, quien ha sido la luz de esperanza a lo largo de este camino y de la vida misma.

A mis padres Irma y Arturo, quienes han luchado incansablemente por mi futuro y han sido mi apoyo incondicional en cada momento de alegría y adversidad.

A mi hermano Jefferson, quien con cada aventura me ha enseñado el verdadero significado del amor y el valor de la familia.

A Gustavo, por brindarme una amistad tan sincera y leal desde el primer día.

A Juan Diego, por entregarme todo su amor y confianza.

A cada una de las personas que de una u otra forma, me regalaron momentos de alegría y me enseñaron lecciones de vida que enriquecieron mi corazón.

Este logro es gracias a ustedes.

Xiomara Meneses Serrano

A Dios por todas las cosas buenas que me ha brindado durante toda mi vida y mi carrera.

A mis padres Mariela Pinzón y Gustavo Pedraza, por su amor, comprensión y apoyo durante todo este proceso. Gracias por todos los sacrificios y enseñarme que si quiero lograr algo debo trabajar duro en ello.

A mis hermanas Leidy y Cathe, por enseñarme el valor de la familia y apoyarme siempre en todo lo que deseo realizar.

A mis sobrinos Sebas y Pipe, porque son mi motor y mi felicidad.

A Xiomara, por compartir conmigo cada momento de la universidad y por ser mi apoyo en todo momento. Gracias por permitirme realizar este proyecto a su lado.

A mis grandes amigos Alejandra, Dayanna, Felipe, Fernanda, Juan David, Juan Pablo, Karol, Luisa, Laura, Margaret, Natalia y Paola, porque siempre me han apoyado en todas mis decisiones y han marcado una huella en mi vida. Gracias por la valiosa amistad que me han dado.

A mis compañeros de carrera, porque de cada uno aprendí muchas cosas y compartí momentos agradables durante el desarrollo de mi profesión

Gustavo Andrés Pedraza

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos

A nuestro director Edgar Ricardo Oviedo por brindarnos su confianza y orientación a lo largo de este proyecto.

A nuestras codirectoras Laura Plazas y Viviana Sánchez, por su apoyo y paciencia durante la realización de esta investigación.

A la Universidad Industrial de Santander (UIS) y la Escuela de Ingeniería Química por los conocimientos impartidos y la formación integral brindada durante toda la carrera.

Contenido

| | |
|---|----|
| Introducción | 12 |
| 1. Estado del arte..... | 15 |
| 2. Objetivos | 19 |
| 2.1. Objetivo general..... | 19 |
| 2.2. Objetivos específicos | 19 |
| 3. Descripción metodológica | 19 |
| 3.1. Etapa 1: Estimación de la biomasa residual por zonas productivas..... | 20 |
| 3.2. Etapa 2: Composición fisicoquímica de la biomasa | 22 |
| 3.3. Etapa 3: Prácticas de gestión y aprovechamiento de residuos | 23 |
| 4. Resultados y discusión..... | 24 |
| 4.1. Estimación de la biomasa residual por zonas productivas..... | 24 |
| 4.1.1. Colombia..... | 25 |
| 4.1.2. Brasil | 29 |
| 4.2. Composición fisicoquímica de la biomasa | 33 |
| Nota: En la tabla, se detallan las características físicas, químicas y energéticas, organizadas por rango, para cada tipo de biomasa | 35 |
| 4.2.1. Características físicas..... | 35 |
| 4.2.1.1. Descripción física de los tipos de residuos. | 35 |
| 4.2.1.2. Contenido de humedad. | 35 |
| 4.2.1.3. Contenido de material volátil..... | 36 |
| 4.2.2. Características químicas..... | 36 |
| 4.2.2.1. Lignina. | 36 |
| 4.2.2.2. Celulosa..... | 37 |
| 4.2.2.3. Hemicelulosa..... | 37 |
| 4.2.2.4. Contenido de cenizas. | 38 |
| 4.2.2.5. Composición elemental..... | 38 |
| 4.2.2.6. Elementos traza..... | 38 |
| 4.2.3. Características energéticas | 39 |
| 4.2.3.1. Poder calorífico superior..... | 39 |
| 4.3. Prácticas de gestión y aprovechamiento de residuos | 39 |
| 4.3.1. Usos actuales..... | 39 |
| 4.3.2. Posibles usos | 40 |

| | |
|------------------------------------|----|
| 4.3.2.1. Pellets y briquetas. | 41 |
| 4.3.2.2. Etanol celulósico. | 41 |
| 4.3.2.3. Biochar. | 43 |
| 4.3.2.4. Carbón activado. | 44 |
| 4.3.2.5. Bioaceites. | 45 |
| 4.3.2.7. Pulpa y papel. | 46 |
| 4.3.2.8. Gas de síntesis. | 47 |
| 5. Conclusiones. | 49 |
| 6. Recomendaciones. | 51 |
| Referencias bibliográficas. | 52 |
| Apéndices. | 76 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Producción estimada por tipos de biomasa residual en zonas productivas de Colombia..... | 26 |
| Tabla 2. Producción estimada por tipos de biomasa residual en estados productores de Brasil | 30 |
| Tabla 3. Composición fisicoquímica por tipo de biomasa..... | 34 |
| Tabla 4. Síntesis de los posibles usos para la biomasa residual de la extracción de aceite de palma..... | 48 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Productos derivados de la palma de aceite | 13 |
| Figura 2. Descripción metodológica seguida en el desarrollo del proyecto | 20 |
| Figura 3. Composición porcentual de los productos obtenidos de los racimos de fruta fresca..... | 25 |
| Figura 4. Participación en la producción de biomasa residual en Colombia | 27 |
| Figura 5. Producción de biomasa residual por zonas productivas en Colombia, durante 2016, 2017 y 2018..... | 28 |
| Figura 6. Producción de biomasa residual de aceite de palma en Colombia para el 2018 | 29 |
| Figura 7. Participación en la producción de biomasa residual en Brasil | 31 |
| Figura 8. Producción de biomasa residual por estados en Brasil, durante 2016, 2017 y 2018 | 32 |
| Figura 9. Producción de biomasa residual de aceite de palma en Brasil para el 2018 | 33 |

Lista de apéndices

| | |
|--|----|
| Apéndice A. Bibliografía relacionada con la composición de los racimos de fruta fresca. | 76 |
| Apéndice B. Datos recolectados para el desarrollo de la estimación de biomasa residual de aceite de palma..... | 78 |
| Apéndice C. Procedimiento para la estimación de biomasa residual en Colombia y Brasil. .. | 81 |
| Apéndice D. Diagrama de la revisión sistemática de la bibliografía para la segunda etapa del proyecto..... | 85 |
| Apéndice E. Diagrama de la revisión sistemática de la bibliografía para la tercera etapa del proyecto..... | 86 |

Índice de abreviaturas

| | |
|-----------------|-------------------------|
| A | Almendra |
| AP | Aceite de palma |
| CS | Cáscara de la semilla |
| F_{in} | Flujo de entrada |
| FM | Fibra del mesocarpio |
| F_{out} | Flujo de salida |
| ha | Hectárea |
| KJ/kg | Kilojulio/kilogramo |
| km ² | Kilómetro cuadrado |
| mg/kg | Miligramo/kilogramo |
| R | Raquis |
| RFF | Racimos de fruta fresca |
| t | Toneladas |

Resumen

Título: Análisis de la producción, composición y gestión de la biomasa residual de aceite de palma en Colombia y Brasil*

Autores: Xiomara Meneses Serrano, Gustavo Andrés Pedraza Pinzón**

Palabras clave: Biomasa residual, Cuantificación de residuos, Composición residuos, Gestión de residuos palma de aceite.

Descripción

La biomasa sólida generada por la industria palmera es el 44% de los racimos de fruta fresca; para la gestión de estos residuos es necesaria la cuantificación, caracterización e identificación de alternativas de manejo dadas a éstos.

La estimación de producción incluyó búsqueda de información en sitios gubernamentales de los que se obtuvo la producción de aceite de palma para Colombia y de RFF para Brasil; estos datos fueron tratados mediante un balance de masa y organizados por tipo de residuo y zonas productivas. La cantidad de residuos en 2018 para Colombia fue de 3'966.526 t y para Brasil fue de 688.476 t, aumentando un 33,3% para Colombia entre 2016 y 2018, principalmente en zonas oriental y central; para Brasil, disminuyó la producción durante 2016 y 2018 un 5%, principalmente en la zona Amazónica, dadas las prohibiciones para cultivo de palma por la deforestación.

Para la composición de la biomasa se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos como ScienceDirect®, Scopus® y Springer®, determinando mayor porcentaje de humedad (66%-69%) y volátiles (86,5%-87,7%) para el raquis. En relación con la composición estructural, la cáscara presentó mayor porcentaje de lignina (48%-49,58%), mientras la celulosa (43%-44,97%) y hemicelulosas (19,92%-21) constituyen las fracciones principales del raquis. La fibra es la biomasa con más cantidad de cenizas (5%-7,4%), y presenta elevado contenido de carbono (44,97%-51,52%) y nitrógeno (0,45%-1,89%), mientras la cáscara tiene mayor porcentaje de oxígeno (42,01%-47,19%) y el raquis, de hidrógeno (5,2%-7,13%) y azufre (0,21%-0,98%); además, el poder calorífico más representativo es para la cáscara (20090-KJ/kg).

Finalmente, las técnicas de aprovechamiento se identificaron en países palmeros mediante las bases de datos mencionadas anteriormente, se relacionaron los valores obtenidos en la composición, para establecer los tratamientos más adecuados para cada biomasa describiendo el proceso, materia prima y productos; también se detalló la disposición actual.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Codirectoras: Laura Plazas Tovar y Viviana Sánchez Torres.

Abstract

Title: Analysis of production, composition, and management of the residual palm oil biomass in Colombia and Brazil*

Authors: Xiomara Meneses Serrano, Gustavo Andrés Pedraza Pinzón**

Keywords: Waste biomass, waste quantification, waste composition, oil palm waste management.

Description:

The solid biomass generated by the palm industry is 44% of the fresh fruit bunches; For the management of these wastes, it is necessary to quantify, characterize and identify the management alternatives given to these residues.

Research information were obtained on official sites such as Agronet and Agropensa, data on palm oil production for Colombia and RFF for Brazil. These data were treated by means of a mass balance and organized by type of waste and productive areas. The total amount of waste in 2018 for Colombia was 3'966,526 t and for Brazil it was 688,476 t, showing an increase in residual biomass for Colombia between 2016 and 2018 of 33.3%, mainly in eastern and central areas; Brazil on the other hand, showed a decreased by 5% during 2016 and 2018, mainly in the Amazon area, given the prohibitions on palm cultivation due to forest deforestation.

For the biomass composition, a review of studies by type of waste was carried out in databases such as ScienceDirect®, Scopus® and Springer®, thus determining the highest percentage of humidity (66% - 69%) and volatiles (86, 5% -87.7%) for the rachis. Regarding the structural composition, the shell presented a higher percentage of lignin (48% -49.58%), while cellulose (43% -44.97%) and hemicelluloses (19.92% -21) constitute the fractions main rachis. Fiber is the biomass with the highest amount of ash (5% -7.4%), and has a high content of carbon (44.97% -51.52%) and nitrogen (0.45% - 1.89%), while the shell has a higher percentage of oxygen (42.01% -47.19%) and the rachis, hydrogen (5.2% -7.13%) and sulfur (0.21% -0.98%); Furthermore, the most representative calorific value is that of the shell (20090-KJ / kg).

Finally, the utilization techniques were identified in palm oil producing countries through the databases previously mentioned, the values obtained in the composition were related to establish the most appropriate treatments by type of biomass, describing the process, type of biomass used and products obtained. In addition, current disposal processes were detailed, including fuels, composting and fertilizers.

* Degree Project

** Physical-Chemistry Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Co-directors: Laura Plazas Tovar and Viviana Sánchez Torres.

Introducción

El incremento en la generación de residuos agrícolas con el paso de los años, ha sido alarmante, en el 2016 se produjeron 368.329.087.469 toneladas a nivel mundial (Gómez-Soto et al., 2019). Esto se debe a que el porcentaje utilizado para obtener la materia prima es muy bajo y el resto son desechos, por ejemplo, el café, solo aprovecha el 9,5% del peso del fruto en la elaboración, el 90,5% son remanentes (Grande Tovar, 2016), mientras que para la industria de la palma, el porcentaje utilizado para la producción de aceite de palma y de palmiste es del 28%, el sobrante es considerado residuo (44% sólido y 28% líquido) (Onoja et al., 2019).

Por lo anterior, en el mundo se han investigado nuevas formas de aprovechar estos subproductos, ya sea utilizándolos para darle un mismo fin dentro del proceso o para generar otros productos de valor, acompañados de beneficios para el medio ambiente (Grande Tovar, 2016). Para que estas aplicaciones sean eficientes, es necesario conocer la composición física, química y características energéticas de los mismos, tales como el porcentaje de humedad, la composición elemental y el poder calorífico, entre otros, con el fin de evitar alteraciones en el uso de cada tipo de biomasa (García Nuñez, 2013).

La presente investigación está enfocada a la estimación de la producción de biomasa residual del proceso productivo de la industria palmera, el cual hace presencia en diferentes partes del mundo y cuyo principal productor es Indonesia, seguido de Malasia, los cuales tienen el 85% de la producción mundial; en América, el principal productor es Colombia, ocupando el cuarto lugar, con un porcentaje de 1,75% y Brasil con 0,57% es el noveno productor en el mundo (Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma, 2015a). Con el objetivo de contribuir con el conocimiento de la producción de residuos de la industria palmera entre Colombia y Brasil, se analizó la cantidad de biomasa por zonas productivas, además, se

describió su composición fisicoquímica y la gestión de éstos en dichos países, a través de una revisión sistemática de la bibliografía.

La biomasa residual de la industria palmera es obtenida en la planta de beneficio, donde se producen diversas materias primas que son utilizadas por empresas refinadoras, las cuales son transformadas en aceites, margarinas, jabones, pinturas, biocombustibles y demás, a partir del proceso resultan residuos sólidos con gran potencial económico y energético, como lo son raquis, fibra y cáscara de la semilla (Ramírez-Contreras et al., 2011), en la Figura 1, se presenta la forma de obtención de cada tipo de residuo durante la producción de aceite de palma.

Figura 1

Productos derivados de palma de aceite



Nota: La figura presenta el proceso de obtención de los diferentes productos derivados de la extracción de palma de aceite en una planta de beneficio. Adaptado de *Induagro, 2014*.

Los desechos son partes de productos agrícolas que pueden tener propiedades o usos interesantes, por lo cual se pueden valorizar en la generación de nuevos productos evitando un impacto negativo en su disposición final, con base en ello, se han planteado soluciones para el manejo de estos residuos, una de ellas, es la conversión de las plantas de beneficio a biorrefinerías, estas pueden ayudar a mejorar la competitividad de la industria palmera en países como Colombia y Brasil (García Nuñez, 2013). Una ventaja de esto, es que existe una

buena disponibilidad de residuos del procesamiento de palma de aceite dado que corresponden al 70 - 74% del peso de los racimos de fruta fresca (RFF) (Del Hierro, 1993).

El conocimiento de la cantidad de residuos producidos es fundamental para gestionar el aprovechamiento de estos. Para ello, se propone la obtención de la cantidad de biomasa residual por medio de un balance de masa global del proceso, por lo que es necesario conocer la cantidad de aceite de palma producido y los porcentajes a los que corresponde cada tipo de producto relativo a la masa de los RFF, para así, obtener una estimación de la cantidad de cada tipo de residuo (raquis, fibra o cáscara), además de organizar esta información por zonas productivas, por ejemplo, en Colombia, se dividió por zonas (Norte, Central, Oriental y Suroccidental), y en Brasil, se dividió por estados (Pará, Bahía y Amazonas).

La información fisicoquímica es de vital importancia al momento de utilizar cada tipo de biomasa en una aplicación específica, y para ello, se realizó la comparación de las diversas fuentes de información, las cuales presentan características físicas como porcentaje de humedad y sólidos volátiles; por parte de las características químicas, se encuentra el porcentaje de lignina, celulosa, hemicelulosa, porcentaje de cenizas, composición elemental y elementos traza y como característica energética se expone el poder calorífico.

La cantidad de biomasa generada por la industria palmera debe ser estudiada para generar beneficios tanto económicos como ambientales, por tal razón se realizó la búsqueda bibliográfica de las diferentes aplicaciones de ésta en los países productores del aceite de palma, especificando su nivel de desarrollo, con el fin de presentar una variada opción de soluciones a la acumulación de éstos e investigar los usos actuales en países como Colombia y Brasil, estos datos servirán como información para la formulación en los grupos de investigación de proyectos futuros orientados a la valorización de la biomasa residual del aceite de palma.

Dada la información con relación a la biomasa residual de la producción de aceite de palma, con este trabajo se buscó resolver el interrogante: ¿Cuál es la cantidad aproximada de producción de biomasa, la composición fisicoquímica, el uso actual y alternativas de valorización de los residuos en países como Colombia y Brasil?

1. Estado del arte

La generación de energía alternativa a partir de biomasa ha sido motivo de estudio debido a la gran cantidad de residuos, lo que la convierte en una de las fuentes más importantes para la explotación comercial (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, 2013). La industria palmera aporta un porcentaje importante de estos residuos, por ende, se ha convertido en uno de los sectores más interesados en el manejo de ellos, además de los múltiples beneficios tanto económicos como ambientales.

La estimación de la biomasa residual de aceite de palma ha sido tratada en diversos estudios, se han empleado ecuaciones alométricas para plantaciones específicas de palma, a partir de modelos de predicción en función de la altura y diámetro de la planta, este método puede ser poco confiable para la predicción debido al número de muestras o repeticiones realizadas (Loh, 2016). Por otra parte, se tiene el muestreo destructivo por secciones, en el cual la palma se separa en diversos componentes con el fin de recolectar las diferentes medidas y caracterizarlos, y, por último, se obtiene el cálculo de la biomasa potencial y los contenidos de nutrientes de análisis anteriores reportados en la literatura (Ramos Escalante et al., 2018).

La aplicabilidad de la biomasa residual depende de sus propiedades fisicoquímicas, en consecuencia, se han realizado investigaciones enfocadas a la determinación de la composición de cada tipo de residuo; por lo general, los métodos usados para conocer la composición

química y elemental son los análisis próximo y último (Ramírez-Contreras et al., 2011)(Loh, 2016), por medio de ellos se adquieren los porcentajes de ceniza, humedad y contenido de carbono, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno y azufre. Además, se ha recopilado información de poder calorífico mediante un calorímetro (Idris et al., 2012), este es crucial para reconocer si el tipo de biomasa es apto como combustible (Vignote Peña, 2016) o en otras aplicaciones.

La biomasa sólida residual (raquis, fibra de mesocarpio y cáscara de la semilla) de la industria de la palma de aceite presenta un gran potencial debido a sus propiedades fisicoquímicas. Actualmente, en Colombia, el raquis es usado para mejorar las propiedades fisicoquímicas de los suelos generando un mejor desarrollo de cultivos ya que existe una mejor toma de nutrientes y rendimiento; por otro lado, la fibra de mesocarpio es consumida en calderas, también es posible usarlo en compostaje y en mezclas de alimentos para animales (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, 2019b), y finalmente, la cáscara de la semilla se ha usado parcialmente en procesos de combustión en calderas debido a su alto poder calorífico (Khalid et al., 2000), además, se puede aprovechar su contenido de carbón vegetal para la obtención de carbón activo o briquetas combustibles (Del Hierro, 1993); los dos tipos de residuos mencionados anteriormente, se utilizan incrementando su eficiencia energética en plantas de cogeneración con vapor de alta calidad reduciendo el vapor consumido en el proceso (Khalid et al., 2000).

En Brasil, se desea generar compostaje de forma óptima, por ende, se instaló una unidad de demostración de compostaje de tallos de aceite de palma por torneado mecanizado en el municipio de Igarapé, la cual tuvo como objetivo desarrollar un proceso de compostaje aeróbico, al aire libre y con volteo, para acelerar la formación de este y así, reducir el volumen de los desechos y generar un producto estable e higiénico, siendo seguro para las plantaciones. Además, la fibra del mesocarpio y la cáscara de la semilla son utilizadas en calderas, generando una cantidad considerable de cenizas, que, en caso de no ser usadas correctamente, pueden

desencadenar problemas por la acumulación al aire libre, esta tiene grandes efectos beneficiosos en suelo amazónico debido a su carácter alcalino (Sánchez Torres, 2014).

Por otra parte, se ha realizado una amplia variedad de estudios relacionados con los tipos de biomasa, una de las aplicaciones estudiadas por universidades Colombianas es convertir los residuos en pellets o briquetas, por medio de densificado y prensado (Rincón Rincón & González Castillo, 2014)(Quintero Lopez, 2017), otra aplicación es la conversión de los raquis a etanol celulósico, esto es realizado mediante fermentación por levaduras (Castillo, 2016)(Gómez Vanegas, 2015).

También, se ha hecho énfasis en la elaboración de productos de origen natural, como el biochar o carbón vegetal, por medio de gasificación, principalmente a la cáscara de semilla (Guerra Laura, 2015)(Díaz Muegue, 2017), de ésta también es posible obtener bioaceites por medio de pirólisis (Arteaga et al., 2012).

El compost presenta una cantidad importante de estudios, el cual es producto de la degradación por comunidades microbianas del raquis (Galindo Castañeda & Romero, 2012), a su vez, el carbón activado es producido mediante la carbonización y gasificación de la cáscara de la semilla, éste es usado en diversas aplicaciones como la purificación de agua y aire (Mendoza Gómez, 2014)(Gómez et al., 2004).

El raquis y la fibra son utilizados para las aplicaciones de torrefacción por medio de tratamiento termoquímico (Talero Rojas et al., 2017) y la producción de pulpa y papel mediante pulpeo químico alcalino con NaOH (Hassan et al., 1998), y, por otra parte, la producción de gas de síntesis por medio de gasificación de las cáscaras de la semilla (Forero Núñez et al., 2013)(Universidad Nacional de Colombia, 2020).

Con base en lo anterior, son evidentes las propiedades y aplicaciones de la biomasa del proceso productivo de aceite de palma, por tal razón, es uno de los residuos más estudiados en el ámbito investigativo con el fin de explotar su potencial y mejorar los procesos productivos

de las comunidades palmeras para lograr la sostenibilidad, dada la generación continua de dichos residuos; a pesar del interés, la ejecución de proyectos de gran impacto con el fin de la producción continua de subproductos de origen de biomasa residual de aceite de palma, no se ha establecido firmemente en países como Colombia y Brasil, es decir, no ha superado la etapa de prueba piloto.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Analizar la producción, composición y gestión actual de biomasa residual de la extracción de aceite de palma en Colombia y Brasil.

2.2. Objetivos específicos

Estimar la producción de biomasa residual de aceite de palma orientada a zonas productivas por medio de una revisión bibliográfica.

Describir la composición fisicoquímica de la biomasa residual mediante una revisión bibliográfica.

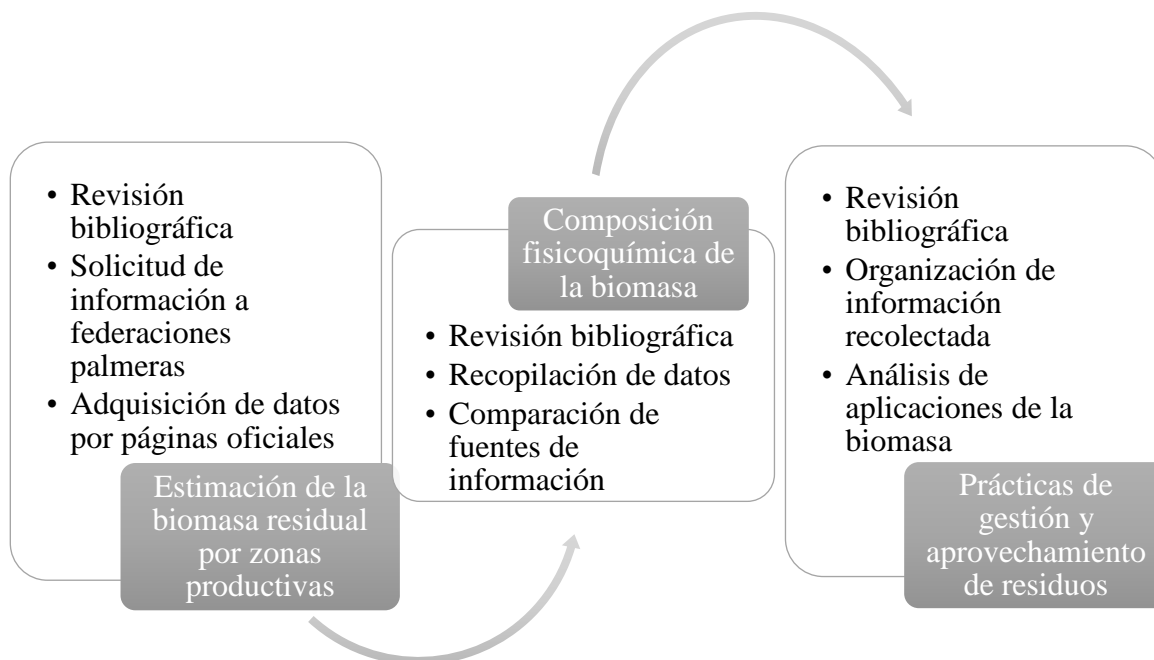
Identificar las prácticas para la gestión y aprovechamiento de biomasa residual empleadas en diferentes contextos.

3. Descripción metodológica

La Figura 2 representa una descripción global de las etapas metodológicas llevadas a cabo en la realización de esta investigación; posteriormente cada una de las etapas serán explicadas en detalle.

Figura 2

Descripción metodológica seguida en el desarrollo del proyecto



Nota: La figura muestra las etapas metodológicas en detalle, seguidas para el cumplimiento de los objetivos propuestos previamente.

3.1. Etapa 1: Estimación de la biomasa residual por zonas productivas

Para la consecución de cada etapa del proyecto, se realizó previamente una revisión bibliográfica con el fin de entender el proceso productivo de la industria palmera; inicialmente se realizó una inspección de las páginas oficiales de las federaciones palmeras como Fedepalma y Abrapalma, y se procedió a revisar 38 artículos científicos encontrados en las diferentes bases de datos como ScienceDirect[®], Scielo[®] y Scopus[®], por medio de palabras claves como “quantification of residual oil palm biomass”, “production of oil palm waste” y “waste generated from oil palm”; además de publicaciones en revistas relacionadas con la palma de

aceite como “Palmas” y los anuarios estadísticos presentados por Fedepalma, para hallar la forma de obtención de los datos de producción de biomasa residual.

Se evidenció que los estudios enfocados a la cantidad de estos residuos eran escasos y, por ende, se restructuró la búsqueda para obtener la relación entre la cantidad de aceite de palma producida en Colombia y Brasil con la proporción de los residuos generados, en estos artículos se indagaron las posibles formas de cuantificar la biomasa residual, con base en ello, fue posible establecer los porcentajes de cada tipo de producto que resulta de procesar los RFF.

La selección de los porcentajes de los RFF para cada producto se basó en un promedio entre los 5 artículos presentados en el Apéndice A, así, los valores tomados para la realización de la estimación son: aceite de palma 21%, raquis 23%, cáscara de semilla 6%, fibra de mesocarpio 15%, efluentes líquidos 28% y almendra 7%.

El balance global aplicado al proceso se presenta en la ecuación 1.

$$F_{in\ RFF} = F_{out\ AP} + F_{out\ R} + F_{out\ FM} + F_{out\ CS} + F_{out\ POME} + F_{out\ A} \quad (Ec. 1)$$

Con respecto a las composiciones e igualando el flujo de entrada al de la salida $F_{in} = F_{out}$, el balance resulta en la ecuación 2.

$$F_{in\ RFF} = x_{AP}F_{in\ RFF} + x_R F_{in\ RFF} + x_{FM}F_{in\ RFF} + x_{CS}F_{in\ RFF} \\ + x_{POME}F_{in\ RFF} + x_A F_{in\ RFF} \quad (Ec. 2)$$

Y finalmente, en la ecuación 3, se presentan los porcentajes mencionados anteriormente y se procede a realizar el tratamiento adecuado para cada país:

$$F_{in\ RFF} = F_{out\ AP} + 0,23F_{in\ RFF} + 0,15F_{in\ RFF} + 0,6F_{in\ RFF} \\ + 0,28F_{in\ RFF} + 0,7F_{in\ RFF} \quad (Ec. 3)$$

Posteriormente, fue hallada la cantidad de aceite de palma producido para Colombia y RFF tratados en Brasil, ambos en unidades de toneladas, entre los años 2016 y 2018, dicha

información fue manejada según la clasificación en cada uno de estos países, por ejemplo, en Colombia, Fedepalma divide el país por zonas, entre ellas está la zona oriental, central, norte y sur occidental y en Brasil, se estableció una división por estados, entre ellos Pará (principal productor), Bahía y Amazonas.

Los valores de producción en cada país se obtuvieron de fuentes de información gubernamental y fueron organizados en el Apéndice B; para Colombia, se ingresó a la red de información y comunicación del sector agropecuario colombiano, Agronet, la cual es actualizada por el Ministerio de Agricultura; por su parte, Brasil cuenta con Agropensa, un sistema de inteligencia estratégica de Embrapa, entidad vinculada al Ministerio de Agricultura, ganadería y abastecimiento de Brasil.

Una vez recopilada la información mencionada anteriormente, se procedió a unificar los datos hallados, para ello se estimó la cantidad de RFF tratados anualmente en Colombia; seguidamente fue posible realizar un balance de masa global que incluye los diversos productos obtenidos en la planta de beneficio de palma de aceite, de modo que, con la información reunida de las fuentes oficiales y los porcentajes de RFF correspondientes a cada producto se estimó la producción de biomasa residual en Colombia y Brasil, este procedimiento se presenta en el Apéndice C.

Finalmente, la representación de la producción de biomasa y área cosechada en el año 2018 se organiza en dos mapas en los que se presentan las diferentes zonas productivas en ambos países.

3.2. Etapa 2: Composición fisicoquímica de la biomasa

En esta etapa, se estableció un procedimiento para la recolección, organización y selección de la información, a través de una revisión sistemática de la literatura. En el Apéndice

D, se muestran los criterios y etapas de selección de la bibliografía utilizada para lograr el objetivo de identificar la composición de la biomasa residual de la palma de aceite.

Inicialmente, se navegó en las diferentes bases de datos tales como ScienceDirect[®], CID Palmero de Cenipalma, Springer[®], entre otras, y por medio de palabras claves como “palm oil biomass”, “biomass characterization” y “palm oil solid wastes”, de esta forma se lograron escoger 107 artículos.

Los artículos y publicaciones encontradas se organizaron de acuerdo al tipo de archivo, revista o institución por la cual fue publicada, país, año de publicación, palabras claves y métodos de caracterización; así, se filtraron los artículos según criterios como publicaciones repetidas, fuentes de información secundaria, origen de la información no confiable, antigüedad mayor a 10 años y por último, para llegar a los artículos seleccionados se realizó una revisión a los datos de composición y si presentaba una desviación muy notoria y faltaban datos necesarios para el cumplimiento del objetivo, se descartaban y así finalmente se seleccionaron 10 artículos que presentaban características importantes para el análisis, un ejemplo de ello, es que la información provenía de los principales países productores de aceite de palma (Indonesia, Malasia y Colombia), estos datos fueron organizados por rangos en los que se encontraban los artículos escogidos.

3.3. Etapa 3: Prácticas de gestión y aprovechamiento de residuos

Durante esta etapa metodológica, se determinó un proceso específico para la revisión bibliográfica y selección de datos, como se muestra en el Apéndice E.

Como parte inicial, fueron establecidas palabras claves como “palm oil biomass”, “byproducts of palm oil extraction”, “oil palm residues valorization” y “generation and use of

palm oil biomass” para la búsqueda en diversas bases de datos como ScienceDirect®, CID Palmero de Cenipalma y Scopus®, de estas fuentes se analizaron 89 artículos.

Se recopilaron las publicaciones y se realizó una división de los artículos mediante la tecnología y materia prima usada para el desarrollo de cada estudio, estableciendo la revista o entidad de origen de la publicación, el país, el año y el grado de avance de cada técnica de gestión hallada. Así, fueron eliminados algunos artículos teniendo en cuenta la cantidad de estudios realizados, la complejidad del proceso llevado a cabo y la fiabilidad de la fuente responsable de la información hallada.

Los resultados fueron organizados, permitiendo tener claridad sobre la información encontrada y establecer las técnicas de gestión aplicadas actualmente en Colombia y Brasil, así como también, los estudios y planes piloto que se han llevado a cabo para procesos futuros, que se encuentran aún sin gran avance.

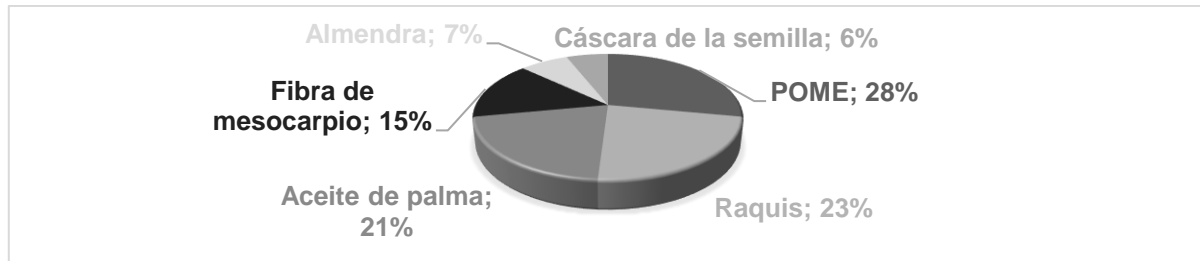
4. Resultados y discusión

4.1. Estimación de la biomasa residual por zonas productivas

La cuantificación de la biomasa residual (Figura 3) se realizó bajo los porcentajes de cada tipo de residuo de los RFF.

Figura 3

Composición porcentual de los productos obtenidos de los racimos de fruta fresca



Nota: El gráfico presenta los porcentajes de RFF correspondientes a cada producto resultante de la extracción de aceite de palma. Adaptado de *Onoja et al., 2019*.

4.1.1. Colombia

En Colombia, Fedepalma establece que las zonas productivas están divididas de la siguiente forma:

- Zona oriental: Casanare, Cundinamarca, Meta y Vichada.
- Zona norte: Antioquia, Atlántico, Bolívar, Cesar, Chocó, Córdoba, Guajira, Magdalena y Sucre.
- Zona central: Antioquia, Bolívar, Cesar, Cundinamarca, Norte de Santander y Santander.
- Zona Sur occidental: Caquetá, Cauca y Nariño.

Como se observa, departamentos como Antioquia, Bolívar, Cesar y Cundinamarca, se encuentran hasta en dos zonas por las ubicaciones geográficas de los municipios palmeros.

A partir de la composición de los racimos (Figura 3), se estimaron las cantidades de cada residuo. En la Tabla 1 se presenta la producción para Colombia.

Tabla 1.

Producción estimada por tipos de biomasa residual en zonas productivas de Colombia

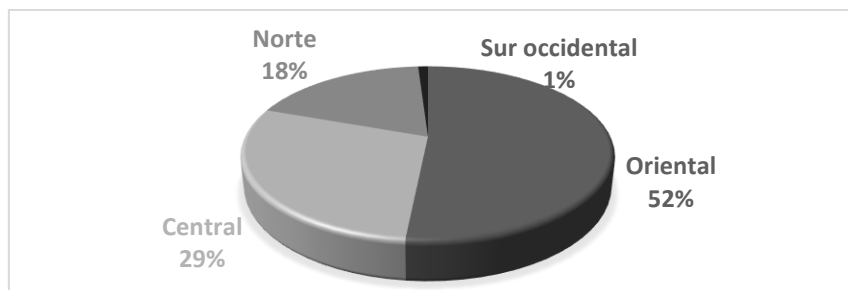
| Producción por tipos de biomasa en Colombia (t) | | | | | | |
|---|---------------|-----------|---------|-----------|---------------|-----------|
| Año | Tipo | Oriental | Norte | Central | Suroccidental | Total |
| 2016 | Raquis | 752.128 | 322.545 | 452.510 | 28.361 | 1.555.545 |
| | Fibra | 490.674 | 210.422 | 295.209 | 18.502 | 1.014.809 |
| | Cáscara | 196.126 | 84.107 | 117.997 | 7.395 | 405.626 |
| | Total biomasa | 1.438.929 | 617.075 | 865.716 | 54.260 | 2.975.981 |
| 2017 | Raquis | 973.734 | 354.298 | 560.743 | 20.590 | 1.909.366 |
| | Fibra | 635.246 | 231.137 | 365.818 | 13.432 | 1.245.636 |
| | Cáscara | 253.912 | 92.387 | 146.220 | 5.369 | 497.889 |
| | Total biomasa | 1.862.892 | 677.823 | 1.072.782 | 39.392 | 3.652.891 |
| 2018 | Raquis | 1.069.943 | 384.045 | 598.139 | 21.174 | 2.073.303 |
| | Fibra | 698.011 | 250.544 | 390.215 | 13.813 | 1.352.585 |
| | Cáscara | 279.000 | 100.144 | 155.971 | 5.521 | 540.637 |
| | Total biomasa | 2.046.955 | 734.734 | 1.144.326 | 40.509 | 3.966.526 |

Nota: La tabla detalla la cantidad de raquis, fibra y cáscara de la semilla, producidas anualmente en Colombia para los años 2016, 2017 y 2018.

En la Figura 4 se presenta la participación de cada zona en la producción de biomasa residual en Colombia; como se observa, el orden de participación por zonas productivas y área sembrada, es el siguiente: zona oriental (52% y 220.663 km^2), zona central (29% y 169.876 km^2), zona norte (18% y 128.874 km^2) y zona sur occidental (1% y 21.275 km^2) (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, 2019a).

Figura 4

Participación en la producción de biomasa residual en Colombia



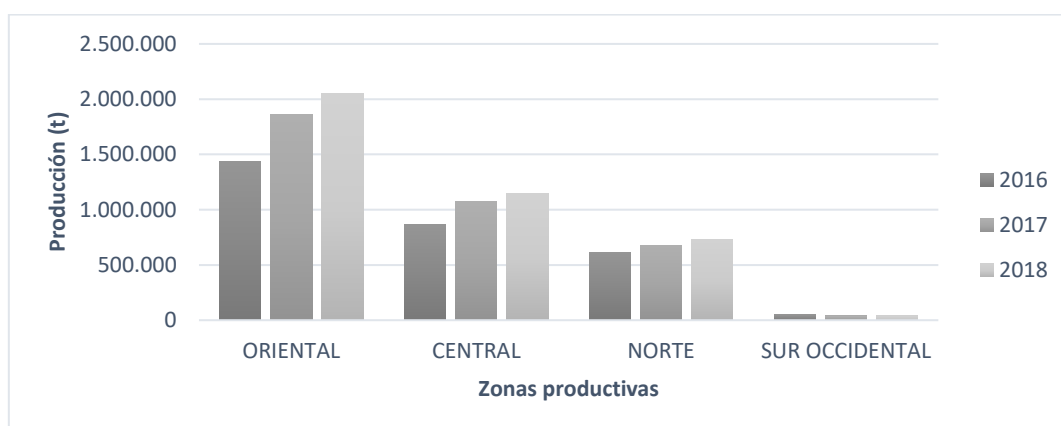
Nota: El gráfico presenta la producción porcentual de biomasa residual, por zonas productivas en Colombia.

El rendimiento de producción se define como la relación entre tonelada de aceite de palma crudo por hectárea; con base en esto, es posible determinar que dichos rendimientos para el año 2018 corresponden a los siguientes: zona oriental y central (3,68 t/ha), zona norte (3,33 t/ha) y zona suroccidental (2,21 t/ha); estos están asociados directamente con la cantidad de residuos producidos dado que a mayor valor, mayor es la cantidad de biomasa residual obtenida. Por otra parte, el bajo rendimiento presentado en la zona sur occidental se debe a que los RFF no poseen un tamaño óptimo para la producción de aceite (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, 2019a).

Con base en la Figura 5, se evidencia un crecimiento significativo en el año 2017, esto ocurrió debido a mejoras en las condiciones climáticas debido a que en el 2015 el fenómeno del Niño causó un fuerte efecto negativo en la producción, además, numerosas hectáreas que se encontraban en etapa de desarrollo pasaron a fase de producción y aumentó la productividad en las diferentes zonas palmeras, siendo uno de los sectores que impulsó la economía durante este año (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, 2018).

Figura 5

Producción de biomasa residual por zonas productivas en Colombia, durante 2016, 2017 y 2018.



Nota: El gráfico compara la producción de biomasa residual en cada zona productiva para los años 2016, 2017 y 2018.

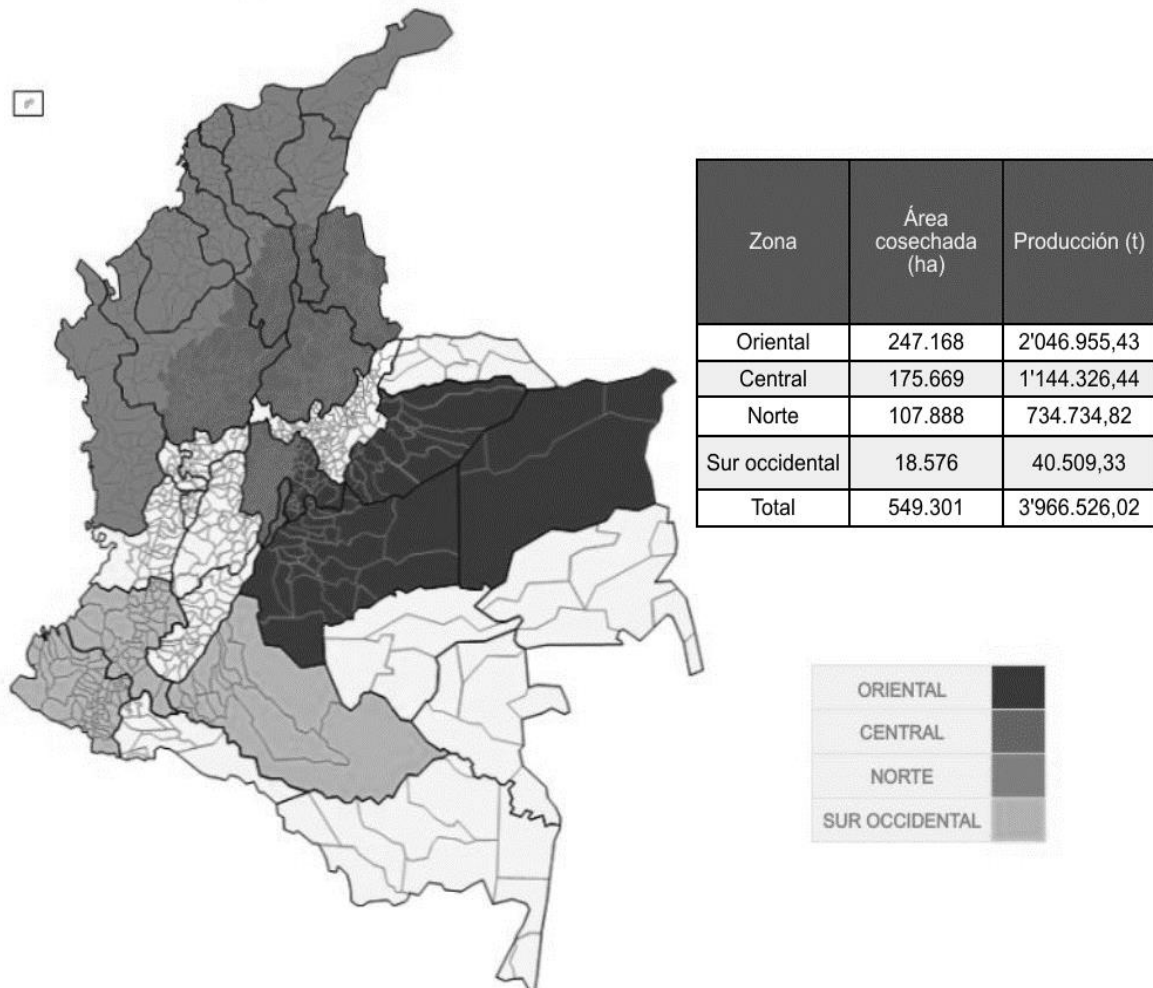
Según lo anterior, se evidencia un patrón similar con el paso de los años en las diferentes zonas productivas en el país. El 2018, no evidenció un crecimiento significativo debido a la disminución en los precios internacionales y el desorden en la comercialización local producto de las disposiciones regulatorias y por otra parte, se concluye que el incremento en la producción de biomasa fue bajo ya que el gran aumento presentado en el 2017 no permitió demostrar el desarrollo progresivo en este año (Molina Navarro, 2018).

En zonas como la oriental y central se presentan poblaciones en los departamentos de Meta, Casanare y Santander, en donde un gran porcentaje de su economía se debe a la palma de aceite, lo cual las posiciona como los principales productores de biomasa en Colombia.

La cuantificación de la biomasa residual en Colombia se dividió y organizó en la figura 6, en donde se presentan las cantidades producidas por zonas en el año 2018, el área cosechada y, además, se ubican las diferentes zonas productivas en el país.

Figura 6

Producción de biomasa residual de aceite de palma en Colombia para el 2018



Nota: En el mapa se muestra la ubicación geográfica de cada zona productiva, junto con el área cosechada y producción de biomasa durante el 2018.

4.1.2. Brasil

La estimación se realizó de igual forma que en Colombia, con base en los porcentajes de RFF correspondientes a cada producto, se procede a calcular los diferentes tipos de biomasa y se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.

Producción estimada por tipos de biomasa residual en estados productores de Brasil

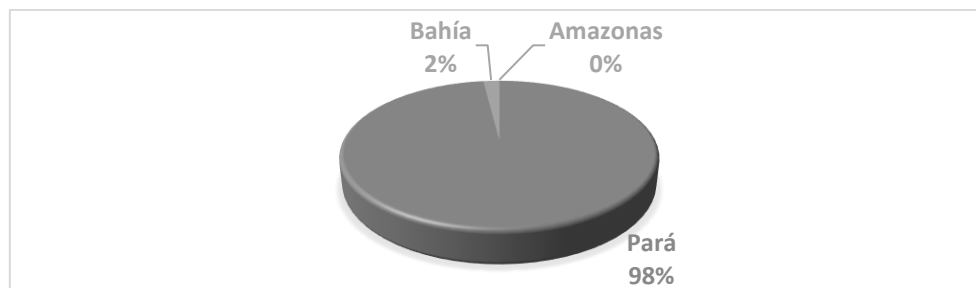
| Producción por tipos de biomasa en Brasil (t) | | | | | |
|---|---------------|---------|--------|----------|---------|
| Año | Tipo | Pará | Bahía | Amazonas | Total |
| 2016 | Raquis | 341.798 | 36.305 | 480 | 378.584 |
| | Fibra | 222.912 | 23.677 | 313 | 246.903 |
| | Cáscara | 89.164 | 9.471 | 125 | 98.761 |
| | Total biomasa | 653.875 | 69.454 | 919 | 724.248 |
| 2017 | Raquis | 375.930 | 8.491 | 834 | 385.256 |
| | Fibra | 245.172 | 5.538 | 544 | 251.254 |
| | Cáscara | 98.068 | 2.215 | 217 | 100.501 |
| | Total biomasa | 719.171 | 16.244 | 1.597 | 737.013 |
| 2018 | Raquis | 352.760 | 7.120 | 4,60 | 359.885 |
| | Fibra | 230.061 | 4.644 | 3,00 | 234.708 |
| | Cáscara | 92.024 | 1.857 | 1,20 | 93.883 |
| | Total biomasa | 674.845 | 13.622 | 8,80 | 688.476 |

Nota: La tabla detalla la cantidad de raquis, fibra y cáscara de la semilla, producidas anualmente en Brasil para los años 2016, 2017 y 2018.

La Figura 6, muestra la participación de los diferentes estados en la producción de biomasa residual en Brasil, se observa que el 98% del total se produce en el estado de Pará, este estado tomó impulso en la producción de aceite de palma en los años 70 debido al inicio de las primeras plantaciones organizadas (Sanz Veiga, 1998).

Figura 7

Participación en la producción de biomasa residual en Brasil



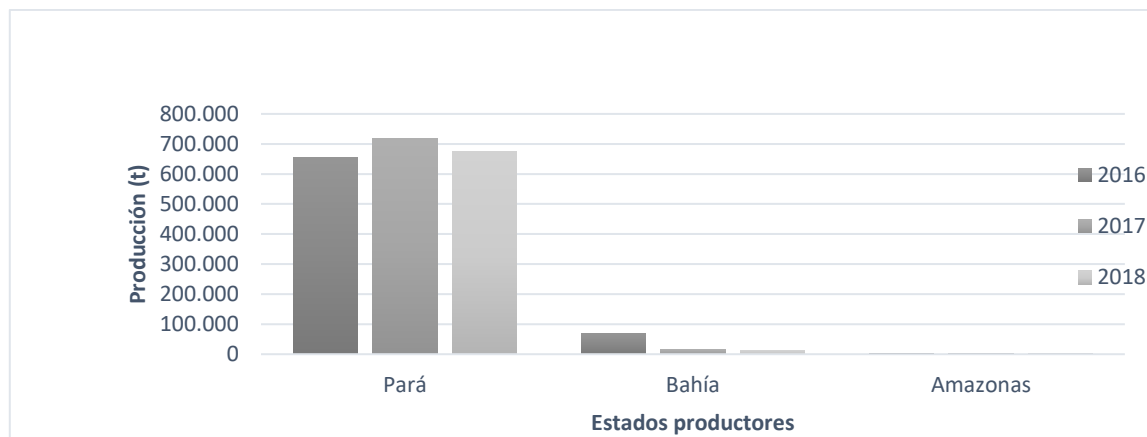
Nota: El gráfico presenta la producción porcentual de biomasa residual, por zonas productivas en Colombia.

Aunque Bahía fue el primer estado en iniciar las plantaciones de este producto, se encontraron mejores condiciones en Pará y actualmente se concentran los esfuerzos en incrementar la producción en este estado; por lo general, Brasil posee extensos territorios para desarrollar estos cultivos, pero las condiciones climáticas son el principal factor que afecta directamente a la palma de aceite debido al clima tropical que causa una gran cantidad de precipitaciones, además, factores como condiciones de acceso, disponibilidad de trabajadores, electricidad e infraestructura perjudican los 70 millones de hectáreas adecuadas para la generación de cultivos de palma de aceite en todo el territorio nacional (Sanz Veiga, 1998).

Según la cuantificación de biomasa residual de aceite de palma presentada en la Tabla 2 e ilustrada en la Figura 7, se evidencia que no ha tenido un crecimiento con respecto a los años anteriores, es posible notar que Amazonas ha disminuido en su producción a pesar de ser el territorio que posee más terreno apto para las plantaciones de la palma, esto ha generado un debate entre las diferentes organizaciones ambientalistas y los pobladores de estos sectores con respecto al empleo y la economía de los mismos (Sordi, 2019).

Figura 8

Producción de biomasa residual por estados en Brasil, durante 2016, 2017 y 2018



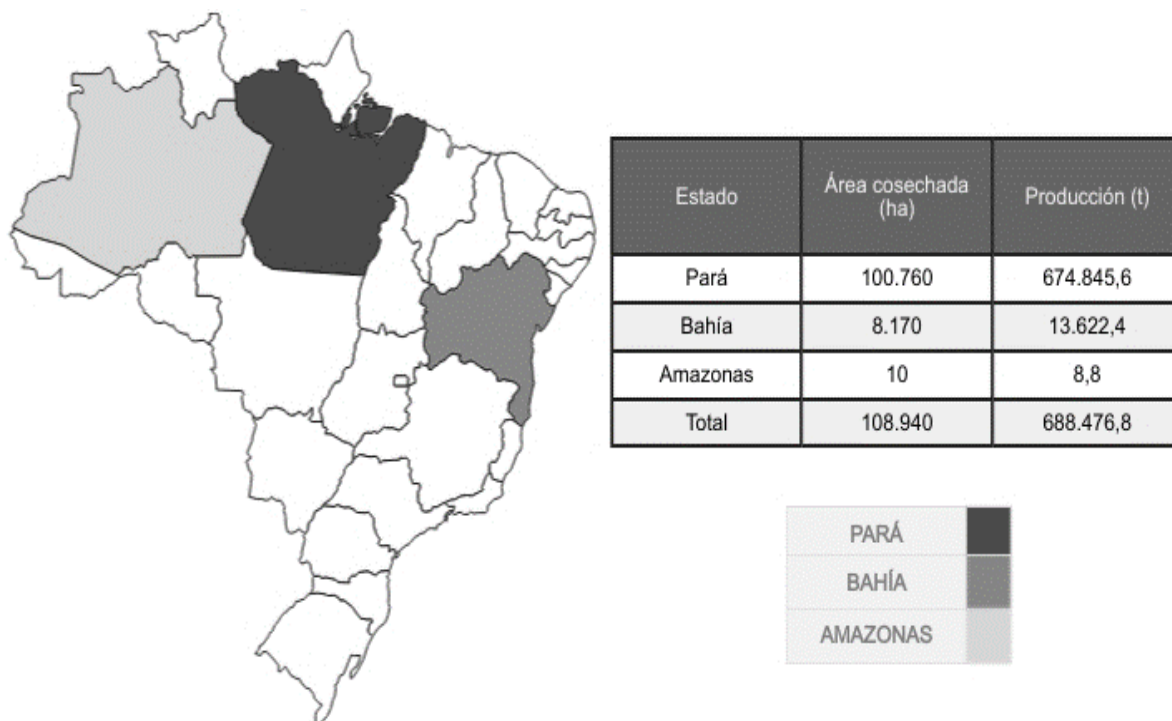
Nota: El gráfico compara la producción de biomasa residual en cada estado, para los años 2016, 2017 y 2018.

En la actualidad, los bosques intactos del Amazonas son un gran sumidero de carbono, sin embargo, las plantaciones de palma de aceite almacenan menos del 40% de carbono que se encuentra en los bosques nativos (M. Torres & Branford, 2018), por ello, la agencia de investigación agrícola de Brasil, EMBRAPA, creó un mapa de adecuación biofísica titulado “Zonificación Agroecológica de cultivos de palma aceitera para áreas deforestadas de la Amazonía Legal” (ZAE) determinando que se debe evitar las áreas forestadas de la Amazonia para la implantación de cultivos debido a su importante papel como reguladoras de los ciclos hidrológicos y de movimiento de masas de aire en carácter planetario (Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma, 2015b), provocando una restricción y disminución de la producción de aceite de palma en la zona.

La cuantificación de la biomasa residual en Brasil se ilustra en la figura 9, en donde se presentan las cantidades producidas por estados en el año 2018, en toneladas, el área cosechada en hectáreas y se muestra la ubicación de los estados en el país.

Figura 9

Producción de biomasa residual de aceite de palma en Brasil para el 2018



Nota: En el mapa se muestra la ubicación geográfica de cada estado, junto con el área cosechada y producción de biomasa durante el 2018.

4.2. Composición fisicoquímica de la biomasa

La posible aplicación de la biomasa residual depende de sus características, tanto físicas como químicas, por ende, es de gran importancia conocerlas y analizarlas; en la Tabla 3 se presenta la agrupación por rangos de dichas composiciones.

Tabla 3

Composición fisicoquímica por tipo de biomasa.

| Componentes\partes | Cáscara | Fibra | Raquis | Referencia |
|------------------------------------|---------------|-------------|--------------|---|
| Características físicas | | | | |
| Composición física | | | | |
| Humedad (%) | 11,0-13,0 | 35,0-48,0 | 66,0-69,0 | (Soh Kheang, 2016)(Sukiran |
| Volátiles (%) | 82,7-84,4 | 84,0-85,6 | 86,5-87,7 | et al., 2017)(Loh, 2016) |
| Características químicas | | | | |
| lignina (%) | 48-49,58 | 21,79-24 | 10,23-15 | (Garcia-Nunez et al., |
| Celulosa (%) | 26-30,28 | 30-33,21 | 43-44,97 | 2016)(Sánchez Torres, |
| Hemicelulosa (%) | 12,72-19 | 16,58-21 | 19,92-21 | 2014)(García et al., 2010) |
| Cenizas (%) | 1,4-4,8 | 5,0-7,4 | 3,7-5,3 | (Sukiran et al., 2017)(Loh, 2016)(Soh Kheang, 2016) |
| Composición elemental | | | | |
| C (%) | 45,74-48,68 | 44,97-51,52 | 41,61-47,65 | |
| N (%) | 0,25-1,17 | 0,45-1,89 | 0,25-1,82 | (Shuit et al., 2009)(Idris et |
| H (%) | 4,77-5,86 | 5,45-6,99 | 5,2-7,13 | al., 2012)(Clasificación ECN |
| S (%) | 0,06-0,202 | 0,09-0,23 | 0,21-0,98 | Phyllis, 2011) |
| O (%) | 42,01-47,19 | 40,91-43,58 | 39,89-44,97 | |
| Elementos traza | | | | |
| Na (mg kg-1) | 10,8-13,3 | 32,9 | 102,3 | |
| Mg (mg kg-1) | 250,7-262,7 | 1509,5 | 913,1 | |
| Al (mg kg-1) | 31,7-336,5 | 1216,3 | 802,1 | (Sánchez Torres, |
| P (mg kg-1) | 111,9-115 | 594,9 | 572,7 | 2014)(Garcia-Nunez et al., |
| K (mg kg-1) | 1477,7-1557,5 | 5188,3 | 5574-22289,2 | 2016) |
| Ca (mg kg-1) | 160,8-173,7 | 1771,6 | 173,7-889,3 | |
| Fe (mg kg-1) | 56,3-337,9 | 1239,4 | 320,4-812,4 | |
| Características energéticas | | | | |

| | | | | |
|-------------------------|-------------|--------|-------------|-------------------------|
| Poder calorífico | 20090-21500 | 19060- | 17500-19000 | (Soh Kheang, 2016)(Loh, |
| (KJ/Kg) | | 19700 | | 2016)(Van Dam, 2016) |

Nota: En la tabla, se detallan las características físicas, químicas y energéticas, organizadas por rango, para cada tipo de biomasa

4.2.1. Características físicas

4.2.1.1. Descripción física de los tipos de residuos.

- **Raquis:** Es voluminoso, lignocelulósico y fibroso, posee una estructura de elevada dureza, tronco central con ramificaciones a manera de espinas, su tamaño depende de la edad y calidad de la palma (Santos Veas, 2018); cuenta con una forma ovoide y contiene 1% a 2.5% de aceite vegetal impregnado, producto de la separación física de los frutos en el proceso de esterilización (García Carrillo, 2016). Son ricos en potasio, nitrógeno, fósforo, magnesio, polisacáridos y polímeros (Ramirez-Contreras et al., 2011).
- **Fibra del mesocarpio:** Se obtiene en grandes cantidades y cuenta con una apariencia desmenuzada, delgada y fibrosa (R. Torres et al., 2004)(Cecilia et al., 2019). Además, posee un aceite residual del 10% del total de la fibra (Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, 2019).
- **Cáscara de la semilla:** Son residuos lignocelulósicos, por lo general contienen impurezas, como restos de almendra y trozos de tallos, que deben ser eliminados antes de darle una disposición final; presenta una dureza y densidad elevada, además de un bajo contenido de humedad (Antonio Sánchez Alfonso et al., 2017).

4.2.1.2. Contenido de humedad. Representa la cantidad de agua presente en la biomasa y es considerado un factor crítico para el desarrollo de biocombustibles, ya que

determina la energía que se puede generar en el proceso de combustión. Para actividades de quema de biomasa, inicialmente se debe evaporar el agua contenida en el residuo, por tal razón, entre más alto es el contenido de humedad, presenta un menor poder calorífico (Isern Hidalgo, 2014), debido a esto, se observa que la cáscara posee un menor contenido de humedad y mayor poder calorífico en comparación con el raquis, que tiene poder calorífico bajo y contenido de humedad elevado, por esto, es común quemar la cáscara y fibra en las calderas para producir energía.

4.2.1.3. Contenido de material volátil. Hace referencia a los componentes liberados en el proceso de descomposición termoquímica que ocurre debido al aumento de temperatura de la biomasa, es decir, se liberan gases combustibles e inertes. Los valores son elevados, esto ocasiona que los biocombustibles sean fáciles de encender a temperaturas bajas (Rueda Ordóñez & Ibarra Ballesteros, 2017). En la Tabla 3, se confirma lo mencionado anteriormente, resultando altos valores para el contenido de material volátil, lo cual hace que cualquier tipo de biomasa presente un mayor riesgo de combustión espontánea (Société Générale de Surveillance Colombia S.A.S, 2020).

4.2.2. Características químicas

4.2.2.1. Lignina. Polímero ramificado que tiene como función unir las células adyacentes, actuando como puente de unión entre partículas, por tal motivo es un agente aglutinante (Alexandra et al., 2014), además, es una resina amorfa reticulada que forma una matriz irregular de enlaces de hidrógeno, cuya descomposición térmica, presenta mayor estabilidad y es responsable de los carbonatos y volátiles de formación de baja masa molecular (Rueda Ordóñez & Ibarra Ballesteros, 2017).

Según los datos obtenidos, la lignina hace mayor presencia en la cáscara de la semilla, es decir, puede ser aprovechada en la producción de carbonizados, biochar o carbones activados (Millán et al., 2016), por otra parte, el raquis presenta un bajo contenido de lignina (10,23%-15%).

4.2.2.2. Celulosa. Es una macromolécula natural, formada por una cadena lineal de moléculas de glucosa, es el componente principal de la pared celular de las plantas, por lo general es rígida y confiere el soporte de la planta (Chica Castrillón, 2015). Un residuo con un alto contenido de celulosa permite producir un biocombustible de segunda generación, teniendo en cuenta llevar a cabo tratamientos físicos que permitan disminuir el grado de polimerización y cristalinidad, por esto, el tipo de biomasa más apropiada para esta aplicación es el raquis, con un rango de 43% a 44,97% de celulosa (Garea, 2017)(González et al., 2008).

4.2.2.3. Hemicelulosa. Forman cadenas ramificadas de menor grado de polimerización que la celulosa y no tienen zonas cristalinas, además, los puentes de hidrogeno son menos eficaces, lo cual permite que las hemicelulosas sean más accesibles al ataque de reactivos químicos (Barroso Casillas, 2010). En vista de que la hemicelulosa y la celulosa tienen glucosa en su estructura, se diferencian en que la hemicelulosa contiene otros monómeros (Díaz Betancourth, 2007)

En la Tabla 3, se observa que el raquis y la fibra son las que presentan una gran cantidad de azúcares debido a sus altos contenidos de hemicelulosa (19,92%-21% y 16,58%-21%, respectivamente) y celulosa (43%-44,97% y 30%-33,21%, respectivamente) y bajo contenido de lignina (González et al., 2008), por ende, son adecuados para procesos de producción de biocombustibles de segunda generación y otros productos químicos.

La caracterización de los polímeros es importante para la formación de combustibles y la comprensión de la descomposición (Rueda Ordóñez & Ibarra Ballesteros, 2017).

4.2.2.4. Contenido de cenizas. Determina la cantidad de ceniza que se está generando en el proceso; el gran contenido de ceniza puede ocasionar problemas durante la combustión, ya que ocasiona una disminución en la eficiencia térmica y puede absorber la energía debido a altas temperaturas y, por otra parte, puede ocasionar cierta corrosión al interior de los equipos. Los resultados indican que la fibra proporciona una mayor cantidad de cenizas, por ello, la aplicación de estos como fuente de energía en las calderas es limitada dado que puede provocar taponamientos o corrosión en los equipos (Rueda Ordóñez & Ibarra Ballesteros, 2017).

4.2.2.5. Composición elemental. El análisis elemental identifica diferentes características importantes al momento de estudiar las aplicaciones de la biomasa, ya que muestra los elementos atómicos presentes en ella, esta composición varía según el tipo de biomasa y la zona de recolección (Bustamante García et al., 2017).

Se encuentra que se tiene una mayor cantidad de carbono y oxígeno, los cuales son de mayor importancia debido a su impacto energético, en comparación con los porcentajes de hidrógeno, nitrógeno y sulfuros, además, se observa que no hay una variación significativa entre los componentes de los tres tipos de biomasa residual.

4.2.2.6. Elementos traza. Elementos como Na, Mg, Al, P, K, Ca y Fe, juegan un papel importante en el desarrollo de aplicaciones de la biomasa, debido a que es posible conocer las cantidades de dichos elementos, en consecuencia, se estudian las afectaciones o beneficios que conllevan y si es necesario realizar un pretratamiento con el fin de evitar daños a la naturaleza o procesos industriales (Rodríguez Contreras, 2011).

En el caso de la usual aplicación de los raquis en donde se organizan alrededor de las plantaciones para brindar los nutrientes al suelo, es de vital importancia para prevenir que elementos tóxicos puedan perjudicar el cultivo de la palma de aceite.

4.2.3. Características energéticas

4.2.3.1. Poder calorífico superior. Mide la cantidad de energía máxima de un combustible cuando es sometido a una combustión completa en presencia de oxígeno (Société Générale de Surveillance Colombia S.A.S, 2020). Entonces, es posible concluir que entre mayor sea su valor, más energía va a aportar al sistema, según la Tabla 3 es posible afirmar que la cáscara es el mayor contribuyente de dicha energía, por lo tanto, se utiliza principalmente en calderas. Además, es importante el conocimiento de la composición elemental, ya que el poder calorífico está relacionado con la cantidad de calor que se obtiene en una reacción química de combustión completa (García San José, 2001).

4.3. Prácticas de gestión y aprovechamiento de residuos

4.3.1. Usos actuales

En países como Colombia y Brasil, la gestión de la biomasa producto de la extracción de aceite de palma es muy similar. Los raquis constituyen el subproducto más voluminoso; ha sido utilizado como combustible en calderas (García et al., 2010) en una pequeña cantidad, aunque su principal uso, ha sido como fertilizante orgánico incrementando el contenido de materia orgánica de suelos cultivados con palma aceitera (Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2018); sin embargo, en la zona oriental colombiana esta práctica ha presentado inconvenientes, debido a que la disposición de los raquis en las plantaciones genera la proliferación de la mosca de los establos (*Stomoxys calcitrans*). Dicha mosca ataca al ganado cercano a las plantaciones ocasionándole problemas sanitarios, es por ello que el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) emitió un plan de manejo de la mosca para llevar su presencia a niveles bajos y mantener el control (Ramirez-Contreras et al., 2015).

Por otra parte, la fibra del mesocarpio es el subproducto más aprovechado, especialmente, como combustible en calderas (García et al., 2010) debido a su alto poder calorífico, además, proporciona gran cantidad de nutrientes al ser usado como fertilizante orgánico (Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2018), sin embargo, se ha prestado poca atención a su uso de valor agregado; solo cuando se dispone de un combustible alternativo económico, esta fibra puede encontrar nuevas salidas (Van Dam, 2016).

La cáscara de la semilla ha sido el subproducto con mayor variedad de usos, ha sido ampliamente utilizado como combustible para calderas (Ramirez-Contreras et al., 2015), además, es el único material que se destina para la venta a otras industrias, como combustible sustituto del carbón; para procesos de compostaje y como acondicionador en las vías de plantaciones (García et al., 2010).

Actualmente, el suministro de biomasa como combustible en calderas, ha sido una alternativa de disposición, ante la falta de opciones para su aprovechamiento en otros usos (García et al., 2010).

4.3.2. Posibles usos

Además de las prácticas convencionales dadas a la biomasa generada en plantas de beneficio, se han estudiado nuevas tecnologías para la generación de productos de valor agregado, aunque no se han implementado completamente ya que deben mostrar su viabilidad económica y financiera, así como su carácter social y ambientalmente sostenible (García-Núñez et al., 2016). Entre ellos se encuentran la fabricación de pellets y briquetas, producción de etanol celulósico, biochar, carbón activado, bioaceites, torrefacción, gas de síntesis, pulpa y papel, entre otros.

4.3.2.1. Pellets y briquetas. Diversos estudios han evaluado la densificación de biomasa para la producción de pellets y briquetas con raquis, fibra y cáscara de la semilla; este procedimiento es necesario debido a que transportar sólidos de baja densidad, como la biomasa húmeda, es más costoso (Ramirez-Contreras et al., 2015).

Los pellets y briquetas de biomasa de palma son combustibles ecológicos que pueden tener uso doméstico o en grandes plantas de conversión de energía termoquímica, como las calderas de combustión de biomasa (Soh Kheang, 2016).

Esta tecnología comprende tres etapas principales: secado de la biomasa para reducir la humedad, reducción del tamaño de partícula y compactación en extrusoras de pistón o rodillos. Para los diferentes procesos de densificación de biomasa se deben tener en cuenta los factores que influyen en el proceso, siendo la humedad, el factor más importante, ya que ésta ayuda a la compresión y compactación, además, funciona como lubricante disminuyendo la fuerza de aplicación y reduciendo el desgaste de la matriz en el proceso de extrusión de briquetas (Quintero Lopez, 2017).

Entre las ventajas competitivas de la producción de pellets y briquetas para el sector palmicultor, se encuentran: la disponibilidad y concentración de la biomasa en la planta de beneficio y el compromiso con la sostenibilidad ambiental. Por otra parte, la densificación es una alternativa para mejorar las propiedades de la biomasa generada y crear productos más estables y con mayor posibilidad de incursión en el mercado (Rodríguez et al., 2014); sin embargo, aunque se ha estudiado el montaje de biorrefinerías con producción de pellets (Ramirez-Contreras et al., 2015), representa una inversión de una nueva línea de planta, provocando así, costos elevados.

4.3.2.2. Etanol celulósico. Se ha investigado el potencial de varias materias primas para la producción de etanol de segunda generación. Éste biocombustible, mejor conocido como

“etanol celulósico” difiere de los biocombustibles de primera generación porque no se produce a partir de azúcares fácilmente extraíbles, sino a partir de la celulosa y hemicelulosa contenida en la biomasa (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, 2007).

El raquis de palma se considera un residuo lignocelulósico con alto potencial para la producción de etanol de segunda generación, por su alto contenido de celulosa y hemicelulosa (Castillo, 2016)(Agricultura & ganadería, 2020). Para convertir eficientemente la biomasa lignocelulósica en azúcares, es necesario someter la materia prima a procesos de hidrólisis, lo que consiste en descomponer con moléculas de agua las estructuras de la celulosa y hemicelulosa para obtener cadenas de glucosa y pentosa. El siguiente paso es la fermentación, que consiste en convertir los azúcares obtenidos en etanol, mediante el uso de levaduras; se utilizan diferentes especies entre las que se destacan *Saccharomyces cerevisiae*, *Kluyveromyces fragilis*, *Torulaspora* y *Zymomonas mobilis*, siendo los microorganismos responsables de la fermentación (Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, 2007)(Agricultura & ganadería, 2020).

La Empresa Colombiana de Petróleos, Ecopetrol, a través de su centro de investigación, el Instituto Colombiano del Petróleo, ICP, adelanta una línea de investigación enfocada en la producción de etanol carburante a partir de biomasa residual, destacándose como uno de los principales productores, el sector palmero. Se ha realizado una evaluación de tecnologías de producción de etanol con raquis de palma, desde la escala de laboratorio, hasta la escala de planta piloto (9.000 litros), con el objeto de encontrar las mejores condiciones operacionales para los procesos de pretratamiento e hidrólisis de las biomásas seleccionadas (Castillo, 2016), sin embargo, a pesar de los estudios y pruebas realizadas, este proceso no ha sido establecido como una práctica de gestión de estos residuos.

4.3.2.3. Biochar. El biocarbón (biochar) es un carbón vegetal estable y altamente poroso obtenido mediante la descomposición térmica de materia orgánica bajo un entorno con suministro de oxígeno limitado y ante temperaturas medias ($<700^{\circ}\text{C}$), puede ser producido a partir de un sinfín de materias primas orgánicas y bajo una gran variedad de condiciones de carbonización que le otorgan características químicas particulares (Guerra Laura, 2015). El biocarbón, por ser una forma recalcitrante de carbono, actúa como reservorio de larga duración de este elemento, retardando su retorno a la atmósfera como dióxido de carbono, ayudando a mitigar el cambio climático (Escalante et al., 2016).

En la mayor parte de los estudios, las metodologías seguidas para la producción de biochar se han centrado en el proceso de pirólisis y en menor grado, en el proceso de gasificación (Guerra Laura, 2015). Dentro de los principales residuos de la industria palmera se encuentra la cáscara de la semilla, la cual posee características atractivas para su aprovechamiento térmico, como es el alto contenido de carbono, bajo nivel de cenizas, estabilidad de almacenamiento, dureza adecuada y bajo contenido de volátiles (Antonio Sánchez Alfonso et al., 2017).

La pirólisis es un proceso de degradación térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno en una atmósfera inerte, típicamente de argón, helio o nitrógeno (Carranza Rojas, 2015). Existe pirólisis lenta y rápida, sin embargo, esta última está típicamente reservada para la producción de energía (Guerra Laura, 2015). El enfoque principal de la pirólisis lenta es la producción de biochar, aunque irá acompañado por productos líquidos y gases que no necesariamente son recuperados. El proceso se caracteriza por trabajar con velocidades lentas de calentamiento, tiempos de residencia largos y temperatura de producción cercana a los 400°C (Guerra Laura, 2015).

Numerosos estudios a nivel de laboratorio, han llevado a cabo este proceso experimental con el fin de evaluar el efecto de cada variable en el rendimiento y calidad del producto final, aunque en la actualidad, no existe ninguna planta productiva en la que se lleve a cabo este tratamiento de residuos.

4.3.2.4. Carbón activado. Es un producto carbonoso con estructura porosa desarrollada y elevada área superficial que, por medio del proceso de adsorción, atrapa en su superficie una alta gama de moléculas (Gómez et al., 2004); es un material versátil con un sinnúmero de aplicaciones como la purificación de agua, de oro, tratamiento de aguas residuales, filtros de aire, y otros (Agudelo Álvarez, 2017).

Entre las propiedades que debe tener una materia prima para la producción de carbón activado se cuentan su abundancia, su dureza, una estructura inherente de poros, alto contenido de carbono, bajo contenido de ceniza y alto rendimiento en masa durante el proceso de carbonización, así, la cáscara de la semilla de palma de aceite, reúne dichas propiedades necesarias (Gómez et al., 2004). El proceso productivo del carbón activado se realiza a través de dos rutas principales: por medio del uso de gases de reacción para el carbono, proceso que también es conocido como activación térmica o física, y por medio de activación química (Klose et al., 2010).

En la fabricación de carbón activado se realizan pretratamientos a la materia prima que incluyen las siguientes etapas: molienda, tamizado, oxidación, peletizado y secado. Posteriormente, se realizan procesos térmicos que incluyen la carbonización de la materia prima y su gasificación parcial o activación. Estos dos procesos pueden realizarse de manera simultánea o separada, lo que se designa como proceso de activación en una o dos etapas, respectivamente (Gómez et al., 2004).

Con la necesidad de nuevas tecnologías de energías renovables, se han realizado gran cantidad de estudios con pruebas a nivel de laboratorio, evaluando el potencial de la biomasa de palma de aceite, aunque en Colombia y Brasil, este tipo de tecnología no ha logrado establecerse como un método de gestión de residuos.

4.3.2.5. Bioaceites. La transformación de residuos agroindustriales en combustibles líquidos y gaseosos se puede realizar por procesos termoquímicos como la pirólisis y la gasificación. El proceso de pirólisis rápida ha ganado interés por su alto rendimiento en conversión de líquidos, produciendo aceites pirolíticos, conocidos también como bioaceites (Sánchez Torres, 2014)(Arteaga et al., 2012).

Fundamentalmente, la pirólisis implica el calentamiento de materiales orgánicos a temperaturas superiores a 400°C en ausencia de oxígeno, los materiales orgánicos se descomponen térmicamente liberando una fase de vapor y una fase sólida residual. Al enfriar el vapor de pirólisis, los compuestos polares y de alto peso molecular se condensan como líquido (bioaceite), mientras que los compuestos volátiles de bajo peso molecular permanecen en la fase gaseosa (Laird et al., 2009).

El bioaceite tiene muchas aplicaciones en el campo de la energía y los combustibles, ya que este puede ser usado como precursor de otros compuestos químicos y ha sido probado para aplicaciones en calderas, hornos, turbinas y motores para la generación de calor, electricidad y vapor (Arteaga et al., 2012).

Se han llevado a cabo algunas pruebas de laboratorio con el fin de determinar el rendimiento y las condiciones óptimas del proceso de pirólisis para obtener productos de mejor calidad, sin embargo, se deben evaluar los costos y beneficios económicos que se podrían obtener mediante la implementación de éste tratamiento de residuos.

4.3.2.6. Torrefacción. La torrefacción es un tratamiento suave de biomasa a 200 – 300°C bajo presión atmosférica en ausencia de oxígeno o aire para tratar subproductos orgánicos para conversión térmica. Este pretratamiento ha sido recomendado como una forma eficiente de mejorar las propiedades de los biocombustibles sólidos al eliminar agua, reducir el rango higroscópico y aumentar la molturabilidad; durante el proceso, las paredes celulares se degradan y la naturaleza del producto resultante es intermedia entre la madera y el carbón (Sukiran et al., 2017).

La torrefacción se ha convertido en un tratamiento de interés ya que representa un paso importante de preprocesamiento para mejorar la calidad de la biomasa en términos de propiedades físicas y composiciones químicas. La reducción de la humedad y compuestos orgánicos volátiles de bajo peso de la biomasa, la convierten en un producto sólido hidrófobo, fácil de transportar debido a que es suave y seco (Sukiran et al., 2017)(Talero Rojas et al., 2017).

Se han realizado pruebas con el fin de torrefactar biomasa de algunas zonas, aunque no se ha sido una práctica constante, se requiere establecer una línea productiva, implicando altos costos que deben ser evaluados antes de implementar este proceso.

4.3.2.7. Pulpa y papel. Se ha estudiado la producción de pulpa papelera con materia prima a bajo costo, a partir de la biomasa residual proveniente del proceso de extracción de palma de aceite. Existen diversos métodos de cocción de biomasa para liberar fibras (método Pulpa Kraft, Antraquinona Kraft y Steam Explosion); la duración y temperatura de cocción son decisivas para asegurar la firmeza de dichas fibras (Hassan et al., 1998)(Quintana et al., 2008). De los tres tipos de pulpa obtenida de la biomasa de palma, el perfil más prometedor es el correspondiente a los raquis, debido a que el papel cuenta con buena firmeza al desgarrar, soporta golpes, posee buena opacidad, volumen, pliegue y formación (Hassan et al., 1998).

Para la implementación de este proceso, se requiere realizar una inversión de un molino de pulpa, además de ejecutar experimentaciones de planes piloto con el fin de determinar el método de producción más viable económica y ambientalmente.

4.3.2.8. Gas de síntesis. Es un gas rico en hidrógeno y monóxido de carbono que encuentra uso en gran variedad de aplicaciones energéticas y como materia prima en la industria química (Universidad Nacional de Colombia, 2020).

La cáscara de la semilla de palma de aceite posee una alta densidad, alto contenido de carbón y bajo contenido de cenizas, por lo que se convierte en una materia prima apta para la obtención de gas de síntesis (Antonio Sánchez Alfonso et al., 2017). Este gas se produce mediante gasificación; la biomasa es sometida con un agente reactivo que puede ser aire, oxígeno, agua o gas carbónico, a presión atmosférica, entre 850 – 900°C, generando como producto principal el gas de síntesis, compuesto principalmente por hidrógeno y monóxido de carbono, además de otros gases menores (Antonio Sánchez Alfonso et al., 2017)(Bula & Cujia, 2010).

El aprovechamiento de la cáscara de la semilla de palma de aceite es reducido, es por ello que la producción de gas de síntesis representa una buena alternativa de uso para este residuo, sin embargo, no se han realizado más que pruebas de laboratorio y artículos científicos, es necesaria la ejecución de pruebas piloto, con el fin de determinar las condiciones de operación más adecuadas económica y ambientalmente, para la obtención de un producto de calidad.

En la tabla 4, se presenta un resumen de los usos posibles mencionados anteriormente, en la cual se menciona la materia prima o residuo utilizado, la técnica usada y el grado de avance de cada estudio.

Tabla 4

Síntesis de los posibles usos para la biomasa residual de la extracción de aceite de palma

| Aplicación | Materia prima | Técnica | Avances |
|----------------------------|-------------------------|----------------------------------|---|
| Pellets y briquetas | Raquis, cáscara o fibra | Densificado y prensado | Nivel de laboratorio |
| | | | Representación esquemática de una biorrefinería, integrando la producción de pellets (2015) |
| Etanol celulósico | Raquis | Fermentación por levaduras | Programa experimental de laboratorio |
| | | | Pruebas piloto a 9000 L (ECOPETROL, 2015) |
| Biochar | Cáscara y fibra | Pirólisis lenta y gasificación | Nivel de laboratorio |
| Carbón activado | Cáscara | Gasificación | Nivel de laboratorio |
| Bioaceites | Cáscara | Pirólisis rápida | Nivel de laboratorio |
| Torrefacción | Raquis y fibra | Tratamiento termoquímico | Nivel de laboratorio |
| Pulpa y papel | Raquis y fibra | Pulpeo químico alcalino con NaOH | Nivel de laboratorio |
| Gas de síntesis | Cáscara | Gasificación | Nivel de laboratorio |

Nota: En la tabla se muestra una síntesis de las posibles técnicas de gestión para la biomasa residual, se especifica la materia prima, técnica y grado de avance para cada una de ellas.

5. Conclusiones

La producción de biomasa residual de palma de aceite se estimó de la información obtenida de fuentes gubernamentales; mediante la realización de un balance de masa que hizo posible cuantificar cada tipo de residuo. En Colombia, la generación de desechos en el 2018 fue de 3'966.526 toneladas, evidenciando un crecimiento del 33,3% desde el año 2016 principalmente en las zonas oriental y central; por otra parte, en Brasil, la producción de dicha biomasa en el 2018 fue de 688.476 toneladas, la cual ha presentado una disminución del 5% en comparación con el 2016, debido a la restricción establecida para el cultivo de palma de aceite impuesta por la Agencia de Investigación Agrícola de Brasil, a causa del aumento de la deforestación en los bosques naturales de la Amazonía.

La composición fisicoquímica evidenció que la cáscara y la fibra poseen un menor contenido de humedad, el cual favorece la quema de éstas para la producción de energía en calderas, además, el contenido de material volátil presenta valores elevados para los tres tipos de biomasa representando un mayor riesgo de combustión espontánea; por otra parte, la cáscara presenta mayor cantidad de lignina, lo que permite su aprovechamiento en la producción de carbonizados o carbones activados y por su parte, el raquis y la fibra poseen un alto contenido de celulosa y hemicelulosa, siendo adecuados para la producción de biocombustibles; además, el uso de la fibra debe ser limitado por su elevado contenido de cenizas, lo cual ocasiona taponamiento y corrosión en los equipos.

Los tres tipos de biomasa presentan una composición elemental similar, mostrando una mayor cantidad de carbono y oxígeno, siendo estos importantes debido al impacto energético; también se presentaron los elementos traza en cada tipo de biomasa, cuya información indica si pueden provocar afectaciones o beneficios a las posibles aplicaciones de los residuos y finalmente, la cáscara posee un elevado poder calorífico siendo el tipo de biomasa que mayor energía aporta al sistema en procesos de combustión.

Por medio de la búsqueda activa de información de la gestión actual de los residuos en países como Colombia y Brasil, se encontró que el principal uso dado al raquis ha sido como fertilizante orgánico, debido a los diversos nutrientes que puede brindar al suelo; a su vez, la fibra principalmente se usa como combustible en calderas debido al alto poder calorífico y la cáscara presentó variedad en la gestión como combustible para calderas e incluso para la venta a otras industrias.

Se encontraron diversas aplicaciones dadas a los residuos en países productores del aceite de palma, algunas de ellas presentan diferentes grados de avance; entre ellas, la de mayor desarrollo ha sido la producción de etanol celulósico que alcanzó la etapa de prueba piloto; por otra parte, se han realizado estudios interesantes para torrefactar la biomasa de algunas zonas de Colombia y, por el contrario, aplicaciones como producción de pellets y briquetas, biochar, carbón activado, entre otros, no han superado la escala de laboratorio.

6. Recomendaciones

Se recomienda realizar una caracterización de la biomasa antes de continuar con estudios posteriores, con el fin de confrontarla con los datos reportados en la literatura y así, establecer el mejor procedimiento para cada material.

Se recomienda llevar a cabo más estudios a escala piloto con el objetivo de analizar la factibilidad técnica de las alternativas de gestión mencionadas.

Referencias bibliográficas

Agricultura & ganadería. (2020). *Con la tusa de la palma de aceite se produce etanol.*

<https://www.agriculturayganaderia.com/website/con-la-tusa-de-la-palma-de-aceite-se-produce-etanol/>

Agudelo Álvarez, B. L. (2017). *Estandarización de proceso de producción de carbón activado por activación física a partir del cuesco de palma a escala industrial.* (Vol. 4). Fundación Universidad de América.

Alexandra, Y., Castillo, G., Nathalíe, S., Rincón, R., De Jesús, G., Vargas, C., Dévora Isiordia, G. E., Emiro, F., & Vargas, S. (2014). Caracterización de Materiales lignocelulósicos residuales de palma de aceite y palma de coco para la fabricación de pellets. *AVANCES Investigación En Ingeniería*, 11(1), 1794–4953.
<http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances-11/art9.pdf>

Antonio Sánchez Alfonso, R., Armando Duran Peralta, H., Marcela Aguiar Urriago, L., Uribe Aldana, N., & Yuri Viviana Rojas Forero, A. (2017). Modelo para la gasificación del cuesco de palma aceitera. *Ingenium*, 18(36), 81–100.

Arteaga, J. C., Arenas, E., López, D., Sánchez, C. M., & Zapata, Z. (2012). Obtención de biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(2), 144–151.

Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma. (2015^a). *A palma no Brasil e no mundo.*
<http://www.abrapalma.org/pt/a-palma-no-brasil-e-no-mundo/>

- Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma. (2015b). *Marco legal | ABRAPALMA*
– *Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma*.
<http://www.abrapalma.org/es/marco-legal/>
- Barroso Casillas, M. (2010). Pretratamiento De Biomasa Celulosica Para La Obtención De Etanol En El Marco De Una Biorrefineria. *Universidad Politécnica de Madrid*, 117.
http://oa.upm.es/10559/1/MIGUEL_BARROSO_CASILLAS.pdf
- Bula, A., & Cujia, G. (2010). Potencial obtención de gas de síntesis para la producción de metanol a partir de la gasificación de residuos de palma africana. *Interciencia*, 35(2), 106–112.
- Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., & Hernández Díaz, J. C. (2017). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(38), 5–24.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i38.8>
- Carranza Rojas, E. M. (2015). *Pirólisis de la fibra de palma africana de aceite* (Vol. 151). Universidad de los Andes.
- Castillo, E. (2016). Producción de etanol celulósico a partir de las tusas de palma: perspectiva de Ecopetrol. *Revista Palmas*, 37(Especial Tomo II), 115–118.
- Cecilia, A., Vergel, A., Stefan, D., Fuentes, V., & Valencia, R. (2019). Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual obtenida a partir de la palma de aceite (*Eleaenis Guinnensis*) para posibles usos en la elaboración de tableros de partículas. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 17(1), 59–64.
<https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2019.3151>

Chica Castrillón, I. C. (2015). *Caracterización del material compuesto Raquis - Cemento*. Universidad de los Andes.

Clasificación ECN Phyllis. (2011). Phyllis 2. [https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis#oil palm](https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis#oil%20palm)

Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite. (2019). Generación de nuevos ingresos transformando residuos del proceso de extracción en alimento para animales. XV *Reunión Técnica Nacional de Palma de Aceite*.

Del Hierro, E. (1993). Aprovechamiento de los subproductos de palma de aceite. *Revista Palmas*, 14(10), 149–153.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2012). *Cuenta satélite piloto de la agroindustria de la palma de aceite: Palma en desarrollo, en producción y su primer nivel de transformación 2005-2010* (Vol. 3). Dirección de síntesis y cuentas nacionales.

Díaz Betancourth, D. P. (2007). *Hidrólisis enzimática de la tusa de la palma de aceite (Elaeis Guineensis Jacq.) pretratada con ácido sulfúrico diluido para la producción de azúcares fermentables*. Universidad de los Andes.

Díaz Muegue, L. C. (2017). *Remediación de suelos alterados por actividad de minería del carbón a cielo abierto, mediante aplicación de biochar procedente de residuos biomásicos de la palma de aceite en la zona carbonífera del departamento del Cesar*. Universidad de Antioquia.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2019). *Produção agrícola municipal - IBGE*. <https://www.embrapa.br/agropensa/producao-agricola-municipal>

- Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E., & Etchevers, J. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34, 367–382. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2007). Palma de aceite, la planta más productiva para la elaboración de etanol. 423, 8–9. <http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmicultor/article/view/8744/8735>
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2013). *La experiencia de Malasia en el aprovechamiento de la biomasa de palma de aceite*. 1–23.
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2018). Balance económico del sector palmero colombiano en 2017. In *Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite*. http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/BET_MARZO_2018_baja_calidad.pdf
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2019^a). *Anuario estadístico 2019*. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/1452/La_agroindustria_de_la_palma_de_aceite_en_Colombia_y_en_el_mundo_2014-2018
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2019b). *La palma de aceite en Colombia*. <http://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos>
- Forero Núñez, C., Castellanos Contreras, J., & Sierra Vargas, F. (2013). Control de una planta prototipo de gasificación de biomasa mediante redes neuronales. *Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo*, 4(5), 161–168.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-73812013000200003&script=sci_arttext&tlng=pt

Galindo Castañeda, T., & Romero, H. M. (2012). Compostaje de subproductos de la agroindustria de palma de aceite en Colombia: estado del arte y perspectivas de investigación. *Cenipalma*, 31, 1–53.

García-Núñez, J. A., Ramírez-Contreras, N. E., Rodríguez, D. T., Silva-Lora, E., Frear, C. S., Stockle, C., & García-Pérez, M. (2016). Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents. *Resources, Conservation and Recycling*, 110, 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.022>

García Carrillo, A. L. E. (2016). *Evaluación del material orgánico impregnado con efluentes derivados de la industrialización de palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq.) para su aprovechamiento como abono en el cultivo, diagnóstico y servicios prestados en Nacional Agro Industrial S.A.* Universidad de San Carlos de Guatemala.

García, J. A., Cárdenas, M., & Yáñez, E. E. (2010). Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas*, 31(2), 41–48.

García Nuñez, J. A. (2013). Nuevos conceptos para biorrefinerías de aceite de palma. *Palmas*, 34(Especial, Tomo II), 66–84.

García San José, R. (2001). Combustión y combustibles. *Teoría de La Combustión*, 4–9. <https://doi.org/10.3989/mc.1961.v11.i102.1890>

Garea, A. (2017). Estudio de la obtención de bioetanol a partir de diferentes tipos de biomasa lignocelulósica. Matriz de reacciones y optimización. In *Escuela politécnica de ingeniería*

de minas y energía (Vol. 1, Issue Septiembre). Universidad de Cantabria.

- Gisela, M. A., Beatriz, E. J. C., Ana, M. V. E., Marcos, A. C. O., Conrado, G. G., & Lydia, T. P. (2016). Experiencias de aprovechamiento de residuos para la generación de biodiésel en Colombia y México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(Especial Residuos Sólidos), 77–90. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.06>
- Gómez-Soto, J. A., Sánchez-Toro, Ó. J., & Matallana-Pérez, L. G. (2019). Residuos urbanos, agrícolas y pecuarios en el contexto de las biorrefinerías. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(53), 7–32. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9705>
- Gómez, A., Klose, W., & Rincón, S. (2008). *Pirólisis de Biomasa: Cuesco de palma de aceite*.
- Gómez, A., Klose, W., Rincón, S. L., & Wiest, W. (2004). Proceso de producción de carbón activado a partir de cáscaras de palma de aceite en un horno rotatorio y su aplicación en la limpieza de NO. *Revista Palmas*, 25(2), 461–471.
- Gómez Vanegas, N. A. (2015). *Aprovechamiento del subproducto lignocelulósico raquis, procedente de la extracción de aceite de palma para la producción de bioetanol*. Universidad de Antioquia.
- González, A. F., Jiménez, I. C., Restrepo, S., & Gómez, J. M. (2008). Biocombustibles de segunda generación y Biodiesel: Una mirada a la contribución de la Universidad de los Andes. *Revista de Ingeniería*, 28, 70–82. <https://doi.org/10.1211-4993>
- Grande Tovar, C. D. (2016). Valoración biotecnológica de residuos agrícolas y agroindustriales. In *Universidad de San Buenaventura*. <http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/4588/1/9789588785813.pdf>

- Guerra Laura, P. A. (2015). Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana. In *Universidad Nacional Agraria La Molina*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Hassan, K., Wahid, B., Amirudin, N., Sukaimi, J., Darus, A., & Ramli, R. (1998). Pulpa y papel hechos de fibras de palma de aceite. *Palmas*, *19*(2), 67–69.
- Idris, S. S., Rahman, N. A., & Ismail, K. (2012). Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). *Bioresource Technology*, *123*(2012), 581–591. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.065>
- Induagro. (2014). *Proceso productivo de aceite de palma*. <http://www.induagro.com.mx/HOMEAP/ProcProductAP/ProcProductAP.html>
- Isern Hidalgo, X. (2014). La humedad en la biomasa : herramientas de medida y control. *Energética XXI*.
- Khalid, H., Zakaria, Z. Z., & Anderson, J. M. (2000). Cuantificación de la biomasa de la palma de aceite y su valor nutritivo en una plantación desarrollada. *Revista Palmas*, *21*(1), 67–77.
- Klose, W., Rincón, S., & Gómez, A. (2010). *Carbón activado de cuesco de palma*.
- Laird, D. A., Brown, R. C., Amonette, J. E., & Lehmann, J. (2009). Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *6*(3), 246–256. <https://doi.org/10.1002/bbb.169>
- Loh, S. K. (2016). 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>
- Mendoza Gómez, D. S. (2014). Residuos de palma africana purifican agua y aire. *UN Periódico*, 1.
- Millán, R., María, L., Domínguez, C., Alejandra, M., Vargas, S., & Emiro, F. (2016). Effect of temperature on energy potential of pyrolysis products from oil palm shells. *Tecnura*, 20(48), 89–100. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a06>
- Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. (2018). *Diagnóstico da Produção Sustentável da Palma de Óleo* (1st ed.). http://www.abrapalma.org/pt/wp-content/uploads/2018/06/DIAGNOSTICO_PALMA.pdf
- Molina Navarro, L. (2018). *La producción de palma se mantuvo constante en 2018 respecto a 2017 | Finagro*. <https://www.finagro.com.co/noticias/la-producción-de-palma-se-mantuvo-constante-en-2018-respecto-2017>
- Onoja, E., Chandren, S., Abdul Razak, F. I., Mahat, N. A., & Wahab, R. A. (2019). Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Biomass in Malaysia: The Present and Future Prospects. *Waste and Biomass Valorization*, 10(8), 2099–2117. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0258-1>
- Quintana, G. C., Arroyave, M. S., & Suárez, D. E. (2008). Obtención de pulpa a partir de los residuos de palma africana pretratados con Steam Explosion. *V Congreso Iberoamericano de Investigación En Celulosa y Papel*, 1–8.
- Quintero Lopez, L. A. (2017). *Evaluación del potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar*.

Universidad de Manizales.

Ramirez-Contreras, N. E., Arévalo S, A., & Garcia-Nuñez, J. A. (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. <http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11644/11636>

Ramirez-Contreras, N. E., Ramírez, Á. S. S., González, E. M. G., & Yañez A., E. E. (2011). Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. *CENIPALMA*, 30, 1–46. <https://doi.org/10.5897/AJB11.3582>

Ramos Escalante, G., Ley de Coss, A., Arce Espino, C., Escobar España, J. C., Raj Aryal, D., Pinto Ruiz, R., Guevara Hernández, F., & Guerra Medina, C. E. (2018). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el trópico húmedo de Chiapas, México. *Agrociencia*, 52(5), 671–683.

Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario de Colombia. (2018). *Producción Nacional por Departamento*. <https://www.agronet.gov.co/Paginas/ProduccionNacionalDpto.aspx>

Rincón Rincón, S. N., & González Castillo, Y. A. (2014). *Estudio de factibilidad para la fabricación de pellets a partir de material lignocelulósico proveniente de palma de aceite*. Universidad libre.

Rodríguez Contreras, M. L. U. A. de M. (2011). *Study of trace metals behaviour during coal and biomass cofi ring in fl uidized bed combustion* [Universidad Autónoma de Madrid]. [file:///D:/Mis documentos/Downloads/45094_contreras_rodriguez_mluisa \(2\).pdf](file:///D:/Mis%20documentos/Downloads/45094_contreras_rodriguez_mluisa%20(2).pdf)

Rodríguez, D. T., Ramírez, N. E., & García, J. A. (2014, February). Pellets y briquetas a partir

de biomasa generada en las plantas de beneficio del fruto de la palma de aceite. *El Palmicultor*, 2.

Rueda Ordóñez, Y. J., & Ibarra Ballesteros, J. C. (2017). *Biomasa para el aprovechamiento energético. Una revisión de la caracterización y los modelos por descomposición termoquímica* (Issue April).

Sánchez Torres, J. V. (2014). *Análisis de la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento del cuesco (Endocarpio del fruto de la palma de aceite) para la producción de biocombustibles en Colombia*. Pontificia Universidad Javeriana.

Santos Veas, M. A. (2018). *Gestión de residuos sólidos orgánicos por técnicas de compostaje en la extractora Teobroma*. Universidad Tecnológica Equinoccial.

Sanz Veiga, A. (1998). La industria de aceite de palma en Brasil. *Revista Palmas*, 19(766), 81–84.

Shuit, S. H., Tan, K. T., Lee, K. T., & Kamaruddin, A. H. (2009). Oil palm biomass as a sustainable energy source: A Malaysian case study. *Energy*, 34(9), 1225–1235.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.05.008>

Société Générale de Surveillance Colombia S.A.S. (2020). *Análisis aproximados y avanzados*.
<https://www.sgs.co/es-es/mining/analytical-services/coal-and-coke/proximate-and-ultimate-analysis>

Soh Kheang, L. (2016). Biocombustibles de segunda generación de la biomasa de palma de aceite. *Revista Palmas*, 37(Especial), 137–148.

Sordi, J. (2019). *Desarrollo rural y conservación en la Amazonía: ¿Un camino hacia la*

sostenibilidad? <https://es.mongabay.com/2019/12/desarrollo-sostenible-palma-aceitera-brasil/>

Sukiran, M. A., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., 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>

Talero Rojas, G. F., Rincón Prat, S. L., & Gonzalez Hassig, A. (2017). Torrefacción de tusa y fibra de palma africana (*Elaeis guineensis*) procedente de los llanos orientales de Colombia. Determinación del efecto de la temperatura de torrefacción en las características de los productos. *Revista Palmas*, *38*(1), 27–49.

Torres, M., & Branford, S. (2018). *La deforestación de la palma aceitera en la Amazonía brasileña está bajo control por ahora*. <https://es.mongabay.com/2018/10/la-deforestacion-de-la-palma-aceitera-en-la-amazonia-brasilena-esta-bajo-control-por-ahora/>

Torres, R., Acosta, Á., & Chinchilla, C. (2004). Proyecto comercial de compostaje de los desechos agroindustriales de la palma aceitera. *Revista Palmas*, *25*(2), 377–387. <https://doi.org/10.3167/fpcs.2007.250209>

Universidad Nacional de Colombia. (2020). *Obtención de gas de síntesis a partir de gasificación de cuesco de palma de aceite* (pp. 25–28).

Van Dam, J. (2016). Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. *Revista Palmas*, *37*(Especial Tomo II), 149–156. http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/Memorias de la XVIII Conferencia Internacional sobre Palma de aceite/M_2_15_ Subproductos de la palma.pdf

Vignote Peña, S. (2016). *La biomasa: importancia, tipos y características y forma de preparación*. November.

Agricultura & ganadería. (2020). *Con la tusa de la palma de aceite se produce etanol*.
<https://www.agriculturayganaderia.com/website/con-la-tusa-de-la-palma-de-aceite-se-produce-etanol/>

Agudelo Álvarez, B. L. (2017). *Estandarización de proceso de producción de carbón activado por activación física a partir del cuesco de palma a escala industrial*. (Vol. 4). Fundación Universidad de América.

Alexandra, Y., Castillo, G., Nathalíe, S., Rincón, R., De Jesús, G., Vargas, C., Dévora Isiordia, G. E., Emiro, F., & Vargas, S. (2014). Caracterización de Materiales lignocelulósicos residuales de palma de aceite y palma de coco para la fabricación de pellets. *AVANCES Investigación En Ingeniería*, 11(1), 1794–4953.
<http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances-11/art9.pdf>

Antonio Sánchez Alfonso, R., Armando Duran Peralta, H., Marcela Aguiar Urriago, L., Uribe Aldana, N., & Yuri Viviana Rojas Forero, A. (2017). Modelo para la gasificación del cuesco de palma aceitera. *Ingenium*, 18(36), 81–100.

Arteaga, J. C., Arenas, E., López, D., Sánchez, C. M., & Zapata, Z. (2012). Obtención de biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(2), 144–151.

Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma. (2015^a). *A palma no Brasil e no mundo*.
<http://www.abrapalma.org/pt/a-palma-no-brasil-e-no-mundo/>

- Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma. (2015b). *Marco legal | ABRAPALMA*
– *Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma*.
<http://www.abrapalma.org/es/marco-legal/>
- Barroso Casillas, M. (2010). Pretratamiento De Biomasa Celulosica Para La Obtención De Etanol En El Marco De Una Biorrefineria. *Universidad Politécnica de Madrid*, 117.
http://oa.upm.es/10559/1/MIGUEL_BARROSO_CASILLAS.pdf
- Bula, A., & Cujia, G. (2010). Potencial obtención de gas de síntesis para la producción de metanol a partir de la gasificación de residuos de palma africana. *Interciencia*, 35(2), 106–112.
- Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., & Hernández Díaz, J. C. (2017). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(38), 5–24.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i38.8>
- Carranza Rojas, E. M. (2015). *Pirólisis de la fibra de palma africana de aceite* (Vol. 151). Universidad de los Andes.
- Castillo, E. (2016). Producción de etanol celulósico a partir de las tusas de palma: perspectiva de Ecopetrol. *Revista Palmas*, 37(Especial Tomo II), 115–118.
- Cecilia, A., Vergel, A., Stefan, D., Fuentes, V., & Valencia, R. (2019). Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual obtenida a partir de la palma de aceite (*Eleaenis Guinnensis*) para posibles usos en la elaboración de tableros de partículas. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 17(1), 59–64.
<https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2019.3151>

Chica Castrillón, I. C. (2015). *Caracterización del material compuesto Raquis - Cemento*. Universidad de los Andes.

Clasificación ECN Phyllis. (2011). Phyllis 2. [https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis#oil palm](https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis#oil%20palm)

Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite. (2019). Generación de nuevos ingresos transformando residuos del proceso de extracción en alimento para animales. XV *Reunión Técnica Nacional de Palma de Aceite*.

Del Hierro, E. (1993). Aprovechamiento de los subproductos de palma de aceite. *Revista Palmas*, 14(10), 149–153.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2012). *Cuenta satélite piloto de la agroindustria de la palma de aceite: Palma en desarrollo, en producción y su primer nivel de transformación 2005-2010* (Vol. 3). Dirección de síntesis y cuentas nacionales.

Díaz Betancourth, D. P. (2007). *Hidrólisis enzimática de la tusa de la palma de aceite (Elaeis Guineensis Jacq.) pretratada con ácido sulfúrico diluido para la producción de azúcares fermentables*. Universidad de los Andes.

Díaz Muegue, L. C. (2017). *Remediación de suelos alterados por actividad de minería del carbón a cielo abierto, mediante aplicación de biochar procedente de residuos biomásicos de la palma de aceite en la zona carbonífera del departamento del Cesar*. Universidad de Antioquia.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2019). *Produção agrícola municipal - IBGE*. <https://www.embrapa.br/agropensa/producao-agricola-municipal>

- Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E., & Etchevers, J. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34, 367–382. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2007). Palma de aceite, la planta más productiva para la elaboración de etanol. 423, 8–9. <http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmicultor/article/view/8744/8735>
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2013). *La experiencia de Malasia en el aprovechamiento de la biomasa de palma de aceite*. 1–23.
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2018). Balance económico del sector palmero colombiano en 2017. In *Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite*. http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/BET_MARZO_2018_baja_calidad.pdf
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2019^a). *Anuario estadístico 2019*. https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario/issue/view/1452/La_agroindustria_de_la_palma_de_aceite_en_Colombia_y_en_el_mundo_2014-2018
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2019b). *La palma de aceite en Colombia*. <http://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos>
- Forero Núñez, C., Castellanos Contreras, J., & Sierra Vargas, F. (2013). Control de una planta prototipo de gasificación de biomasa mediante redes neuronales. *Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo*, 4(5), 161–168.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-73812013000200003&script=sci_arttext&tlng=pt

Galindo Castañeda, T., & Romero, H. M. (2012). Compostaje de subproductos de la agroindustria de palma de aceite en Colombia: estado del arte y perspectivas de investigación. *Cenipalma*, 31, 1–53.

García-Núñez, J. A., Ramírez-Contreras, N. E., Rodríguez, D. T., Silva-Lora, E., Frear, C. S., Stockle, C., & García-Pérez, M. (2016). Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents. *Resources, Conservation and Recycling*, 110, 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.022>

García Carrillo, A. L. E. (2016). *Evaluación del material orgánico impregnado con efluentes derivados de la industrialización de palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq.) para su aprovechamiento como abono en el cultivo, diagnóstico y servicios prestados en Nacional Agro Industrial S.A.* Universidad de San Carlos de Guatemala.

García, J. A., Cárdenas, M., & Yáñez, E. E. (2010). Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas*, 31(2), 41–48.

García Nuñez, J. A. (2013). Nuevos conceptos para biorrefinerías de aceite de palma. *Palmas*, 34(Especial, Tomo II), 66–84.

García San José, R. (2001). Combustión y combustibles. *Teoría de La Combustión*, 4–9. <https://doi.org/10.3989/mc.1961.v11.i102.1890>

Garea, A. (2017). Estudio de la obtención de bioetanol a partir de diferentes tipos de biomasa lignocelulósica. Matriz de reacciones y optimización. In *Escuela politécnica de ingeniería*

de minas y energía (Vol. 1, Issue Septiembre). Universidad de Cantabria.

- Gisela, M. A., Beatriz, E. J. C., Ana, M. V. E., Marcos, A. C. O., Conrado, G. G., & Lydia, T. P. (2016). Experiencias de aprovechamiento de residuos para la generación de biodiésel en Colombia y México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(Especial Residuos Sólidos), 77–90. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.06>
- Gómez-Soto, J. A., Sánchez-Toro, Ó. J., & Matallana-Pérez, L. G. (2019). Residuos urbanos, agrícolas y pecuarios en el contexto de las biorrefinerías. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(53), 7–32. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9705>
- Gómez, A., Klose, W., & Rincón, S. (2008). *Pirólisis de Biomasa: Cuesco de palma de aceite*.
- Gómez, A., Klose, W., Rincón, S. L., & Wiest, W. (2004). Proceso de producción de carbón activado a partir de cáscaras de palma de aceite en un horno rotatorio y su aplicación en la limpieza de NO. *Revista Palmas*, 25(2), 461–471.
- Gómez Vanegas, N. A. (2015). *Aprovechamiento del subproducto lignocelulósico raquis, procedente de la extracción de aceite de palma para la producción de bioetanol*. Universidad de Antioquia.
- González, A. F., Jiménez, I. C., Restrepo, S., & Gómez, J. M. (2008). Biocombustibles de segunda generación y Biodiesel: Una mirada a la contribución de la Universidad de los Andes. *Revista de Ingeniería*, 28, 70–82. <https://doi.org/10.1211-4993>
- Grande Tovar, C. D. (2016). Valoración biotecnológica de residuos agrícolas y agroindustriales. In *Universidad de San Buenaventura*. <http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/4588/1/9789588785813.pdf>

- Guerra Laura, P. A. (2015). Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana. In *Universidad Nacional Agraria La Molina*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Hassan, K., Wahid, B., Amirudin, N., Sukaimi, J., Darus, A., & Ramli, R. (1998). Pulpa y papel hechos de fibras de palma de aceite. *Palmas*, *19*(2), 67–69.
- Idris, S. S., Rahman, N. A., & Ismail, K. (2012). Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). *Bioresource Technology*, *123*(2012), 581–591. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.065>
- Induagro. (2014). *Proceso productivo de aceite de palma*. <http://www.induagro.com.mx/HOMEAP/ProcProductAP/ProcProductAP.html>
- Isern Hidalgo, X. (2014). La humedad en la biomasa : herramientas de medida y control. *Energética XXI*.
- Khalid, H., Zakaria, Z. Z., & Anderson, J. M. (2000). Cuantificación de la biomasa de la palma de aceite y su valor nutritivo en una plantación desarrollada. *Revista Palmas*, *21*(1), 67–77.
- Klose, W., Rincón, S., & Gómez, A. (2010). *Carbón activado de cuesco de palma*.
- Laird, D. A., Brown, R. C., Amonette, J. E., & Lehmann, J. (2009). Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *6*(3), 246–256. <https://doi.org/10.1002/bbb.169>
- Loh, S. K. (2016). 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>

Mendoza Gómez, D. S. (2014). Residuos de palma africana purifican agua y aire. *UN Periódico*, 1.

Millán, R., María, L., Domínguez, C., Alejandra, M., Vargas, S., & Emiro, F. (2016). Effect of temperature on energy potential of pyrolysis products from oil palm shells. *Tecnura*, 20(48), 89–100. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a06>

Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. (2018). *Diagnóstico da Produção Sustentável da Palma de Óleo* (1st ed.). http://www.abrapalma.org/pt/wp-content/uploads/2018/06/DIAGNOSTICO_PALMA.pdf

Molina Navarro, L. (2018). *La producción de palma se mantuvo constante en 2018 respecto a 2017 | Finagro*. <https://www.finagro.com.co/noticias/la-producción-de-palma-se-mantuvo-constante-en-2018-respecto-2017>

Onoja, E., Chandren, S., Abdul Razak, F. I., Mahat, N. A., & Wahab, R. A. (2019). Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Biomass in Malaysia: The Present and Future Prospects. *Waste and Biomass Valorization*, 10(8), 2099–2117. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0258-1>

Quintana, G. C., Arroyave, M. S., & Suárez, D. E. (2008). Obtención de pulpa a partir de los residuos de palma africana pretratados con Steam Explosion. *V Congreso Iberoamericano de Investigación En Celulosa y Papel*, 1–8.

Quintero Lopez, L. A. (2017). *Evaluación del potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar*.

Universidad de Manizales.

Ramirez-Contreras, N. E., Arévalo S, A., & Garcia-Nuñez, J. A. (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. <http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11644/11636>

Ramirez-Contreras, N. E., Ramírez, Á. S. S., González, E. M. G., & Yañez A., E. E. (2011). Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. *CENIPALMA*, 30, 1–46. <https://doi.org/10.5897/AJB11.3582>

Ramos Escalante, G., Ley de Coss, A., Arce Espino, C., Escobar España, J. C., Raj Aryal, D., Pinto Ruiz, R., Guevara Hernández, F., & Guerra Medina, C. E. (2018). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el trópico húmedo de Chiapas, México. *Agrociencia*, 52(5), 671–683.

Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario de Colombia. (2018). *Producción Nacional por Departamento*. <https://www.agronet.gov.co/Paginas/ProduccionNacionalDpto.aspx>

Rincón Rincón, S. N., & González Castillo, Y. A. (2014). *Estudio de factibilidad para la fabricación de pellets a partir de material lignocelulósico proveniente de palma de aceite*. Universidad libre.

Rodríguez Contreras, M. L. U. A. de M. (2011). *Study of trace metals behaviour during coal and biomass cofi ring in fl uidized bed combustion* [Universidad Autónoma de Madrid]. [file:///D:/Mis documentos/Downloads/45094_contreras_rodriguez_mluisa \(2\).pdf](file:///D:/Mis%20documentos/Downloads/45094_contreras_rodriguez_mluisa%20(2).pdf)

Rodríguez, D. T., Ramírez, N. E., & García, J. A. (2014, February). Pellets y briquetas a partir

de biomasa generada en las plantas de beneficio del fruto de la palma de aceite. *El Palmicultor*, 2.

Rueda Ordóñez, Y. J., & Ibarra Ballesteros, J. C. (2017). *Biomasa para el aprovechamiento energético. Una revisión de la caracterización y los modelos por descomposición termoquímica* (Issue April).

Sánchez Torres, J. V. (2014). *Análisis de la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento del cuesco (Endocarpio del fruto de la palma de aceite) para la producción de biocombustibles en Colombia*. Pontificia Universidad Javeriana.

Santos Veas, M. A. (2018). *Gestión de residuos sólidos orgánicos por técnicas de compostaje en la extractora Teobroma*. Universidad Tecnológica Equinoccial.

Sanz Veiga, A. (1998). La industria de aceite de palma en Brasil. *Revista Palmas*, 19(766), 81–84.

Shuit, S. H., Tan, K. T., Lee, K. T., & Kamaruddin, A. H. (2009). Oil palm biomass as a sustainable energy source: A Malaysian case study. *Energy*, 34(9), 1225–1235.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.05.008>

Société Générale de Surveillance Colombia S.A.S. (2020). *Análisis aproximados y avanzados*.
<https://www.sgs.co/es-es/mining/analytical-services/coal-and-coke/proximate-and-ultimate-analysis>

Soh Kheang, L. (2016). Biocombustibles de segunda generación de la biomasa de palma de aceite. *Revista Palmas*, 37(Especial), 137–148.

Sordi, J. (2019). *Desarrollo rural y conservación en la Amazonía: ¿Un camino hacia la*

sostenibilidad? <https://es.mongabay.com/2019/12/desarrollo-sostenible-palma-aceitera-brasil/>

Sukiran, M. A., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., 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>

Talero Rojas, G. F., Rincón Prat, S. L., & Gonzalez Hassig, A. (2017). Torrefacción de tusa y fibra de palma africana (*Elaeis guineensis*) procedente de los llanos orientales de Colombia. Determinación del efecto de la temperatura de torrefacción en las características de los productos. *Revista Palmas*, *38*(1), 27–49.

Torres, M., & Branford, S. (2018). *La deforestación de la palma aceitera en la Amazonía brasileña está bajo control por ahora*. <https://es.mongabay.com/2018/10/la-deforestacion-de-la-palma-aceitera-en-la-amazonia-brasilena-esta-bajo-control-por-ahora/>

Torres, R., Acosta, Á., & Chinchilla, C. (2004). Proyecto comercial de compostaje de los desechos agroindustriales de la palma aceitera. *Revista Palmas*, *25*(2), 377–387. <https://doi.org/10.3167/fpcs.2007.250209>

Universidad Nacional de Colombia. (2020). *Obtención de gas de síntesis a partir de gasificación de cuesco de palma de aceite* (pp. 25–28).

Van Dam, J. (2016). Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. *Revista Palmas*, *37*(Especial Tomo II), 149–156. http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/Memorias de la XVIII Conferencia Internacional sobre Palma de aceite/M_2_15_ Subproductos de la palma.pdf

Vignote Peña, S. (2016). *La biomasa: importancia, tipos y características y forma de preparación. November.*

Apéndices

Apéndice A. Bibliografía relacionada con la composición de los racimos de fruta fresca.

En la Tabla A.1. se presentan algunos de los artículos que indican la composición de los RFF.

Tabla A. 1.

Comparación bibliográfica de la composición de los racimos de fruta fresca

| | Compuesto | Porcentaje % | Fuente |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------|--|
| | Aceite | 17 - 25,3 | |
| Racimos de fruta frescos | Racimos de fruta vacíos | 17,7 - 26,2 | (Gisela et al., 2016) |
| | Cáscara de semilla | 5 - 7 | |
| | Fibra de mesocarpio | 11,6 - 15 | |
| | Aceite | 21 | |
| Racimos de fruta frescos | Racimos de fruta vacíos | 23 | (Gómez et al., 2008) |
| | Cáscara de semilla | 6 | |
| | Fibra de mesocarpio | 15 | |
| | Aceite | 17 - 25,3 | (Departamento |
| Racimos de fruta frescos | Racimos de fruta vacíos | 17,7 - 26,1 | Administrativo Nacional de Estadística, 2012) |
| | Cáscara de semilla | 5 - 7 | |
| | Fibra de mesocarpio | 11,6 - 15 | |
| | Aceite | 21 | |
| Racimos de fruta frescos | Racimos de fruta vacíos | 23 | (Onoja et al., 2019) |
| | Cáscara de semilla | 6 | |
| | Fibra de mesocarpio | 15 | |
| | Aceite | 20 - 23 | |
| Racimos de fruta frescos | Racimos de fruta vacíos | 20 - 23 | (García et al., 2010) |
| | Cáscara de semilla | 5 - 7 | |
| | Fibra de mesocarpio | 11 - 14 | |

Nota: En la tabla se detallan las diferentes fuentes bibliográficas consultadas para la determinación del porcentaje de racimos de fruta fresca para cada producto.

Apéndice B. Datos recolectados para el desarrollo de la estimación de biomasa residual de aceite de palma.

El proceso de búsqueda se realizó en bases de datos cuyas fuentes son actualizadas por entes oficiales o gubernamentales, esto con el fin de obtener datos más precisos.

En Colombia, Agronet, es la página encargada de publicar la información de cualquier tipo de producto agropecuario producido en el país, allí es posible obtener información histórica de producción, área cosechada y sembrada, sectorizada por regiones, departamentos, municipios o el total nacional; además permite la interacción entre municipios o departamentos a estudiar.

En la siguiente tabla se presentan los datos recopilados por departamentos palmeros del territorio colombiano en los años 2016, 2017 y 2018.

Tabla B. 1.

Datos recopilados de producción de aceite de palma en Colombia.

| Producción de aceite de palma en Colombia | | | | | | |
|---|---------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Departamento | Área cosechada (ha) | | | Producción (t) | | |
| | 2016 | 2017 | 2018 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Antioquia | 1.756 | 2.471 | 2.171 | 4.990 | 8.445 | 7.628 |
| Atlántico | 312 | 312 | 312 | 944 | 1.096 | 1.096 |
| Bolívar | 32.760 | 39.424 | 40.476 | 89.308 | 131.097 | 137.226 |
| Caquetá | 350 | 350 | 350 | 525 | 420 | 420 |
| Casanare | 60.273 | 53.504 | 57.220 | 188.624 | 169.001 | 206.155 |
| Cauca | 624 | 624 | 624 | 942 | 1.223 | 1.311 |
| Cesar | 74.859 | 77.320 | 81.760 | 203.160 | 223.977 | 249.474 |
| Chocó | 326 | 319 | 400 | 652 | 268 | 800 |
| Córdoba | 1.924 | 1.946 | 1.976 | 5.907 | 6.918 | 7.460 |
| Cundinamarca | 5.191 | 5.394 | 5.394 | 16.248 | 19.228 | 19.228 |
| La Guajira | 1.566 | 1.899 | 2.036 | 4.918 | 7.189 | 7.684 |
| Magdalena | 40.807 | 41.809 | 41.809 | 123.976 | 133.328 | 137.596 |
| Meta | 153.246 | 171.689 | 177.575 | 478.790 | 698.220 | 723.235 |
| Nariño | 15.911 | 17.002 | 17.602 | 24.430 | 17.158 | 17.603 |
| Norte de Santander | 30.732 | 32.351 | 32.531 | 78.059 | 109.670 | 110.280 |
| Santander | 76.725 | 79.725 | 78.806 | 193.911 | 208.695 | 232.747 |
| Sucre | 600 | 1.212 | 1.212 | 1.872 | 4.618 | 4.618 |
| Vichada | 1.000 | 1.000 | 7.100 | 3.100 | 2.878 | 28.557 |
| TOTAL | 498.962 | 528.351 | 549.354 | 1.420.356 | 1.743.429 | 1.893.118 |

Nota: Se muestra la producción anual de aceite de palma en Colombia, datos hallados para el cálculo de la biomasa residual. Adaptado de *AGRONET, 2018*.

En Brasil, Agropensa, trabaja en el mapeo y apoya la organización, integración y difusión de datos e información agrícola, allí se presenta un panel interactivo, en el cual se

permite la consulta rápida y personalizable. En esta página, se encuentran datos de área cosechada, producción, rendimiento y valor de producción y de igual forma que Agronet, es posible adquirir información cada municipio, estado o el total nacional.

A continuación, se exponen los datos obtenidos de Agropensa por estados palmeros en el territorio brasileño en los años 2016, 2017 y 2018.

Tabla B. 2.

Datos recopilados de los racimos de fruta fresca de palma de aceite en Brasil

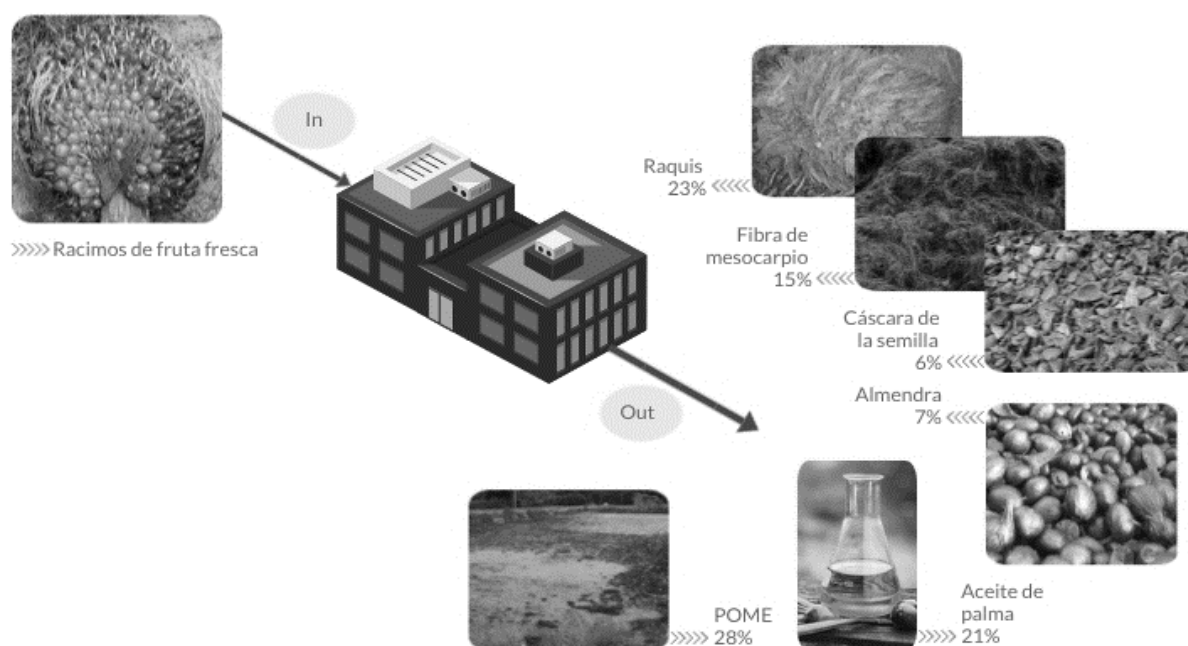
| RACIMOS DE FRUTA FRESCA DE PALMA EN BRASIL | | | | | | |
|---|----------------------------|----------------|----------------|-----------------------|------------------|------------------|
| ESTADO | Área cosechada (ha) | | | Producción (t) | | |
| | 2016 | 2017 | 2018 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Pará | 99.400 | 101.760 | 100.830 | 1.486.080 | 1.634.480 | 1.533.740 |
| Bahía | 42.340 | 8.730 | 8.170 | 157.850 | 36.920 | 30.960 |
| Amazonas | 360 | 610 | 10 | 2.090 | 3.630 | 20 |
| TOTAL | 142.100 | 111.100 | 109.010 | 1.646.020 | 1.675.030 | 1.564.720 |

Nota: La tabla muestra los racimos de fruta fresca tratados anualmente en Brasil, datos hallados para la estimación de la biomasa residual. Adaptado de *EMBRAPA, 2019*.

Apéndice C. Procedimiento para la estimación de biomasa residual en Colombia y Brasil.

Figura C. 1

Esquema del proceso productivo global de la palma de aceite



Nota: En la figura se muestran las variables de entrada y salida del proceso de extracción de aceite de palma consideradas para el balance de masa global.

En la Figura C.1. se muestra el proceso global en una planta de beneficio de aceite de palma, del cual se parte para el cálculo de la estimación de la biomasa residual, por medio de un balance de masa global y los datos recolectados en el Apéndice B, se lleva a cabo el siguiente procedimiento.

El balance global aplicado al proceso es:

$$F_{in\ RFF} = F_{out\ AP} + F_{out\ R} + F_{out\ FM} + F_{out\ CS} + F_{out\ POME} + F_{out\ A} \quad (Ec. 4)$$

Con respecto a las composiciones e igualando el flujo de entrada al de la salida, $F_{in} = F_{out}$, el balance resulta:

$$F_{in\ RFF} = x_{AP}F_{in\ RFF} + x_R F_{in\ RFF} + x_{FM}F_{in\ RFF} + x_{CS}F_{in\ RFF} \\ + x_{POME}F_{in\ RFF} + x_A F_{in\ RFF} \quad (Ec. 5)$$

En este punto, se analiza la información extraída de Colombia y Brasil; en el caso de Colombia, se obtuvo la cantidad de producción de aceite de palma en toneladas; por otra parte, para Brasil, se obtuvo la cantidad de RFF en toneladas, lo que difiere en el tratamiento de los datos.

Colombia

Se relaciona $x_{AP}F_{in\ RFF} = F_{out\ AP}$, este último, es el recolectado en las tablas de producción del Apéndice B. se reemplazan los porcentajes presentes en la Figura C.1. y se despeja, para hallar la producción total de RFF.

$$F_{in\ RFF} = F_{out\ AP} + 0,23F_{in\ RFF} + 0,15F_{in\ RFF} + 0,6F_{in\ RFF} \\ + 0,28F_{in\ RFF} + 0,7F_{in\ RFF} \quad (Ec. 6)$$

$$F_{in\ RFF} = F_{out\ AP} + 0,79F_{in\ RFF} \quad (Ec. 7)$$

$$F_{in\ RFF} - 0,79F_{in\ RFF} = F_{out\ AP} \quad (Ec. 8)$$

$$F_{in\ RFF}(1 - 0,79) = F_{out\ AP} \quad (Ec. 9)$$

Por ejemplo, la producción de Antioquia en el 2018 fue de 7.628 t de aceite de palma, es decir, la cantidad de RFF utilizados a la entrada fueron 36.323,81 toneladas.

$$F_{in\ RFF} = \frac{F_{out\ AP}}{(1 - 0,79)} = \frac{7.628\ t}{0,21} = 36.323\ t \quad (Ec. 10)$$

Además, para obtener la cantidad de raquis, fibra de mesocarpio y cáscara de la semilla, se multiplica el valor de entrada de RFF por el porcentaje de cada uno.

$$F_{out R} = x_R F_{in RFF} = 0,23 * 36.323,81 t = 8.354 t \quad (Ec. 11)$$

$$F_{out FM} = x_{FM} F_{in RFF} = 0,15 * 36.323,81 t = 5.448 t \quad (Ec. 12)$$

$$F_{out CS} = x_{CS} F_{in RFF} = 0,06 * 36.323,81 t = 2.179 t \quad (Ec. 13)$$

Así, resultan 8.354,47 toneladas de raquis, 5.448,57 toneladas de fibra del mesocarpio y 2.179,43 toneladas de cáscara de la semilla en Antioquia, en el año 2018.

Este procedimiento se realiza para cada departamento en Colombia y se organiza la información por zonas productivas (norte, central, oriental y sur occidental).

Brasil

El proceso de obtención de datos es más simple, debido a que la información de Agropensa es del total de RFF producidos, es decir, la entrada al proceso es conocido y se obtienen de la siguiente manera:

Tomando la producción de RFF en 2018 del estado de Pará.

$$F_{out R} = x_R F_{in RFF} = 0,23 * 1.533.740 t = 352.760 t \quad (Ec. 14)$$

$$F_{out FM} = x_{FM} F_{in RFF} = 0,15 * 1.533.740 t = 230.061 t \quad (Ec. 15)$$

$$F_{out CS} = x_{CS} F_{in RFF} = 0,06 * 1.533.740 t = 92.024 t \quad (Ec. 16)$$

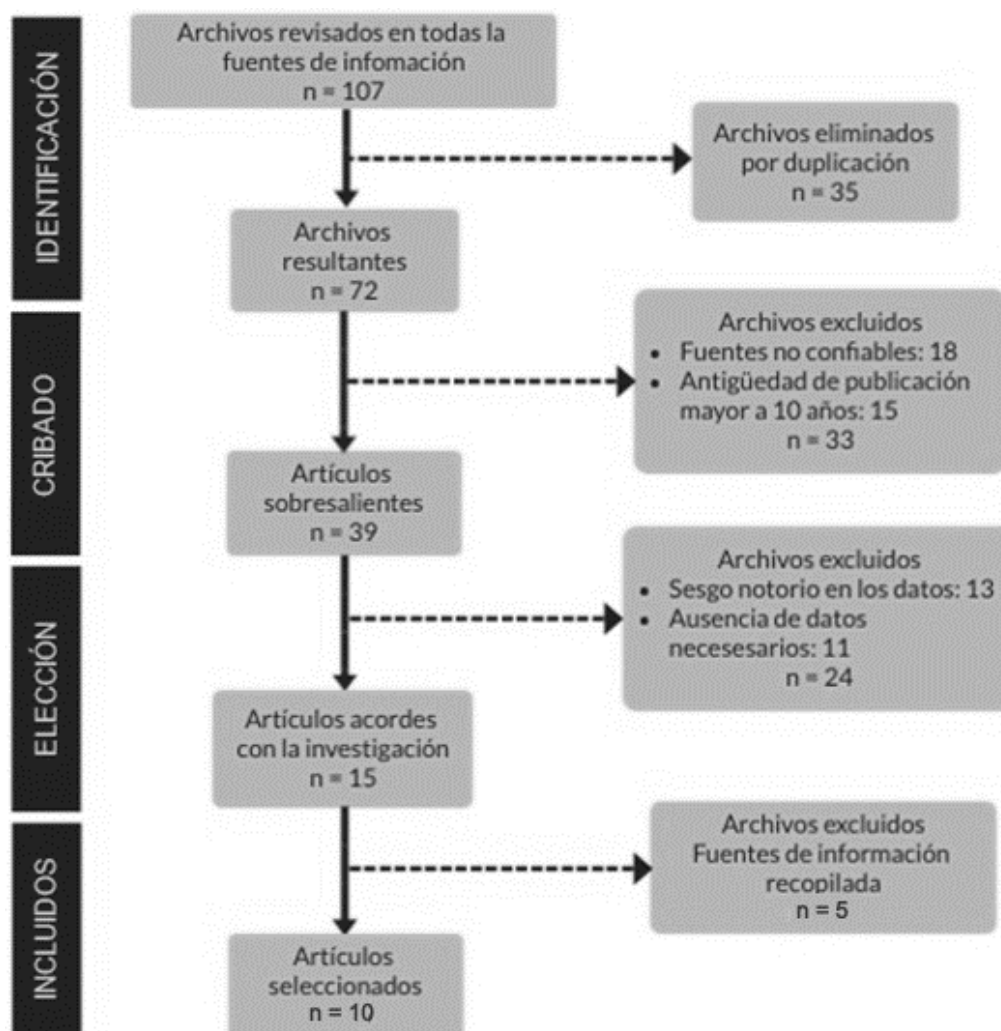
Es decir, se produjeron 352.760,2 toneladas de raquis, 230.061 toneladas de fibra de mesocarpio y 92.024,4 toneladas de cáscara de semilla en el estado de Pará en Brasil, de igual forma se realiza el procedimiento para los estados de Bahía y Amazonas.

Apéndice D. Diagrama de la revisión sistemática de la bibliografía para la segunda etapa del proyecto.

El mapa conceptual presentado a continuación, representa la forma utilizada para descartar los artículos según el tipo de información contenida en ellos.

Figura D. 1

Diagrama de revisión sistemática de la bibliografía de artículos relacionados con la composición de la biomasa residual



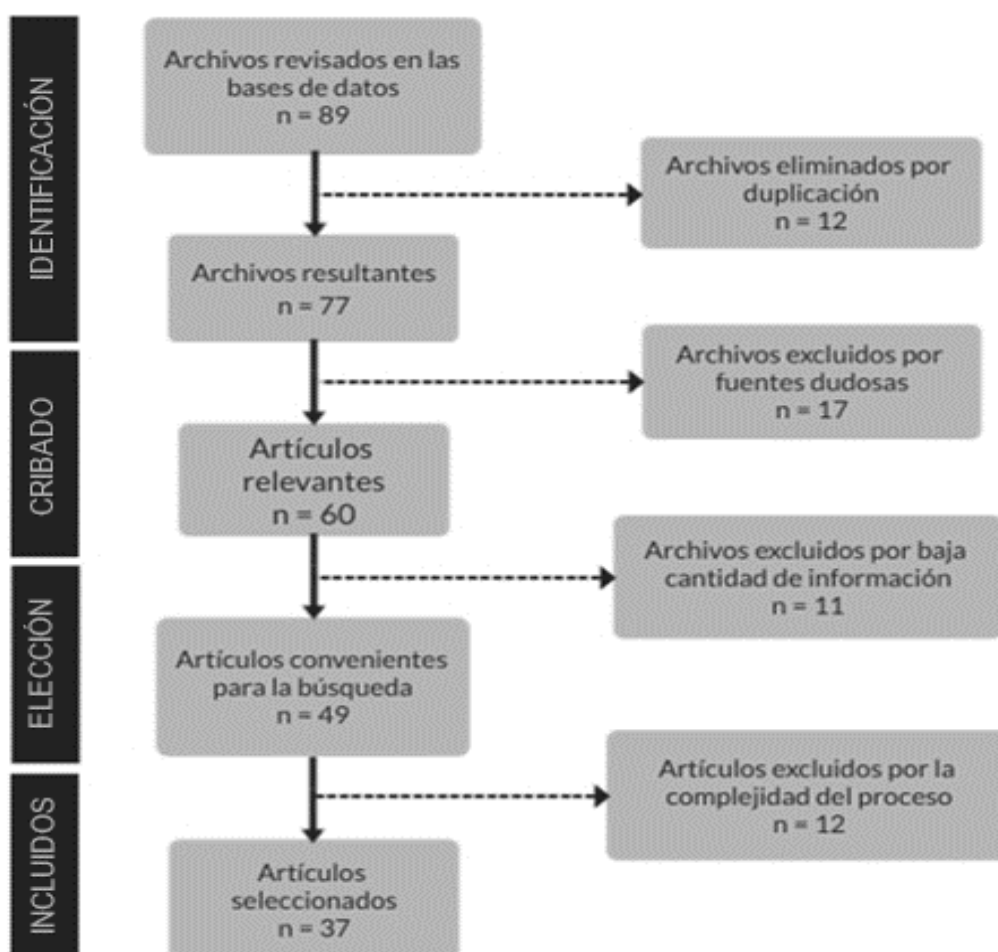
Nota: La figura muestra los criterios de selección y número de artículos seleccionados para la segunda etapa del proyecto.

Apéndice E. Diagrama de la revisión sistemática de la bibliografía para la tercera etapa del proyecto

En el siguiente diagrama, se presenta la forma utilizada para seleccionar los artículos empleados para estudiar la gestión de los residuos.

Figura E. 1

Diagrama de revisión sistemática de la bibliografía de artículos relacionados con la gestión de la biomasa residual



Nota: La figura muestra los criterios de selección y número de artículos seleccionados para la tercera etapa del proyecto.