



Centro De Investigación Científica De Yucatán, A.C.  
Posgrado En Ciencias En Energía Renovable

---

Evaluación de dos especies leñosas de la  
Península de Yucatán como posibles  
Cultivos Dendroenergéticos.

---

Tesis que presenta  
MARÍA AURORA TEPALE GÓMEZ

En opción al título de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE

Mérida Yucatán, junio 2020.

# *Agradecimientos*

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán a través de las Unidades de Energía Renovable y Materiales Poliméricos por brindarme la oportunidad de realizar la maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca No 492513. Al Fondo Sectorial Conacyt-Sener sustentabilidad por su apoyo al proyecto “Uso de biomasa leñosa como biocombustible sólido para la generación de energía eléctrica en zonas rurales” con clave 249581.

Al Dr. Gonzalo Canché Escamilla por el asesoramiento y apoyo durante la realización de esta tesis

Al Dr. José Luis Hernández Stefanoni por la ayuda con la información proporcionada para la evaluación del crecimiento y por el asesoramiento para los resultados de crecimiento de las especies objeto de este estudio.

Al comité tutorial: Dr. Luis Felipe Barahona Pérez por el apoyo para la realización de las pruebas de cromatografía de Gases acoplado a masas, al Dr. Francisco Javier Moscoso Sánchez, la Dra. Daniella Esperanza Pacheco Catalán y el Dr. Sergio René Rodríguez Jiménez por las revisiones y observaciones a esta tesis.

Al Q.I Santiago Duarte Aranda por toda la ayuda técnica para la preparación de la biomasa, obtención de los espectros FTIR, por el análisis termogravimétrico (TGA), por las pruebas de C.H.O.N.S y el apoyo durante los trabajos en el laboratorio de Química Macromolecular de la Unidad de Materiales

A la Q.I Azucena Chuc y al Dr. Alejandro Ávila del laboratorio de Química de Materiales de la Facultad de Química por la estancia para la realización de las pruebas de pirólisis

Al M. en C. Fernando Tun Dzul y el C. Filogonio May por la colecta del material vegetal para las pruebas de caracterización química, determinación de análisis elemental y proximales

A la Dra. Beatriz Morales y al M.C. Martín Baas por la ayuda en el análisis elemental (CHONS)

A mis profesores de la Unidad de Energía Renovable por compartir sus enseñanzas y conocimientos.

# *Dedicatorias*

Primeramente, a Dios por darme salud, fuerza y voluntad para poder concluir este posgrado.

A mi madre, María Justina Gómez Monsivais por estar de principio a fin, por la inspiración, el apoyo, los ánimos, la fortaleza y todo el amor en el proceso de mis estudios y en la elaboración y redacción de la presente tesis de maestría.

Adrián Eduardo mi amor y compañero de vida y a su familia por el cariño y ayuda en este proceso.

A mi hermana Mariana y sobrinos Sebastián y Sofía por su gran amor e inspiración para continuar.

A mis amigos de la maestría y mejores amigas de vida por su cariño, ánimos y buenas vibras en la travesía.

A mi tía Gina, a mi abuelita Aurora, a mi papá Alfonso por sus ánimos y amor.

A mis ángeles que me cuidan desde siempre y me motivan a culminar este proyecto de vida.

A mi hijito Dante, con todo el amor y cariño.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>V</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. ....</b>	<b>3</b>
<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 BIOMASA Y BIOCOMBUSTIBLES.....</b>	<b>3</b>
<b>BIOMASA LIGNOCELULÓSICA .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 BIOENERGÍA.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.1 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE ENERGÍA.....</b>	<b>7</b>
<b>PIROLISIS.....</b>	<b>9</b>
<b>GASIFICACIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>1.3 COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA BIOMASA LEÑOSA .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA Y DEGRADACIÓN TÉRMICA.....</b>	<b>14</b>
<b>1.4 CULTIVOS DENDROENERGÉTICOS .....</b>	<b>19</b>
<b>1.4.1 TIPOS DE ECOSISTEMAS Y DISPONIBILIDAD DE BIOMASA LEÑOSA EN YUCATÁN .....</b>	<b>21</b>
<b>1.4.2 ESPECIES CON POTENCIAL USO COMO CULTIVOS DENDROENERGÉTICOS .....</b>	<b>22</b>
<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>24</b>
<b>OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>24</b>
<b>OBJETIVOS PARTICULARES.....</b>	<b>24</b>
<b>CAPITULO 2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 OBTENCIÓN DE LA MATERIA PRIMA Y SU PRETRATAMIENTO. ....</b>	<b>25</b>
<b>2.2. ANÁLISIS PROXIMALES DE LA BIOMASA .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.2 DETERMINACIÓN DE CENIZAS.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.3. ANÁLISIS ELEMENTAL CHONS .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3. DETERMINACIÓN DE EXTRAÍBLES .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.1 CARACTERIZACIÓN DE EXTRAÍBLES. ....</b>	<b>28</b>
<b>2.4. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE COMPONENTES ESTRUCTURALES.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.1 LIGNINA.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.2 OBTENCIÓN DE HOLOCELULOSA .....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.3 OBTENCIÓN DE CELULOSA .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA BIOMASA LEÑOSA.....</b>	<b>32</b>
<b>2.5.1 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO MEDIANTE TGA.....</b>	<b>32</b>
<b>2.5.1.1 PODER CALORÍFICO .....</b>	<b>32</b>
<b>2.6 PRUEBAS DE PIROLISIS .....</b>	<b>32</b>
<b>2.7 PRUEBAS DE GASIFICACIÓN.....</b>	<b>33</b>
<b>2.8 EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LAS ESPECIES.....</b>	<b>34</b>
<b>CAPITULO 3. ....</b>	<b>35</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1 ANÁLISIS PROXIMALES DE LA BIOMASA .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA BIOMASA .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3 CARACTERIZACIÓN DE EXTRAÍBLES.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.1. CARACTERIZACIÓN DE EXTRAÍBLES MEDIANTE FTIR .....</b>	<b>37</b>

3.3.2 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE CROMATOGRAFÍA GASES-MASAS .....	38
3.4 ANÁLISIS ELEMENTAL Y PODER CALORÍFICO (HHV) .....	44
3.5 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO MEDIANTE TGA.....	44
3.6 PRUEBAS DE PIROLISIS DE LA BIOMASA LEÑOSA.....	47
3.7 PRUEBAS DE GASIFICACIÓN DE LA FRACCIÓN CARBONOSA (BIOCHAR) .....	50
3.8 EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO .....	51
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>61</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición química de la Biomasa leñosa	15
Tabla 1.2. Características de los ecosistemas predominantes en Yucatán	22
Tabla 3.1. Composición proximal de las biomásas leñosas en estudio	35
Tabla 3.2. Composición química de las biomásas leñosas en estudio	37
Tabla 3.3. Compuestos orgánicos identificados en los extraíbles con disolvente benceno-etanol (2:1) de <i>L. leucocephala</i> y <i>P. piscipula</i>	41,42
Tabla 3.4. Compuestos orgánicos identificados en los extraíbles con etanol de <i>L. leucocephala</i> y <i>P. piscipula</i>	43,44
Tabla 3.5. Análisis elemental y cálculo del poder calorífico de las fuentes biomásicas por edades	45
Tabla 3.6. Rendimiento de los productos de la pirolisis de la biomasa de <i>L. leucocephala</i> y <i>P. piscipula</i> a diferentes edades. T de pirolisis: 500 °C	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Generación de biomasa de distintas fuentes de origen	3
Figura 1.2 Tipos de biomasa según diferentes clasificaciones	5
Figura 1.3. Tipos de procesos de conversión de biomasa y sus productos energéticos	7
Figura 1.4. Secuencia de desvolatilización de biomasa lignocelulósica	10
Figura 1.5 Tipos de pirolisis y sus productos finales	12
Figura 1.6. Estructura de la biomasa lignocelulósica	15
Figura 1.7 Fibras de celulosa en la pared celular	16
Figura 1.8 Mecanismo de descomposición de celulosa	17
Figura 1.9 Tipos de monolignoles más comunes encontrados en bloques de lignina	18
Figura 1.10 Porcentaje de combustibles de madera utilizados a nivel mundial	20
Figura 2.1. Ramas de <i>L. leucocephala</i> y <i>P. piscipula</i>	25
Figura 2.2. Chips de madera de <i>L. leucocephala</i> y <i>P. piscipula</i>	25
Figura 2.3. Concentrado con los compuestos extraídos	27
Figura 2.4. Elaboración de las pastillas de Bromuro de Potasio (KBr)	28
Figura 2.5 Hidrólisis ácida para determinación de holocelulosa	30
Figura 2.6 Holocelulosa de <i>L. leucocephala</i>	30
Figura 2.7 Celulosa de <i>L. leucocephala</i>	31
Figura 2.8 Sistema utilizado para realizar la Pirólisis de la biomasa leñosa	33
Figura 2.9 Fracción sólida obtenida de la fase pirolisis	34
Figura 3.1. Espectros de FTIR de extraíbles de <i>P. piscipula</i> y <i>L. leucocephala</i> a diferentes edades con solventes de mediana, baja y alta polaridad	39
Figura 3.2 Espectro de Cromatografía de Gases acoplado a masas de compuestos extraíbles de <i>L. leucocephala</i> a 12 años con solvente benceno-etanol	40
Figura 3.3. Termogramas TGA y DTG de <i>Piscidia piscipula</i> de diferentes edades	46
Figura 3.4. Termogramas TGA y DTG de <i>Leucaena leucocephala</i> de diferentes edades	46
Figura 3.5 Evolución de la composición del gas (volátiles no condensables) obtenido en la pirólisis de <i>L. leucocephala</i> . Edades 3 y 6 años	48
Figura 3.6 Evolución de la composición del gas (volátiles no condensables) obtenido en la pirólisis de <i>P. piscipula</i> . Edades 3 y 6 años	49
Figura 3.7 Evolución de la composición del gas (volátiles no condensables) obtenido en la pirólisis de <i>L. leucocephala</i> . Edades 3, 6 y 12 años.	50
Figura 3.8 Evolución de la composición del gas (volátiles no condensables) obtenido en la gasificación del biochar de <i>P. piscipula</i> . Edades 3, 6 y 12 años.	51
Figura 3.9 Valores mínimos, máximos y la media de los diámetros (cm) de <i>P. piscipula</i> en cuatro periodos de medición.	52

Figura 3.10 Valores mínimos, máximos y la media de la altura (m) de <i>P. piscipula</i> en cuatro periodos de medición.	53
Figura 3.11. Valores mínimos, máximos y la media de la biomasa (Ton/ha) de <i>P. piscipula</i> en cuatro periodos de medición	54
Figura 3.12. Incremento del diámetro de <i>P. piscipula</i> en cuatro periodos de medición	54
Figura 3.13. Incremento de la altura de <i>P. piscipula</i> en cuatro periodos de medición	55
Figura 3.14. Incremento de la biomasa de <i>P. piscipula</i> en cuatro periodos de medición	56
Figura 3.15 Valores mínimos, máximos y la media de los diámetros (cm) de <i>L. leucocephala</i> en cuatro periodos de medición	57
Figura 3.16 Valores mínimos, máximos y la media de la altura (m) de <i>L. leucocephala</i> en cuatro periodos de medición	57
Figura 3.17 Valores mínimos, máximos y la media de la biomasa (Ton/ha) de <i>L. leucocephala</i> en cuatro periodos de medición	58
Figura 3.18. Incremento del diámetro de <i>L. leucocephala</i> en cuatro periodos de medición	59
Figura 3.19. Incremento de la altura de <i>L. leucocephala</i> en cuatro periodos de medición	60
Figura 3.20. Incremento de la biomasa de <i>L. leucocephala</i> en cuatro periodos de medición.	60

## RESUMEN

Este trabajo se desarrolló en el contexto de un estudio sobre el aprovechamiento de dos especies de biomasa leñosa de la Península de Yucatán (*Leucaena leucocephala* y *Piscidia piscipula*) para la generación de energía mediante procesos termoquímicos. El objetivo principal de este trabajo consistió en llevar a cabo la determinación de la composición proximal, química y caracterización térmica de las especies estudiadas a diferentes edades de sucesión, para explorar su uso en plantaciones dendroenergéticas.

Con respecto a la composición proximal y química, *P. piscipula* es una especie con mayor contenido de humedad, cenizas y contenido de extraíbles que *L. leucocephala*; sin embargo, ésta contiene mayor hemicelulosa y ambas presentan bajo contenido de lignina. Los espectros de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) de las fracciones de extraíbles mostraron la presencia de diferentes grupos oxigenados como ácidos, alcoholes, ésteres; cadenas hidrocarbonadas con grupos metilo y metileno, así como compuestos aromáticos, los cuales fueron identificados mediante cromatografía de gases acoplado a masas.

La degradación térmica de biomasa seca, mediante procesos de pirolisis, obtiene mayor rendimiento en bioaceite para ambas especies; las pruebas de gasificación del biochar muestran una mayor producción de monóxido de carbono; la especie de *L. leucocephala* a una edad de 6 años, mostró mayor contenido energético con un valor de 19.9 MJ/kg. La especie más abundante, en la zona de estudio, fue *P. piscipula*. Con base a los resultados obtenidos en este trabajo, la especie *L. leucocephala* sería la más adecuada, para su uso en una plantación dendroenergética.

## ABSTRACT

This work was developed in the context of a study on the use of two woody biomass species from the Yucatan Peninsula (*Leucaena leucocephala* and *Piscidia piscipula*) for the generation of energy by thermochemical processes. The main objective of this work was to determine the proximal, chemical, and thermal characterization of the species studied at different ages of succession, to explore their use in wood energy plantations.

Regarding the proximal and chemical composition, *P. piscipula* is a species with a higher moisture, ash and extractables content than *L. leucocephala*, however it contains higher hemicellulose and both have low lignin content. The Fourier transform infrared (FTIR) spectra of the extractable fractions showed the presence of different oxygenated groups such as acids, alcohols, esters; hydrocarbon chains with methyl and methylene groups, as well as aromatic compounds, which were identified by mass coupled gas chromatography.

Thermal degradation of dry biomass, through pyrolysis processes, achieves higher bio-oil yield for both species; biochar gasification tests show higher production of carbon monoxide gas; the specie *L. leucocephala* at an age of six years showed higher energy content with 19.9 MJ / kg. The more abundant species in the study zone was *P. piscipula*. Based on the results obtained in this work, the *L. leucocephala* species would be the most suitable for use in a dendroenergy plantation.

## INTRODUCCIÓN

El mundo está pasando por un período de transición de fuentes de energía fósiles a renovables para superar las limitaciones y los problemas que genera el consumo de combustibles fósiles [1]. En los países en desarrollo, la biomasa se considera un recurso que puede contribuir como fuente de energía, al mismo tiempo que reduce la emisión de gases de efecto invernadero; además es abundante y es disponible en cantidades considerables [2]. El mayor potencial proviene del uso de madera y productos de madera, el material residual de la agricultura y la silvicultura también son importantes fuentes de energía junto con los desechos biológicos. Además del uso de residuos, se pueden usar cultivos energéticos [3]. Para aprovechar el potencial energético que posee la biomasa, son varios los procesos que se pueden utilizar; entre estos se encuentran los que usan la biomasa directamente para la generación de calor mediante la combustión directa de la biomasa o mediante su transformación en combustibles mediante procesos de biodigestión, pirolisis y gasificación.[4]. La bioenergía es una forma de energía renovable, neutral en carbono y no tóxica que puede producirse localmente y, por lo tanto, también promueve la seguridad energética [5]. La energía obtenida de la biomasa se puede considerarse carbono neutral ya que las plantas fijan fotosintéticamente el carbono atmosférico para producir biomasa que, cuando se usa como bioenergía, libera la columna vertebral de carbono de la biomasa en forma de CO<sub>2</sub> a la atmósfera sin causar ninguna emisión neta de dióxido de carbono [6], esto en contraste con el uso energético de hidrocarburos fósiles (principalmente carbón, derivados de petróleo y gas natural), que liberan CO<sub>2</sub> que ha estado atrapado por procesos geológicos por millones de años.

La bioenergía se refiere a la energía en forma de calor que se obtiene directamente de la biomasa o los portadores de energía (biocombustibles) derivados de la biomasa [7]; estos últimos, pueden presentarse de forma sólida (biocarbón), líquidos (biodiesel, bioetanol, bioaceite, etc.) y combustibles gaseosos (biogás, gas de síntesis, etc.) [8]. La disponibilidad de materia prima es un obstáculo importante para el desarrollo a gran escala de la bioenergía, por lo que las plantas terrestres, las especies acuáticas de algas y cianobacterias están siendo examinadas por su potencial bioenergético [9]. La biomasa residual (agrícola, agroindustrial y forestal) tales como bagazos, residuos de poda, aserrín, polvo de molienda, corteza, astillas de corte, etc., han sido explotados para la producción

de energía, pellets y briquetas. La utilización de tales materiales de desecho puede resultar en una reducción de costos de producción de bioenergía [7]

El uso de la biomasa de procedencia forestal o “biomasa leñosa” es destinada en muchos países para la producción de carbón vegetal y para proporcionar calores en los hogares; y representa el 35% del consumo energético en el uso doméstico de zonas rurales y urbanas. En México, el uso de la biomasa es el más intensivo en el sector doméstico, principalmente en el consumo de leña de la zona centro-sur del país para la cocción de alimentos mediante la quema directa de biomasa, así como combustible sólido en pequeñas industrias como ladrilleras, panaderías, tortillerías y producción de carbón vegetal [10]. Los cultivos energéticos permiten la generación de biomasa, y al mismo tiempo, ofrecen una posible alternativa al abandono de cultivos tradicionales en el medio rural. En particular, los cultivos de árboles leñosos se perfilan con mayores ventajas para la producción de bioenergía, con especies leñosas de crecimiento rápido, cultivados en densidades elevadas y turnos cortos de poda, ofreciendo una serie de efectos positivos para el medio ambiente [11]. En la península de Yucatán, existen especies de plantas leñosas abundantes y ampliamente distribuidas tales como *Leucaena leucocephala* y *Piscidia piscipula*. Estas especies tienen tasas de crecimiento de moderadas a rápidas, pueden crecer en diferentes condiciones ambientales, tienen capacidad de rebrote y toleran temporadas de sequía [12], características que podrían favorecer el uso de esta biomasa leñosa en plantaciones dendroenergéticas para la producción de energía. Aunque estas especies se han utilizado como leña y en otros usos a nivel local [13], se tiene poca información sobre su composición química y sus propiedades térmicas a diferentes edades de la planta.

Debido a lo anterior, resulta de interés evaluar el potencial energético y ciclo de vida de estas especies de alta distribución y rápido crecimiento en la Península de Yucatán, con el fin de evaluar su potencial en plantaciones dendroenergéticas. En este trabajo, se evaluó el efecto de la edad de las plantas sobre su composición química y propiedades térmicas, con el fin de determinar su posible aplicación como materia prima en la generación de energía eléctrica mediante la gasificación de la biomasa leñosa.

# CAPÍTULO 1.

## ANTECEDENTES

### 1.1 Biomasa y biocombustibles

Entre las energías renovables destaca el uso de productos obtenidos a partir de materia orgánica para producir energía; estos productos componen lo que se denomina comúnmente “biomasa” [14]. Se define a la biomasa como toda aquella materia orgánica obtenida mediante el proceso de fotosíntesis así como aquella obtenida de desechos y residuos de actividades agrarias (vegetal y animal), residuos de aprovechamientos forestales y cultivos agrícolas, residuos de podas de jardines, residuos de industrias agroforestales, cultivos con fines energéticos, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales; por lo que los recursos biomásicos provienen de fuentes muy diversas y heterogéneas, excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización (figura 1.1) [14, 15].

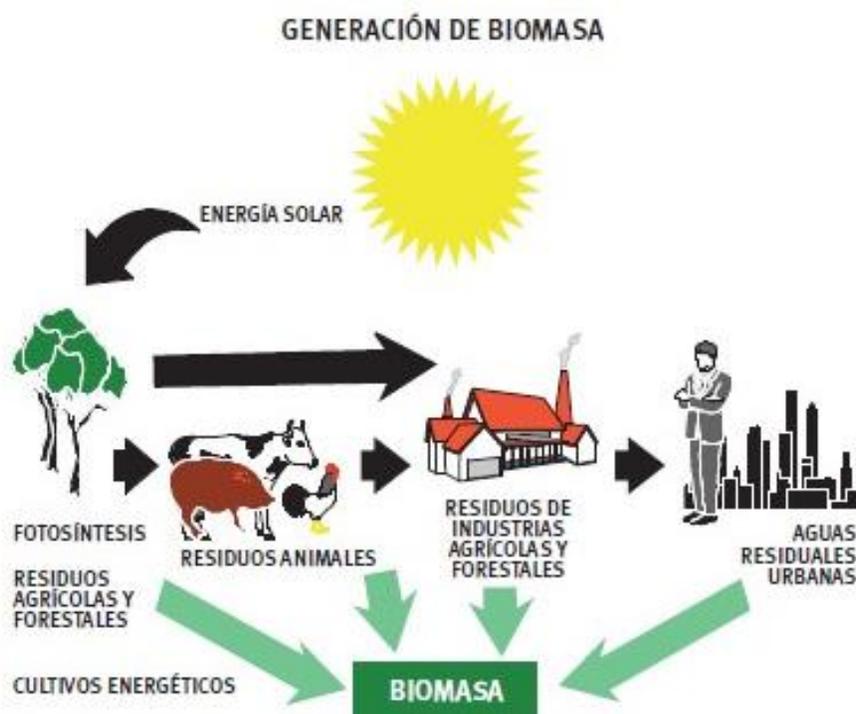


Figura 1.1. Generación de biomasa de distintas fuentes de origen [14].

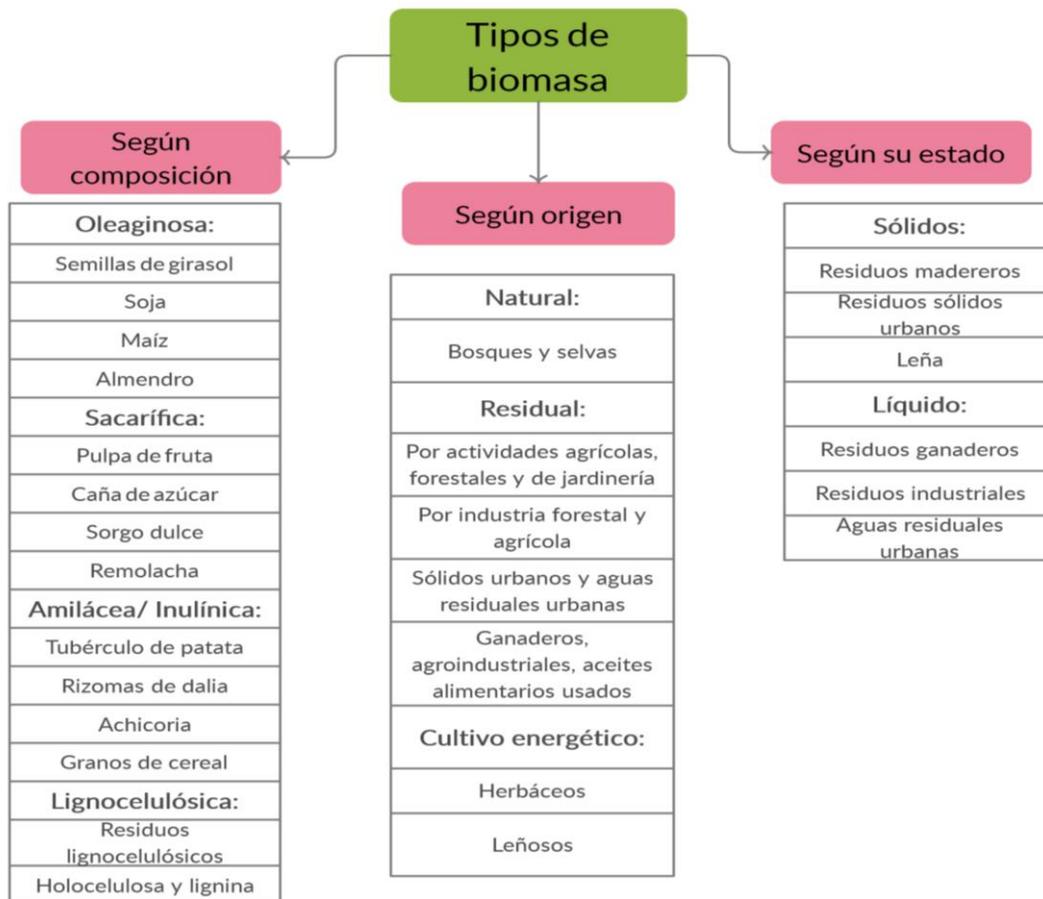
Los procesos biológicos naturales, comenzado por la transformación de óxidos de carbono en biomasa y oxígeno mediante el proceso de fotosíntesis, han sido siempre la mayor fuente de recursos nutricionales y energéticos de la humanidad [16]. Existen numerosas clasificaciones de biomasa como se muestra en la figura 1.2 [15].

- a) Con base a su composición química se clasifican en biomásas ricas en aceites o grasas (animales y vegetales); ricas en carbohidratos (caña de azúcar, remolacha); ricas en polisacáridos tales como el almidón y la inulina; y la biomasa lignocelulósica que es aquella compuesta de lignina, celulosa y hemicelulosa.
- b) De acuerdo a su origen pueden ser naturales como la de bosques y selvas; residuales que son los productos generados en cultivos agrícolas, actividades agroindustriales y forestales; y los provenientes de aguas urbanas e industriales.
- c) De acuerdo a su estado, pueden ser sólidos como la leña, la madera y sus residuos, los residuos sólidos urbanos. La biomasa húmeda es aquella que proviene de residuos agroindustriales y urbanos tales como residuos de poda, bagazos, etc.; la biomasa líquida es la que contiene altos contenidos de materia orgánica como las aguas residuales industriales y municipales.

Por sus características físico-químicas y caloríficas, la biomasa puede ser una materia prima para la producción de energía (calor y electricidad), de biocombustibles y de productos químicos [19]. Los sistemas de bioenergía incluyen una gama completa de productos como bioetanol, biodiésel, biogás, electricidad y calor, todos ellos obtenidos de diversas materias primas; por ejemplo, madera de bosques, cultivos, algas marinas y animales, bosques y residuos agrícolas [20]. Los procesos de producción de bioenergía pueden ser muy diferentes y pueden incluir varias fuentes, tales como la madera para la producción de energía térmica o la producción de semillas oleaginosas para la extracción de aceite para producir biodiesel [17].

### **Biomasa Lignocelulósica**

La biomasa lignocelulósica producida a través del proceso de la fotosíntesis, en el que se aprovecha la energía solar y el bióxido de carbono atmosférico para la producción de azúcares y otros compuestos orgánicos, es una fuente de carbono renovable, con potencial de reemplazar en parte el uso de los combustibles fósiles para la generación de energía dada su composición rica en carbono [21].



**Figura 1.2.** Tipos de biomasa según diferentes clasificaciones. Elaboración propia. Referencias [14,15, 17, 18].

En este tipo de biomasa se incluye todo el material lignocelulósico proveniente de diversas fuentes: bosques y selvas (biomasa natural) de la cual se obtiene leña; plantaciones comerciales para la producción de pulpa, papel o madera y sus residuos generados; plantaciones dendroenergéticas para la producción de biomasa para su transformación en energía: los residuos de las plantaciones agro-industriales de té, café, árboles de caucho, palmas de aceite y cocoteros, plantaciones de bambú y pastos altos; e incluye los árboles cultivados fuera de los bosques, como arbustos, árboles urbanos, árboles de la carretera y árboles en zonas agrícolas en etapa de sucesión [5, 23]. La biomasa lignocelulósica es una fuente importante de masa biológica, aportando múltiples beneficios medioambientales y ofreciendo una fuente potencial de ingresos adicional para los agricultores. No obstante,

debido a la demanda competitiva de tierras y las preocupaciones sobre la seguridad alimentaria, los cultivos de energía perennes deben asignarse a tierras agrícolas que no son rentables para alimentos (marginales), para aumentar la rentabilidad y mantener la capacidad del lugar. Cuando se cultivan en tierras marginales, se espera que logren la mitigación máxima del cambio climático, p.e. secuestro de carbono [24].

Existe un enorme potencial de biomasa leñosa sin explotar, particularmente a través de la mejora de la utilización de los bosques existentes y otros recursos terrestres y en la mayor productividad de las plantas [22]. En el futuro, las investigaciones deben centrarse en las interacciones genotipo  $\times$  ambiente (G  $\times$  E) en una amplia gama de sitios, en particular abordando las limitaciones en tierras marginales, incluidas las respuestas a la disponibilidad de agua [24].

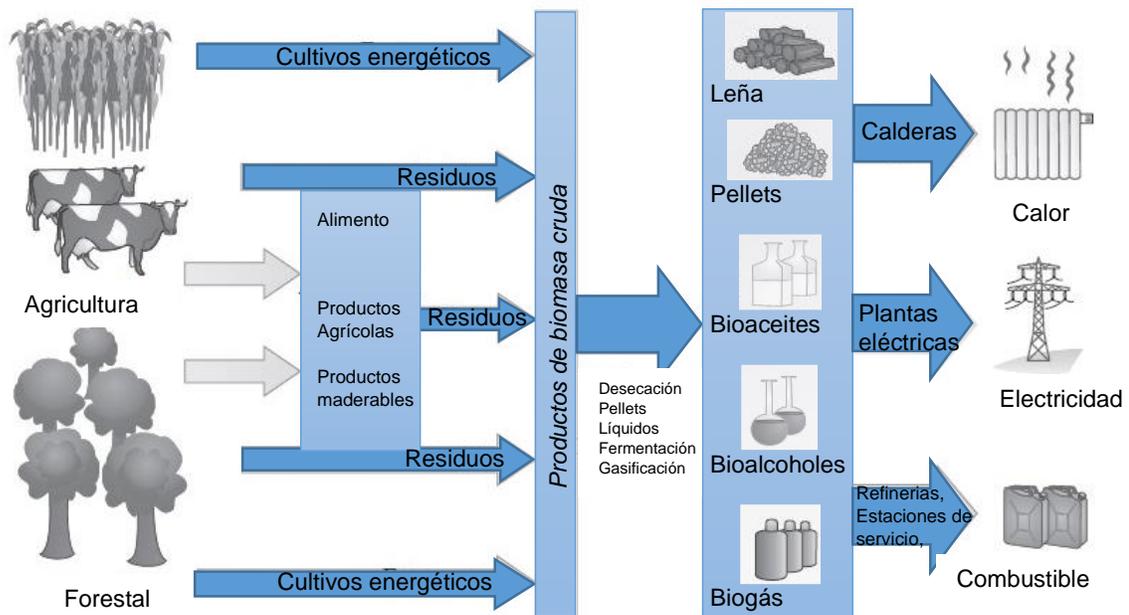
## 1.2 Bioenergía

No existe una definición universal para la bioenergía; sin embargo, se entiende como la energía obtenida a través de la biomasa transformada en energía en forma directa o a través de biocombustibles en estados sólido, líquido o gaseoso.

La bioenergía tiene interacciones ambientales y sociales complejas, incluyendo la retroalimentación con el cambio climático [15], es decir, la biomasa solo conduce a una transferencia más rápida de CO<sub>2</sub> a la atmósfera para que las plantas utilicen nuevamente el CO<sub>2</sub> para producir nueva biomasa [25]. De acuerdo al tipo de biomasa utilizada y al tipo de biocombustible deseado, el proceso de conversión está fuertemente influenciada por sus características físicas y su composición química.

Los procesos para la producción de energía a partir de biomasa se pueden dividir básicamente en tres categorías principales: rutas de conversión termoquímica, físico-química y biológica [26]. Los biocombustibles producidos se puede utilizar en motores del sector transporte, turbinas, hornos o calderas para proporcionar energía térmica y/o mecánica, convertible a su vez en energía eléctrica (figura 1.3) [27]. La opción para cada uno de ellos, depende de la accesibilidad de la materia prima y la eficiencia calculada en función de sus características (contenido de humedad, composición química y tecnología aplicada) [18].

Las principales fuentes de bioenergía obtenida de biomasa sólida son la madera y los productos derivados de la madera, los desechos agroindustriales sólidos, la paja y los cultivos energéticos, y otros productos de madera como los tableros de madera, corteza y desechos de aserraderos, troncos, leña, astillas de madera, briquetas y pellets de madera [3].



**Figura 1.3.** Tipos de procesos de conversión de biomasa y sus productos energéticos, Fuente [3].

### 1.2.1 Métodos de obtención de energía

El proceso de producción de biodiesel es aquel que utiliza biomasa rica en aceites, los cuales se transforman químicamente en una mezcla de hidrocarburos similar al diésel [9]. La soja y la canola son ejemplos de cultivos de semillas oleaginosas que se pueden utilizar en la producción de biodiesel. Los residuos de aceites vegetales reciclados de restaurantes y las grasas de la producción animal también se pueden procesar a biodiesel, así como las microalgas plantas acuáticas fotosintéticas que producen y acumulan cantidades significativas de aceite [18]. El método comercialmente utilizado para la producción de biodiesel es la transesterificación del aceite vegetal, la cual se efectúa mediante la reacción de los triglicéridos que conforman el aceite vegetal con un alcohol en presencia de un catalizador, obteniéndose el biodiesel y glicerina como subproducto, para llevar a cabo la

reacción se requiere una determinada temperatura, tiempo de reacción, cantidad de ácidos grasos libres, contenido de agua de los aceites y el tipo de catalizador (ácido o básico) [14].

De la conversión biológica de la biomasa se pueden obtener principalmente biogás y bioetanol dependiendo si el proceso se lleva a cabo en condiciones anaeróbicas o aeróbicas, respectivamente.

El **biogás** se obtiene de la fermentación anaeróbica, también llamada oxidación parcial de la materia orgánica como el estiércol, los residuos de cultivos agrícolas, los cultivos de energía dedicados y los residuos de procesamiento de alimentos. La digestión de estos productos por bacterias, en ausencia de oxígeno, para generar el biogás que está compuesto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) (50-60%) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (35-40%). La composición final del biogás dependerá de la fuente de origen (composición de la biomasa) de la biomasa, así como las condiciones de temperatura y humedad [14]. El biogás se puede utilizar para proporcionar calor y electricidad, si se usa en unidades de cogeneración, en cuyo caso produce ambas al mismo tiempo [3].

El **bioetanol** es un producto químico obtenido de la fermentación, a través de microorganismos, de azúcares provenientes de mono, di y oligosacáridos así como de polisacáridos como el almidón o la celulosa [3]. Para la producción de este biocombustible se usan de especies ricas en azúcares o almidón, por ejemplo los cereales (maíz, trigo, cebada, etc.), la remolacha azucarera, la caña de azúcar, el sorgo, la patata u otros cultivos energéticos, así como de los excedentes de alcoholes vínicos; sin embargo, para las especies biomasa ricas en almidón o lignocelulósicas, se requiere de una etapa de pretratamiento adicional para la obtención de los azúcares que son fácilmente convertibles en etanol [15].

De la conversión termoquímica se puede obtener calor, un gas pobre o también llamado gas de síntesis o syngas, el biochar y el bioaceite, dependiendo del proceso utilizado ya sea combustión, pirólisis o gasificación. La biomasa que se utiliza en esta conversión es aquella que tiene un bajo contenido de humedad, por lo general menor del 30%, que en su composición química presenta componentes de alto poder energético para su transformación en energía. La combustión directa es el proceso más elemental y, por supuesto, el más antiguo de recuperación energética de la biomasa. Se entiende por combustión a la oxidación completa de la materia, en presencia de un exceso de oxígeno, con la generación de dióxido de carbono, vapor de agua, cenizas y calor, siendo este último el único

componente energético útil del proceso. Este calor puede ser utilizado para calefacción o cocción de alimentos [28].

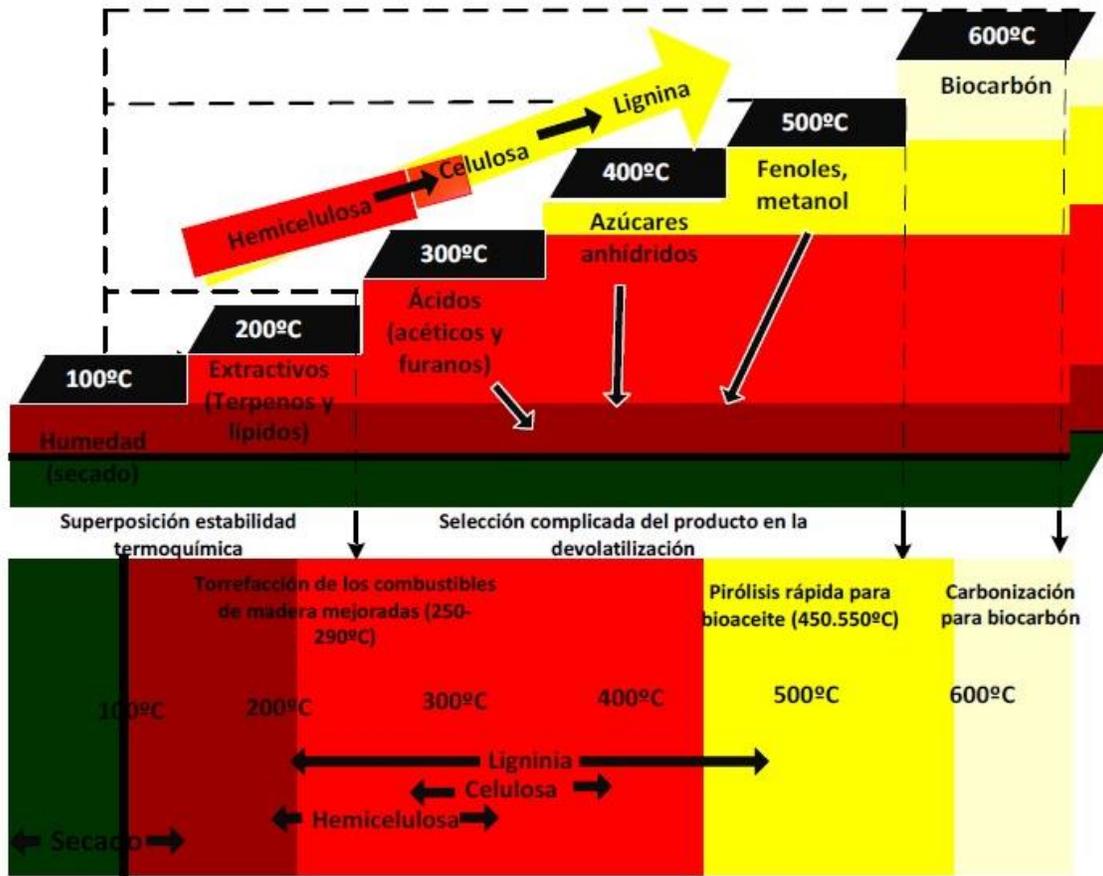
Los otros procesos termoquímicos se describen a continuación

### **Pirolisis.**

Este proceso consiste en el craqueo de la materia orgánica por la acción del aumento de temperatura en ausencia de oxígeno. Aunque la descomposición térmica de la materia orgánica es muy compleja se distinguen varias etapas a lo largo del proceso: la pirolisis comienza alrededor de los 200°C con el desprendimiento de los compuestos volátiles más simples en forma de gases no condensables ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ) y gases condensables, formados por la descomposición térmica de las moléculas presentes en la materia orgánica y es prácticamente completa a los 450°C. En esta etapa algunos hidrocarburos de molécula larga condensan a temperatura ambiente en forma de "bioaceite" o alquitrán [19]. Durante la segunda fase del proceso de pirolisis, las moléculas largas de hidrocarburos se rompen en moléculas más pequeñas y volátiles, este proceso se lleva a cabo a temperaturas más altas. El producto final es un sólido rico en carbono llamado biochar. Los factores que contribuyen a la variación y composición de los productos finales obtenidos y de las fracciones de gas, líquido y sólido son: la rampa de incremento de temperatura dentro del reactor, la presión, y el tiempo de residencia de los gases [28]. La pirolisis a baja temperatura produce principalmente biochar y bioaceite mientras que la pirolisis a alta temperatura favorece la producción de syngas. Se ha reportado que la fracción líquida (bioaceite) es el principal producto de la pirolisis con rendimientos del 40-75% [2].

La pirolisis de biomasa lignocelulósica, debido a la estructura química de los componentes estructurales (celulosa, hemicelulosa y lignina) y compuestos de bajo peso molecular o extraíbles, favorece que el proceso de desvolatilización se presente primero en los componentes de bajo peso molecular (Figura 1.4). El primer paso de la desvolatilización es la eliminación del agua que se presenta desde el inicio de calentamiento hasta cuando la temperatura de la partícula ha alcanzado los 100°C. La descomposición de la hemicelulosa y de los extraíbles se da en un intervalo de temperatura entre 200-300°C; en esta etapa se generan los terpenos, lípidos, furanos y algunos ácidos orgánicos. Posteriormente a los 300-400°C se descompone la celulosa cuyos principales productos son los anhidroazúcares, fenoles, levoglucosano y celobiosa. Finalmente, la lignina empieza a descomponerse desde los 300°C hasta los 500°C, con una descomposición lenta debido a

su compleja estructura molecular. La principal fuente de carbón vegetal producido durante el proceso de pirolisis podría ser proveniente de lignina no transformada [29].



**Figura 1.4.** Secuencia de desvolatilización de biomasa lignocelulósica [29].

La pirolisis se clasifica en: pirolisis rápida, pirolisis intermedia, torrefacción y carbonización; las condiciones de operación de cada proceso y el rendimiento se ilustra en Figura 1.5. Los productos de la pirolisis tienen diferentes aplicaciones energéticas, ya sea para turbinas y motores eléctricos, calderas y combustión para generar calor [29].

La pirolisis rápida es un proceso a alta temperatura en el que la biomasa (con una humedad inferior al 10%) se calienta rápidamente en ausencia de oxígeno a temperaturas de 500°C, la biomasa se descompone generando vapores, aerosoles, y carbonizado en menor cantidad; después del enfriamiento y la condensación de los vapores y aerosoles, se obtiene un líquido marrón oscuro con un poder calorífico de aproximadamente la mitad del aceite combustible convencional. Este proceso produce entre 75% de líquido, 12% de

sólidos, y 13% de gases no condensables, dependiendo de la materia prima utilizada, la temperatura y presión de operación, la velocidad de calentamiento, el tamaño de partícula de la biomasa, la configuración del reactor y la presencia de catalizadores [29].

La pirolisis intermedia ocurre a temperaturas moderadas alrededor de 400-500 °C, a través de las cuales se obtienen aproximadamente tres fracciones. Se requieren tiempos de reacción y transformación más largos que la pirolisis rápida debido a los bajos valores de temperatura y calentamiento; en general, este tipo de pirolisis produce el 50% de líquido, el 25% de biocarbón y el 25% de gas [30].

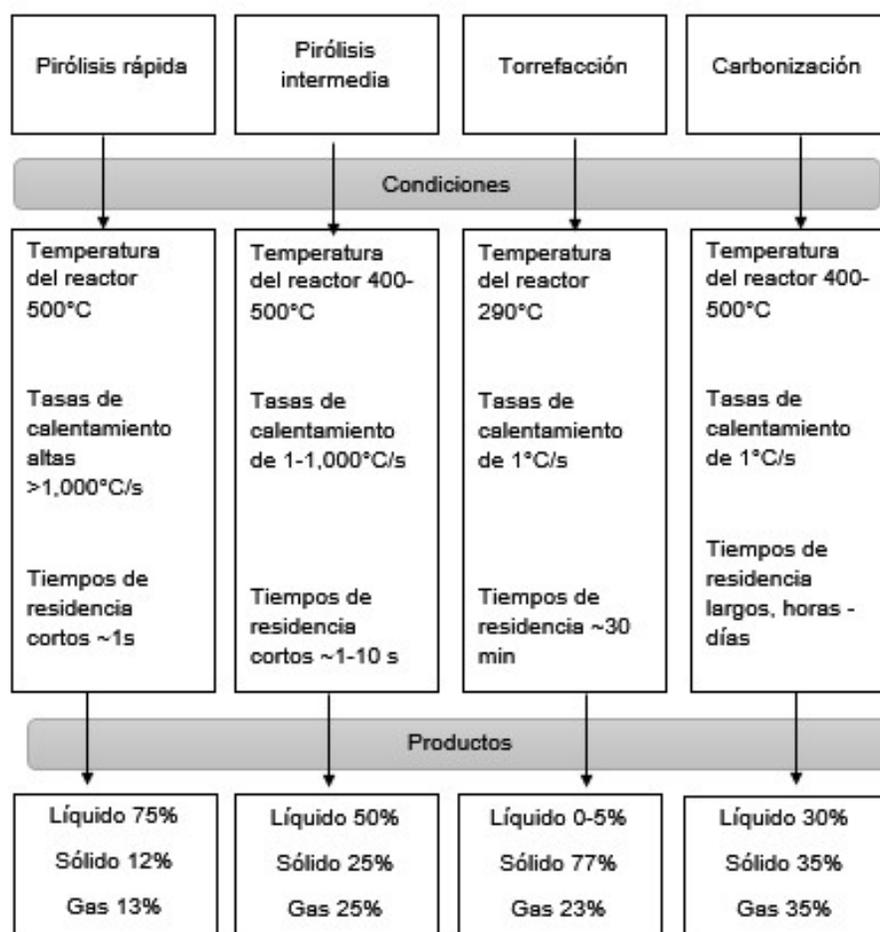
La torrefacción es un tratamiento térmico que transforma la biomasa en un sólido con mayor densidad energética, más fácil de triturar, una menor relación Oxígeno/Carbono y una naturaleza menos higroscópica que la biomasa original. En este proceso, la biomasa se seca y se desvolatiliza parcialmente, disminuyendo su masa, pero manteniendo su contenido energético. El proceso de torrefacción se da a tasas de calentamiento y temperaturas bajas (200-300°C), produciendo mayor cantidad de biocarbón 77%, alrededor de 23% de gas y menos del 1% de líquido [29]

La carbonización también denominada pirolisis lenta, se ha aplicado convencionalmente para la producción de carbón vegetal en medios rurales, debido a los largos tiempos de residencia (días), temperaturas relativamente bajas (alrededor de 500 °C), y el uso de una amplia gama de tamaños de partículas (5-50 mm). La descomposición térmica de la biomasa (principalmente de tipo lignocelulósico) se produce a una tasa de calentamiento muy baja, con tiempo suficiente para reacciones de repolimerización para maximizar los rendimientos de sólidos [31]. En este tipo de pirolisis también se producen líquidos pirolíticos (30%) o bioaceite así como gases incondensables (35%) y el sólido corresponde al 35%.

### **Gasificación**

La **gasificación** es un proceso de conversión térmica la cual ocurre en presencia limitada de oxígeno y donde el material carbonoso es transformado a un gas rico en CO y otros productos [28,29]. Este proceso ocurre en tres etapas: 1) etapa de pirólisis, donde el material se descompone térmicamente produciendo una fracción gaseosa compuesta de volátiles condensables y no condensables, así como un residuo carbonoso llamado biocarbón. 2) En la segunda etapa, se llevan a cabo reacciones de oxidación de gases y del biocarbón producidos en la primera etapa, consumiéndose en esta etapa la mayor parte

del oxígeno alimentado al gasificador. Estas reacciones son exotérmicas y generan el calor necesario para llevar a cabo las reacciones de gasificación. 3) En la tercera etapa, se producen las reacciones entre la fracción gaseosa (CO y H<sub>2</sub>O) y el char activo, generando CO y H<sub>2</sub>. Las reacciones de gasificación tienen lugar como consecuencia de que se alimentan únicamente entre 1/3 y 1/5 del oxígeno estequiométrico para la combustión total. Generalmente estas reacciones ocurren en un amplio rango de temperatura, desde los 750°C hasta los 1100°C [29].



**Figura 1.5.** Tipos de pirólisis y sus productos finales. Elaboración propia con datos [29]

El poder calorífico del gas obtenido dependerá del agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua, bióxido de carbono) y tecnología (gasificador de lecho fijo, lecho fluidizado, etc.) utilizada. El gas que se obtiene mediante la gasificación de biomasa seca (humedad inferior

al 20%) tiene un poder calorífico bajo (3 a 7 MJ/m<sup>3</sup>), por lo que se denomina asimismo gas pobre, utilizándolo principalmente en unidades de combustión para obtener electricidad y vapor. Cuando se realiza la gasificación con oxígeno puro se obtiene un gas con valores entre 10 y 12 MJ/m<sup>3</sup>. Si el agente gasificante es vapor de agua se obtiene un gas con mayor poder calorífico (15-20 MJ/m<sup>3</sup>), aunque estos valores no son tan altos como el del butano o del gas propano (50 MJ/kg) [28, 32].

### **1.3 Composición y propiedades térmicas de la biomasa leñosa**

Considerando la composición macro de la biomasa, podemos expresarla en función de agua, materia orgánica y cenizas, con la parte orgánica de la biomasa conteniendo toda la energía química [23]. La composición química de la biomasa depende en gran medida de su fuente [18]. Los valores de poder calorífico pueden variar mucho según su composición química y estado físico [22]. La composición química de la biomasa original se puede conocer realizando análisis de los elementos más importantes, como carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S), y en algunos casos cloro (Cl). El oxígeno (O) no se determina directamente, sino que se calcula a partir de la diferencia entre el peso total y la suma del resto de elementos más las cenizas [15].

Toda la biomasa presenta un cierto contenido de humedad, el que puede influir en la cantidad de energía que se puede recuperar. Cuando se quema la biomasa, parte de la energía liberada se utiliza para convertir el agua absorbida por la biomasa en vapor de agua, por lo que mientras más seca se encuentre la biomasa, mayor energía se tendrá disponible. Por lo anterior, el contenido de humedad afecta en forma apreciable el valor energético de la biomasa. [22]. En algunas especies de biomasa leñosa utilizada con fines energéticos contienen hasta 55% de humedad en su contenido [15].

Se conoce como cenizas al residuo inorgánico que queda luego de que la biomasa ha sido sometida a combustión completa. Los principales elementos presentes en las cenizas son el Na, K, Ca, Si, Fe, Mg, Mn, Cl, Cr. La biomasa lignocelulósica por lo general tiene contenidos de cenizas menores al 1% [29]. Especies como el *Salix spp* y *Paulownia spp*, ambas utilizadas con fines energéticos contienen hasta 4.5% de cenizas [15]. Los residuos como las cenizas se emplean en suelos forestales con la finalidad de devolver al sistema buena parte de los nutrientes extraídos durante el aprovechamiento forestal, con un efecto

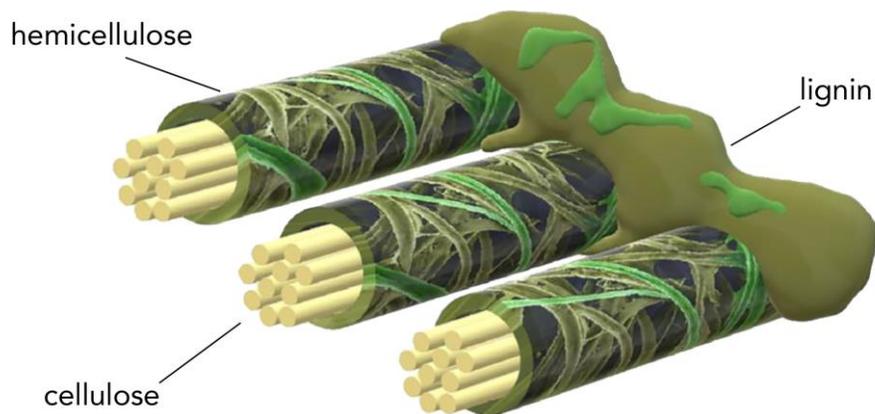
positivo sobre la acidez y el nivel de diferentes nutrientes del suelo, aumentando las concentraciones de Calcio y Magnesio [33].

La composición química de la biomasa leñosa es compleja debido a que se tiene un gran número de moléculas y estructuras químicas que pueden estar presentes. Sin embargo, la conforman pocos elementos químicos, siendo los elementos principales: Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Azufre (S) y Cloro (Cl). El principal componente de la biomasa es el Carbono y que representa un 30 a un 60% del peso de la materia seca; el oxígeno es el segundo componente con un 30 a 40% de peso de la materia seca; y el Hidrógeno es el tercer componente en abundancia con contenidos del 5 a 6% de la materia seca. Los elementos restantes N, S y Cl suelen presentar valores del 1% de materia seca, pero puede exceder este valor en algunos tipos de biomasa [34].

### **1.3.1 Composición química y degradación térmica**

La madera es un material tridimensional cuya composición química general está formada por compuestos estructurales que dan soporte mecánico a las plantas como la lignina, celulosa y hemicelulosa; compuestos esenciales o primarios como proteínas, polisacáridos, aminoácidos, etc. que tienen un papel metabólico en el crecimiento y desarrollo de las plantas; y metabolitos secundarios (terpenos, alcaloides, derivados fenólicos, etc.) que no cumplen una función vital para la planta. Los principales componentes que caracterizan energéticamente la biomasa sólida son aquellos que se encuentran en la pared celular de las plantas.

En la figura 1.6 y en la tabla 1.1 se observa que la biomasa leñosa está conformada principalmente de lignina, celulosa y hemicelulosa y en menor cantidad los compuestos extraíbles (metabolitos primarios y secundarios) y las cenizas [21]. La composición de la biomasa lignocelulósica varía de una especie de planta a otra, con diferentes especies produciendo maderas duras, maderas blandas y pastos. Además, la composición dentro de una sola planta también difiere con la edad, la etapa de crecimiento y las condiciones bajo las cuales la planta crece [35].



**Figura. 1.6** Estructura de la biomasa lignocelulósica [30]

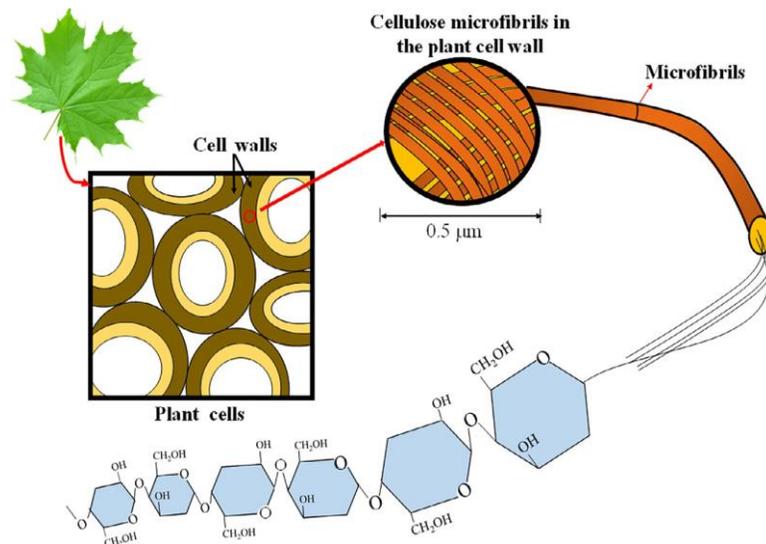
Tabla 1.1. Composición química de la Biomasa leñosa, el porcentaje variará entre el tipo de madera [23].

Componente	Biomasa leñosa %
Celulosa	55-65
Hemicelulosa	10-20
Lignina	20-30
Extractivos y otros	10-20
Cenizas	0.1-0.5

Extraíbles. Son los productos naturales periféricos a una pared celular de lignocelulosa, que pueden eliminarse fácilmente con solventes como acetona, benceno, etanol, agua fría y éter, entre otros disolventes [36]. Estos compuestos se forman como resultado de los procesos metabólicos de la planta y se pueden clasificar como metabolitos primarios y secundarios. Los metabolitos primarios son los intermedios en los procesos metabólicos intermedios de la planta e incluyen aminoácidos, ácidos carboxílicos, grasas simples, azúcares simples, etc. Los metabolitos secundarios son más complejos que los primarios y tienen una distribución taxonómica restringida, forman la base para la quimiotaxonomía, ya que caracterizan los sistemas enzimáticos que los producen. Algunos ejemplos comunes de extractos secundarios incluyen los alcaloides, flavonoides complejos, monoterpénos, sesquiterpénos, acetogeninas, glucósidos de fenol, cumarinas, glucósidos cianogénicos y otros fenólicos complejos [37].

La presencia de extraíbles incrementa el poder calorífico de la biomasa y favorece la descomposición de la lignina para la formación de homólogos fenólicos, sin evidente diferencia térmica entre la biomasa original y los residuos extraídos [38]. La influencia de los extractos en la distribución del producto de la pirólisis de biomasa es causada por los diferentes tipos y contenidos de las unidades de lignina, así como la existencia de extractos que catalizan la formación de compuestos ácidos como el ácido acético e inhiben la formación de levoglucosano, mientras que su ausencia mejora la formación de CO<sub>2</sub> y agua [38].

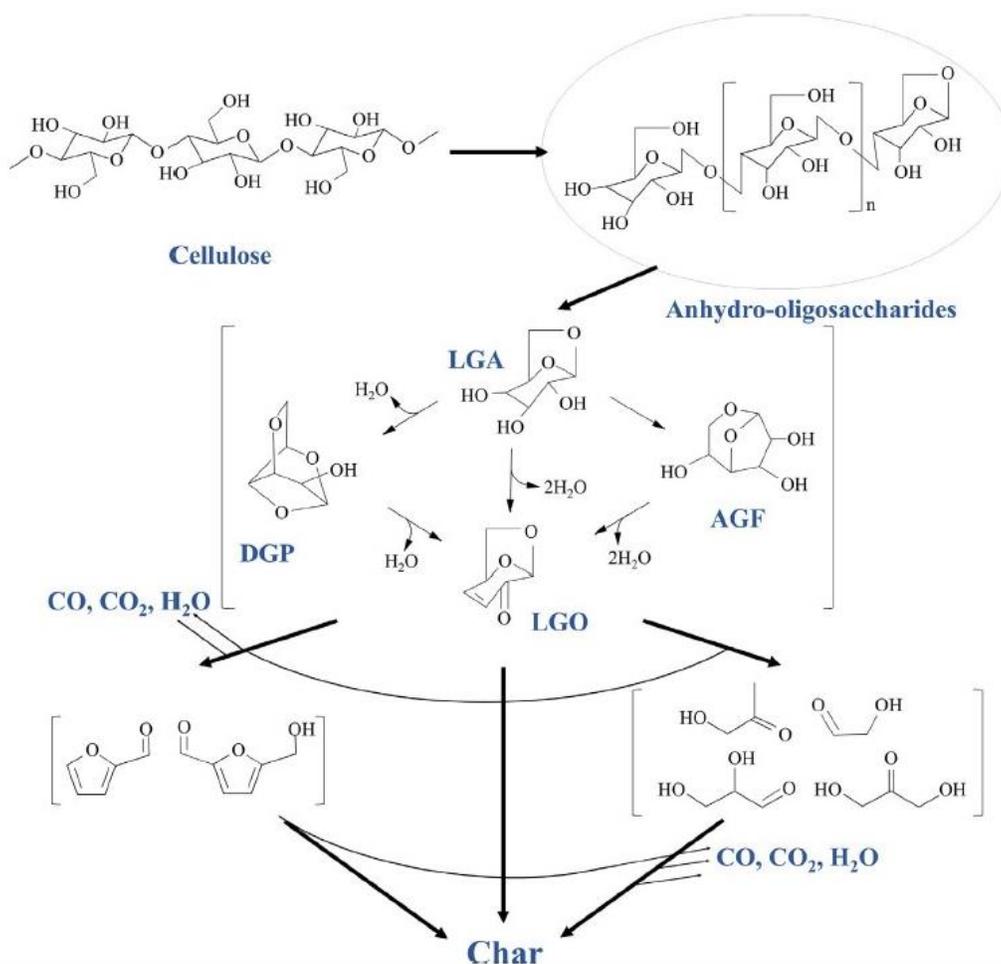
**Celulosa.** Es un componente estructural esencial de la pared celular primaria de las plantas verdes, muchas formas de algas y de los oomicetos. Es un polisacárido de cadena lineal de unidades D-glucosa (también conocidas como piranosa) reiteradas, conectadas por enlaces acetilo (enlace de glucósido  $\beta$ -1,4). Las cadenas de celulosa se agrupan para formar fibras de celulosa, que están unidas por enlaces de hidrógeno y van der Waals, formando microfibrillas largas que están dispuestas como una malla entrecruzada en la pared celular, la estructura cristalina de la celulosa proporciona resistencia, fuerza y forma a las hojas, raíces y tallos de una planta (Figura 1.7) [36], y junto con la hemicelulosa y lignina, que actúan como aglutinantes, constituyen la pared celular de las células vegetales [16].



**Figura 1.7** Fibras de celulosa en la pared celular [36].

La descomposición térmica de la celulosa tiene lugar mediante la escisión brusca del enlace glucósido  $\beta$ -1,4 en el rango de temperatura de 315-400 °C, en cuyo proceso la celulosa inicialmente se despolimeriza a oligosacáridos, que continúan descomponiéndose hasta

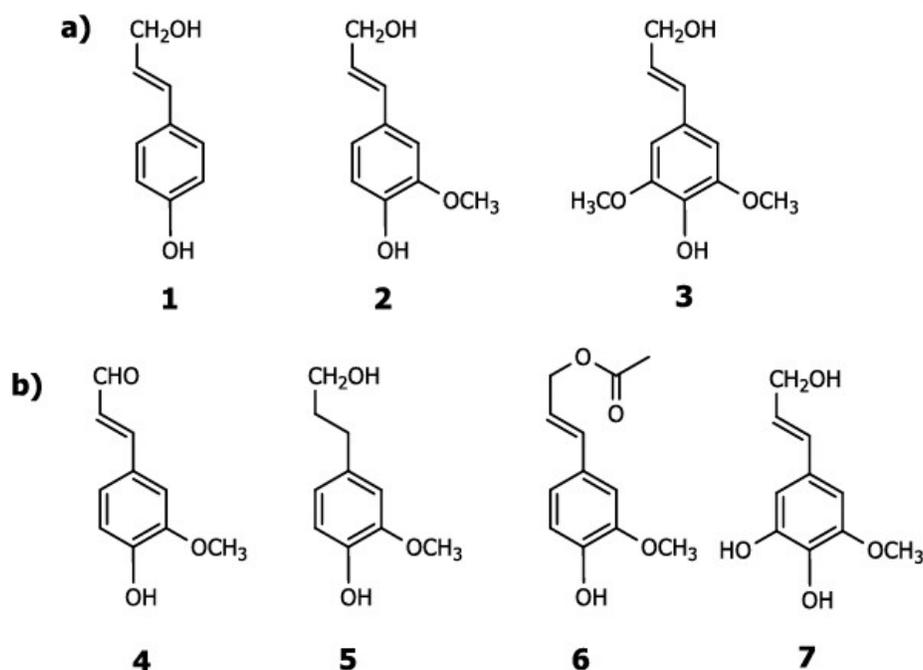
que se forman anhidro-monosacáridos (Figura 1.8). El levoglucosano (LGA) formado como el primer producto de esta secuencia de descomposición y puede sufrir reacciones de deshidratación e isomerización para formar otros anhidromonosacáridos como 1,4: 3,6-dianhidro- $\alpha$ -D-glucopiranososa (DGP), levoglucosenona (LGO), y 1,6-anhidro- $\beta$ -D-glucofuranosa (AGF). Estos anhidros azúcares pueden reaccionar aún más para formar furanos por reacciones de deshidratación, hidroxiacetona, glicolaldehído o gliceraldehído por fragmentación y reacciones de condensación de retroaldol. El CO y el CO<sub>2</sub> se forman como resultado de las reacciones de descarboxilación y descarboxilación, mientras que la polimerización de los productos de pirólisis produce carbón [36].



**Figura 1.8** Mecanismo de descomposición de celulosa [39]

Lignina. Es el segundo biopolímero más abundante, después de la celulosa, en la tierra. En las plantas terrestres actúa como agente de unión de los tejidos celulares juveniles y como agente de refuerzo en las paredes celulares maduras. No presenta una estructura

definida o única, ya que en las plantas se obtiene a partir de la polimerización por medios enzimáticos de tres estructuras aromáticas (alcohol cumarílico, alcohol sinapílico y alcohol coniferílico), que se diferencian de acuerdo al número de grupos metoxilo (-OCH<sub>3</sub>) presentes en el alcohol (Figura 1.9).



**Figura 1.9.** a) tipos de monolignoles más comunes encontrados en los bloques de construcción de la lignina: 1: alcohol p-cumarílico, 2: alcohol coniferílico, 3: alcohol sinapílico, b) otros tipos de monolignoles (coniferil-derivados), 4: coniferaldehído, 5: alcohol dihidroconiferílico, 6: alcohol 9-acetatoconiferílico, 7: alcohol 5-hidroxiconiferílico [40].

La lignina cumple múltiples funciones que son esenciales para la vida de las plantas. Por ejemplo, posee un importante papel en el transporte interno de agua, nutrientes y metabolitos. Proporciona rigidez a la pared celular y actúa como puente de unión entre los polisacáridos estructurales de la madera (celulosa y hemicelulosa), creando un material que es notablemente resistente a los impactos, compresiones y flexiones. Realmente, los tejidos lignificados resisten al ataque de los microorganismos, impidiendo la penetración de las enzimas para su degradación química y biológica. La estructura y composición química de la lignina está determinada por el tipo y la edad de la planta. La naturaleza amorfa de la lignina dificulta caracterizarla en términos simples o desarrollar un estudio preciso de sus reacciones químicas específicas. Esto se ha resuelto con el uso de compuestos modelos que representen los enlaces y las estructuras presentes en la matriz de la lignina [41].

Una de las propiedades físicas de la lignina es que es un biopolímero insoluble en ácidos y solubles en álcalis fuertes como el hidróxido de sodio, donde el grado de lignificación afecta notablemente a la degradabilidad de la fibra. La lignina, que aumenta de manera ostensible en la pared celular de la planta con el curso de la maduración, es resistente a la degradación bacteriana, y su contenido en fibra reduce la digestibilidad de los polisacáridos fibrosos.

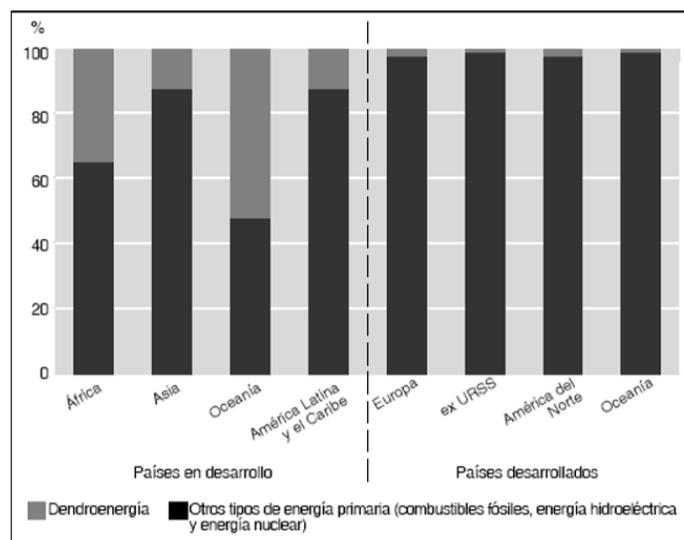
La degradación térmica de la lignina experimenta tres etapas consecutivas, que corresponden a la evaporación del agua, la formación de volátiles primarios y la posterior liberación de gases moleculares a 160-900°C [38]. Los volátiles principales son compuestos fenólicos, además de alcoholes, aldehídos, ácidos, etc. con la liberación de productos gaseosos como CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> a 162°C hasta 900°C. [38]. La principal fuente de char producido durante los procesos de pirólisis podrían ser provenientes de lignina no transformada [29]

#### **1.4 Cultivos dendroenergéticos**

La biomasa lignocelulósica se obtiene de diferentes fuentes, que incluyen los bosques y selvas, los residuos agrícolas y forestales, tanto de especies de madera dura como de madera blanda, así como de cultivos energéticos [42]; la finalidad de estos últimos es producir mayor biomasa, para su uso en producción de bionergía por unidad de superficie aumentando la eficiencia del uso de la tierra [35]. Es una práctica común en muchos países establecer plantaciones multipropósito que sirvan al ganado, cultivos alimentarios y pastos; al mismo tiempo que pueden proporcionar otros beneficios tales como la captura de carbono, reducción de la erosión del viento y de la pérdida de humedad superficial. Estas plantaciones bien planificadas producen más biomasa de manera sostenible y pueden ser una fuente de biomasa leñosa. La biomasa leñosa se obtiene de ramas secas o producto de podas de los árboles, de la producción de madera (como astillas o gránulos de aserrín) y otros residuos generados en las plantaciones [26]. La biomasa leñosa también puede obtenerse de cultivos dedicados solamente para la generación de energía, llamados cultivos dendroenergéticos, los cuales son por lo general, implementados en suelos marginales para la producción agraria y forestal [43]. La dendroenergía es considerada como uno de los nuevos mercados de la energía de los países industrializados como una fuente de energía limpia y disponible localmente [44]. Esta energía se obtiene de biomasa lignocelulósica o biomasa leñosa proveniente de cultivos energéticos de álamos, aromos,

acacias y eucaliptos, donde su principal objetivo es obtener biomasa para usarla como materia prima en la producción de bioenergía orientada al consumo industrial o doméstico, ofreciendo una alternativa más para el sector forestal en terrenos marginales que están sin uso o en terrenos desprovistos de bosque u otra cubierta vegetal permanente. Estos cultivos favorecen la acumulación de carbono y la recuperación de los niveles de calidad del suelo [45]. Para su implementación se deben tomar en cuenta cinco criterios: 1) áreas forestales con vegetación secundaria, 2) pendientes menores a 15°, 3) superficie accesible físicamente alrededor de localidades y al costado de carreteras principales, 4) clasificación del suelo, y 5) precipitaciones totales anuales.

A escala mundial, el 60% de la madera extraída de bosques y otras áreas forestales es aprovechada con fines energéticos. En países en desarrollo como África representa el 89% de consumo de combustibles dendroenergéticos (Figura 1.10) [44].



**Figura 1.10.** Porcentaje de combustibles de madera utilizados a nivel mundial. Fuente *Sistema de información sobre dendroenergía de la FAO* [44].

El uso de la biomasa leñosa, por sus características fisicoquímicas y de crecimiento, ofrece la posibilidad de controlar el coste de producción y la rentabilidad de los cultivos energéticos [15]. Esto favorece económicamente la actividad, aunado a las tecnologías compatibles con el medio donde se desarrollen y no perjudiquen al medio ambiente, conservándolo y mejorándolo [46]. Estos sistemas de producción se caracterizan por producir biomasa en combinaciones del clima y suelo, en ciclos cortos de aprovechamiento inferiores a los cinco años, con el uso de especies con capacidad de rebrote, que regenere el material

fotosintético para repetir el aprovechamiento forestal sin degradar el suelo por desmonte, tala o erosión [45].

#### **1.4.1 Tipos de ecosistemas y disponibilidad de biomasa leñosa en Yucatán**

Las especies de plantas presentes en un área determinada conforman comunidades vegetales con características climáticas y/o edáficas distintas de acuerdo a su territorio. La vegetación presente en los ecosistemas del estado de Yucatán se distribuye acorde a los recursos disponibles como suelo, nutrientes y disponibilidad de agua [47]. La selva baja caducifolia y selva baja espinosa tipifican la fisionomía del paisaje yucateco, sus comunidades vegetales arbóreas son las que mayormente se distribuyen en el estado, primordialmente leguminosas con tamaños entre 6 y 12 metros de altura. La selva mediana subcaducifolia junto con las selvas bajas es otro ecosistema representativo de la fisionomía de Yucatán (Tabla 1.2) [47]. El cambio en el uso del suelo de forestal a agrícola, agropecuario y/o urbano, ha provocado cambios en la estructura y composición florística de los remanentes de selva; sin embargo, tras el abandono de estas prácticas agrícolas o agropecuarias y mediante el proceso de sucesión ecológica, se desarrolla la vegetación secundaria, la cual puede ser transitoria y, con el paso del tiempo y dadas las condiciones adecuadas, puede dar lugar a la vegetación madura [48]. En las fases de la sucesión se encuentran una serie de componentes biológicos que pueden ser de utilidad para el hombre, como por ejemplo la existencia de grupos de especies vegetales de rápido crecimiento, así como algunos grupos adaptados a condiciones extremas que pueden resultar susceptibles de explotación [49].

Existe un modelo general de cuatro etapas para la sucesión secundaria de las selvas húmedas: en la primera fase destacan las hierbas, arbustos, lianas y trepadoras que colonizan el sitio; la segunda fase es dominada por los árboles pioneros de rápido crecimiento y corta vida, que crean un dosel cerrado bajo cuya sombra desaparecen las especies que dominaron la primera etapa, los árboles pioneros de corta vida son sustituidos por árboles pioneros de larga vida, los cuales dominan la tercera etapa; finalmente, las especies tolerantes a la sombra se establecen desde las primeras etapas y dominan progresivamente la cuarta y última fase [48].

La gran diversidad tanto biológica como cultural de Yucatán ha ido transformándose a través de los años, modificando los usos de suelo y eliminando la cubierta vegetal

primaria de los ecosistemas selváticos por terrenos de cultivo, actividades ganaderas o desarrollo rural [50]. En la tabla 1.2 se muestran las especies más abundantes en los tipos de selvas presentes en el Estado de Yucatán.

**Tabla 1.2.** Características de los ecosistemas predominantes en el Estado de Yucatán. Elaboración propia con datos de SEDUMA [47]

Ecosistema	Especies presentes	Características abióticas	Altura promedio de los árboles
Selva Baja Caducifolia	<i>Ceiba aesculifolia</i> , <i>Jatropha gaumeri</i> , <i>Metopium brownei</i> , <i>Alvaradoa amorphides</i> , <i>Bursera simaruba</i> , <i>Chlorophora tinctoria</i> , <i>Senna emarginata</i> , <i>Bauhinia divaricata</i> , <i>Piscidia piscipula</i> , <i>Plumeria rubra</i> , <i>Leucaena leucocephala</i> , entre otras especies	suelos calcáreos con afloramientos de rocas, clima seco, sub-húmedo. Temperaturas de 26 a 27.6°C	12 metros
Selva Mediana Subcaducifolia	<i>Acacia cornigera</i> , <i>Acacia pennatula</i> , <i>Annona reticulata</i> , <i>Bursera simaruba</i> , <i>Enterolobium cyclocarpum</i> , <i>Gymnopodium floribundum</i> , <i>Leucaena leucocephala</i> , <i>Mimosa bahamensis</i> , <i>Piscidia piscipula</i> , entre otras.	Suelos pedregosos con una delgada capa de materia orgánica. Clima cálido a subcálido. Temperatura media anual 25.9 a 26.6°C	10 a 15 metros

#### 1.4.2 Especies con potencial uso como cultivos dendroenergéticos

El papel de la bioenergía en el futuro modelo energético, tanto a nivel internacional como nacional, parece evidente que va a ser muy destacado. La biomasa como recurso energético renovable, abundante y almacenable según su demanda, supone una ventaja importante aunado a la producción de cultivos de especies energéticas para proporcionar energía en forma de calor y electricidad [11].

De entre las especies que se encuentran en los ecosistemas del estado de Yucatán, la *Leucaena leucocephala* (waxim) y *Piscidia piscipula*, (jabín) ambas incluidas en la familia de las Fabaceas, presentan las características adecuadas para ser estudiadas y evaluar el potencial que tienen para ser utilizadas en cultivos dendroenergéticos. Estas especies han sido usadas en otros países como fuentes de biomasa leñosa para la producción de energía.

En la provincia insular de Cebú, que es el centro comercial e industrial de la zona central y meridional de Filipinas, la mayor parte de la producción de combustible de madera procede de un número reducido de especies: *Leucaena leucocephala*, *Leucaena glauca*, *Gliricidia sepium*, *Gmelin-a arborea* y *Swietenia macrophylla* [51]. En México, en el estado de Yucatán *Leucaena leucocephala* se encuentra dentro de las 13 especies principales preferidas como leña con una frecuencia relativa en los hábitos de preferencia del 1.3% [13]. El género *Leucaena* es un gran productor de biomasa y alta capacidad de rebrote (más de 50 toneladas/ha/año) especialmente en cultivos anuales [52]. *Leucaena leucocephala*, es una leguminosa arbustiva/arbórea perenne de uso múltiple ampliamente utilizada en los sistemas agroforestales en los trópicos pues brinda servicios como la fijación de nitrógeno para mejorar la fertilidad del suelo, por sus compuestos ofrece propiedades herbicidas, además la especie es particularmente atractiva para fines agroforestales debido a su crecimiento rápido, facilidad de propagación y tolerancia a la sequía [53]. Los árboles jóvenes alcanzan una altura de más de 6 m en dos o tres años con supervivencia alta y aporta altas cantidades de nutrientes como forraje [54]. Esta especie proporciona efectos beneficiosos en la recuperación de suelos degradados [54, 55], se ha descrito para varios usos (producción de bioetanol, conversión de los cultivos de biomasa a etanol, incluida la fermentación de azúcar [57]; alimentación animal, a productores de ganado de carne en Queensland, Australia, donde crecen pastos de *Leucaena* [58]; producción de papel, pulpa y fabricación de papel de *Leucaena* por el método de soda antraquinona- etanol [52].

En regiones de Cuba, la especie *Piscidia piscipula* es aprovechada por su rendimiento forestal en leña y carbón vegetal, la madera también se emplea en traviesas, postes y construcciones rústicas [59]. Esta especie se le clasifica localmente de buena leña, debido a sus características biológicas como el crecimiento rápido, gran producción de semilla y capacidad de establecimiento de las plántulas[13]. *Piscidia piscipula* es un árbol con alturas promedio de 20 metros. La madera es de color crema amarillenta, está clasificada como madera dura y se utiliza para la fabricación de duelas, parquet y lambrin, así como para durmientes, construcción de casas y armazones de barcos [33]. Esta especie tiene propiedades de alta productividad, asimismo presenta un mecanismo de ajuste a la sequía, tolerando ambientes secos [60].

## **HIPÓTESIS**

Las características químicas y térmicas de las especies *Leucaena leucocephala* y *Piscidia piscipula*, condicionadas a los factores de su crecimiento (edad) son adecuadas para su uso en plantaciones dendroenergéticas.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la composición y propiedades térmicas de las especies leñosas *Leucaena leucocephala* y *Piscidia piscipula* a diferentes edades, así como conocer su forma de crecimiento, para su potencial uso en plantaciones dendroenergéticas.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

1. Determinar la composición química de la biomasa de *L. leucocephala* y *P. piscipula* por edades
2. Cuantificación del potencial calorífico de *L. leucocephala* y *P. piscipula* mediante análisis elemental de muestras de diferentes edades.
3. Realizar pruebas de pirólisis y gasificación de las especies y edades evaluadas
4. Estudiar en tres periodos de evaluación, el crecimiento y supervivencia de *L. leucocephala* y *P. piscipula*.

## CAPITULO 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Obtención de la materia prima y su pretratamiento.

Se cortaron las ramas, situadas entre la copa y el tronco, de las especies en estudio. Los individuos de los que se tomó la muestra eran de aproximadamente 12, 10, 6 y 3 años de edad (Figura 2.1). Las muestras fueron chipeadas y secadas al sol (Figura 2.2); posteriormente se molieron en un molino de cuchillas Brabender y se tamizaron con mallas de 40 y 60 micrómetros, la fracción retenida en éstas mallas se usó en la caracterización de la biomasa.



**Figura 2.1.** Ramas de *L. leucocephala* (a) y de *P. piscipula* (b)



**Figura 2.2.** Chips de madera de *L. leucocephala* (a) y de *P. piscipula* (b)

## 2.2. Análisis proximales de la biomasa

### 2.2.1 Determinación del contenido de humedad

La humedad es una variable física importante que influye en el poder calorífico. Para determinar el contenido de humedad se llevó a cabo el procedimiento método ASTM D 4442-92. De acuerdo con este método se pesaron los gramos de muestra necesarios y se secaron en una estufa de convección a 100 °C hasta peso constante. Para calcular el porcentaje de humedad se aplicó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = \left( \frac{A-B}{A} \right) * 100 \quad (1)$$

Dónde:

*A= Peso de la muestra húmeda, (g)*

*B= Peso de la muestra seca, (g)*

### 2.2.2 Determinación de cenizas

Se determinó la cantidad de cenizas de acuerdo a la norma T-211. Se utilizaron crisoles previamente acondicionados hasta peso constante. Se agregaron las muestras de los residuos libres de humedad a los crisoles y se calcinaron en una mufla marca Felisa a una temperatura de 525 °C durante 60 min, una vez enfriada la mufla se colocaron los crisoles con las muestras en un desecador para su posterior pesado. Para el cálculo de cenizas se utilizó la ecuación:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{P}{Q} * 100 \quad (2)$$

Dónde:

*P= Peso de la ceniza, (g).*

*Q= Peso de la muestra libre de humedad, (g).*

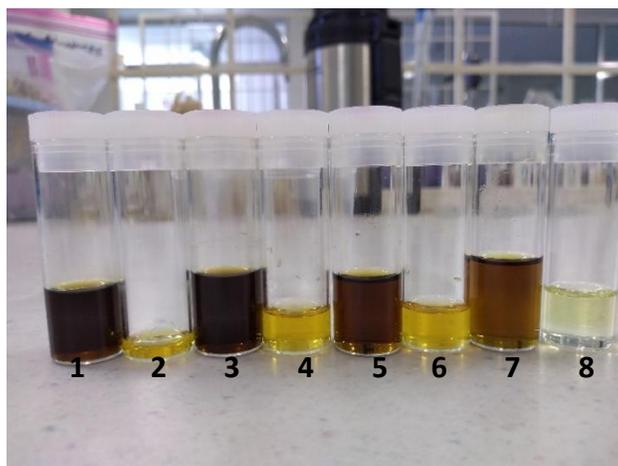
### 2.2.3. Análisis elemental CHONS

El análisis fue realizado en un analizador Thermo Scientific modelo Organic Elemental Analyzer Flash 2000, con un Software Eager Xperience Ver. 1.4 March 2014, con la finalidad de conocer la composición elemental orgánica, colocando 2mg de cada muestra

en una capsula de estaño. Con esta prueba se cuantificó el contenido porcentual (en peso) de carbón, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre de las muestras de biomasa leñosa de las dos especies en estudio y poder conocer el poder calorífico. La determinación del análisis elemental de todas las muestras se realizó por duplicado.

### 2.3. Determinación de extraíbles

Para determinar el contenido de compuestos no estructurales presentes en las biomosas, se extrajeron las muestras con disolventes de baja, mediana y alta polaridad. Para la extracción con disolventes orgánicos, se usó el método T-204 cm-07 de la TAPPI 2007. Se pesaron 2g de la muestra seca y se colocaron en cartuchos de papel filtro puestos previamente a peso constante. Los cartuchos se colocaron en la cámara de extracción de un equipo Soxhlet y se realizó la extracción con una mezcla de benceno-etanol (2:1) por un período de 5 horas. El cartucho se retiró del equipo de extracción, se removió el exceso de disolvente y secó hasta peso constante en una estufa a 100°C por 24 horas. Se repitió el proceso para la extracción de la muestra con etanol, utilizando los cartuchos con fibra de la extracción anterior. En ambos casos, se concentró la muestra líquida utilizando un rotavapor a 80°C, hasta que se obtuvo un volumen aproximadamente de 30 mL (Figura 2.3).



**Figura 2.3.** Concentrado con los compuestos 1: extraíbles de *L. leucocephala* con Benceno-Etanol edad 3 años. 2: extraíbles de *L. leucocephala* con Etanol edad 3 años. 3: extraíbles de *L. leucocephala* con Benceno-Etanol edad 6 años. 4: extraíbles de *L. leucocephala* con Etanol edad 6 años. 5: extraíbles de *P. piscipula* con Benceno-Etanol edad 3 años. 6: extraíbles de *P. piscipula* con Etanol edad 3 años. 7: extraíbles de *P. piscipula* con Benceno-Etanol edad 6 años. 8: extraíbles de *P. piscipula* con Etanol edad 6 años.

La extracción con agua caliente se realizó empleando el método T-207 cm-99 de la norma TAPPI. Aproximadamente 1g de la fibra seca obtenida del proceso anterior, se colocaron en matraces Erlenmeyer de 1L con 560 mL de agua destilada y se calentaron a ebullición durante una hora. La fibra se filtró usando filtros de vidrio poroso de 40-60 micrómetros aplicando vacío. La fibra se sometió a dos ebulliciones más en agua caliente, finalmente se filtraron y se secaron en estufa de convección a 100°C hasta peso constante. El porcentaje de extraíbles en cada etapa fue calculado en relación al peso perdido (peso antes y después de la extracción), con respecto al peso inicial de muestra utilizando la ecuación siguiente:

$$\% \text{ Extraíbles (Ext)} = \left( \frac{C - D}{C} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde:

*C*= Peso de la muestra sin extraer, (g)

*D*= Peso de la muestra extraída, (g)

### 2.3.1 Caracterización de extraíbles.

Se obtuvieron los espectros de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR), usando un Espectrofotómetro de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) modelo 460 Nicolet en el rango de medición de 4000 a 500  $\text{cm}^{-1}$  con una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$ . Se usó el método de transmitancia usando pastillas de KBr obtenidas mediante la compresión del KBr en una prensa hidráulica (Figura 2.4). Se depositaron unas gotas de la muestra de los extraíbles obtenidos con Benceno-Etanol, Etanol y Agua.



a)



b)

**Figura 2.4.** a y b) Elaboración de las pastillas de Bromuro de Potasio (KBr).

Para la determinación de los componentes presentes en los extraíbles, las muestras se analizaron en un cromatógrafo de gases de la marca Agilent 6890N acoplado a un detector de masas modelo 5975BMSD (Figura 2.5). El procedimiento usado fue el siguiente: Las fracciones extraídas con disolventes orgánicos, se concentraron en una campana de extracción hasta la remoción del disolvente y posteriormente se secaron en una estufa de vacío a temperatura ambiente (30°C) hasta peso constante. Las muestras se disolvieron en cloroformo y se colocaron en una columna de vidrio con gel de sílice con la finalidad de filtrarlas. Se adicionó cloroformo hasta observar que el disolvente salió de la columna completamente limpio. El disolvente se colectó y se secó hasta peso constante, se usó cromatografía de capa fina para comprobar que la muestra era una mezcla de compuestos.

## 2.4. Determinación del contenido de componentes estructurales

### 2.4.1 Lignina.

Para determinar el contenido de lignina en la muestra libre de extraíbles se usó el método TAPPI T222. Se pesó 1g de material libre de extraíbles y se sometió a una hidrólisis ácida con 15 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 72 % (p/p). La muestra se mantuvo en agitación en un recipiente con hielo durante 30 minutos, pasado este tiempo se retiró el hielo y la mezcla de fibra con ácido se mantuvo en la placa de agitación por 2 horas. Posteriormente la suspensión se diluyó con 575 mL de agua destilada y se calentó a ebullición durante 4 horas. Finalmente, se filtró la solución en un filtro de vidrio poroso tipo “F”, previamente llevado a peso constante y el residuo insoluble (lignina Klason) se secó en una estufa a 100 °C para su cuantificación gravimétrica utilizando la ecuación 4:

$$\%Lignina = \left[ \left( \frac{E}{F} \right) * \left( 1 - \frac{G + H}{100} \right) \right] * 100 \quad (4)$$

Donde:

*E= Peso de sólido recuperado, (g)*

*F= Peso de muestra libre de extraíbles, (g)*

*G= Extraíbles con solventes orgánicos, % en peso*

*H= Extraíbles con agua, % en peso*

## 2.4.2 Obtención de Holocelulosa

Para determinar el contenido de Holocelulosa (Hemicelulosa y Celulosa) se utilizó el procedimiento reportado por Walia y Gupta [36] con algunas modificaciones, el procedimiento fue el siguiente:

Se pesó 1 g de madera seca y libres de extraíbles y se colocó en un matraz de tres bocas con 32 mL de agua destilada a una temperatura constante de 74°C, después de una hora se añadió 0.2 mL de ácido acético y 0.4g de clorito de sodio. El proceso de adición de ácido acético y clorito de sodio se realizó 3 veces más para solubilizar el contenido máximo de lignina mediante una hidrólisis ácida (Figura 2.5). Finalmente, el contenido del matraz se filtró y el residuo se lavó completamente con agua destilada. El residuo final se secó en una estufa de aire (Figura 2.6)



**Figura 2.5.** Hidrólisis ácida para determinación de holocelulosa **Figura 2.6.** Holocelulosa de *L. leucocephala*

Para cuantificar la holocelulosa se aplicó la ecuación 5:

$$\% \text{Holocelulosa (Ho)} = \left[ \left( \frac{K}{J} \right) * \left( 1 - \frac{H + I}{100} \right) \right] * 100 \quad (5)$$

Dónde:

*K*= Peso de la muestra deslignificada, (g).

*J*= Peso de la muestra seca y libre de extraíbles, (g).

*H*= Extraíbles con solventes orgánicos, % en peso

*I*= Extraíbles con agua, % en peso

### 2.4.3 Obtención de Celulosa

Se pesaron 0.6 g de holocelulosa y se agregaron 10 mL de hidróxido de potasio (KOH) al 10% en un matraz de dos bocas, una para la entrada del condensador y otra para la entrada de gas nitrógeno para mantener una atmósfera inerte, se agitó a temperatura ambiente durante una noche. Posteriormente, se filtró la solución con un filtro de vidrio poroso tipo “C”, se lavó el sólido recuperado con agua destilada y se secó hasta peso constante. El sólido obtenido de este proceso se cuantificó como celulosa (Figura 2.7) mediante la ecuación 6:

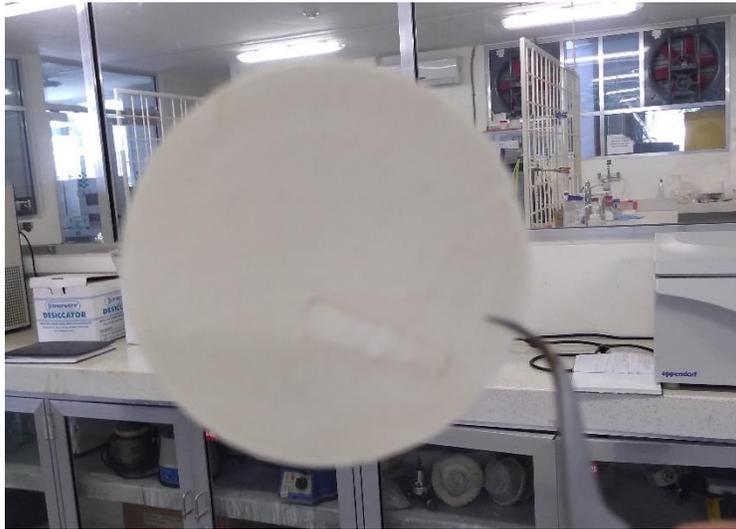


Figura 2.7. Celulosa de *L. leucocephala* muestra de 3 años.

$$\% \text{Celulosa (Cel)} = \left[ \left( \frac{M}{N} \right) * \left( 1 - \frac{H+I+L}{100} \right) \right] * 100 \quad (6)$$

Dónde:

*M*= Peso de la muestra libre de hemicelulosa, lignina y extraíbles (g)

*N*= Peso de la muestra deslignificada libre de extraíbles, (g).

*H*= Extraíbles con solventes orgánicos, % en peso

*I*= Extraíbles con agua, % en peso

*L*= Lignina, % en peso

Para conocer el porcentaje en peso de la hemicelulosa se aplicó la ecuación 7:

$$\% \text{ Hemicelulosa (HE)} = \% \text{Ho} - \% \text{Cel} \quad (7)$$

Dónde:

*%Ho= Porcentaje en peso obtenido de la Holocelulosa, (g).*

*%CEL= Porcentaje en peso obtenido de la Celulosa, (g).*

## 2.5 Propiedades Térmicas de la Biomasa Leñosa

### 2.5.1 Análisis termogravimétrico mediante TGA

Para el análisis termogravimétrico del material se utilizó una balanza termogravimétrica Perkin Elmer TGA 7. Se colocaron 5 mg en el contenedor de platino de la balanza y se calentó a una velocidad de 10 °C min<sup>-1</sup> en atmósfera de nitrógeno realizando un barrido de temperatura desde 50 °C hasta llegar a 700 °C.

#### 2.5.1.1 Poder calorífico

Se utilizó un analizador elemental CHONS marca Thermo Scientific Modelo Flash 200 para cuantificar el carbón, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno y azufre de las muestras de biomasa leñosa de las dos especies en estudio en sus diferentes. Se utilizó la ecuación 8 para calcular el poder calorífico a partir de la composición elemental [61]:

$$\text{HHV} = 3.55\text{C}^2 - 232\text{C} - 2230\text{H} + 51.2\text{C} * \text{H} + 131\text{N} + 20,600$$

( 8 )

## 2.6 Pruebas de Pirolisis

Se realizaron pruebas de pirolisis de las dos especies en estudio. El sistema usado para este proceso constó de un sistema de alimentación de nitrógeno, un horno tubular de la marca ThermoFisher Scientific con un controlador de temperatura (Figura 2.8), y un sistema de enfriamiento para la condensación de los productos. Se colocaron 8g de muestra de la biomasa con un tamaño de partícula entre 0.25 a 0.42 mm (malla >60 y <40) en un tubo de cuarzo de 1 pulgada de diámetro colocado dentro del horno. La reacción de pirolisis se llevó a cabo usando una rampa de calentamiento de 30°C/min hasta alcanzar la temperatura de

trabajo y se mantuvo un tiempo de residencia de 30 minutos. El gas obtenido se analizó con un analizador portátil marca ETG Risorse e Tecnologia Syngas modelo MCA 100.



**Figura 2.8.** Sistema utilizado para realizar la Pirolisis de la biomasa leñosa, de izquierda a derecha: Horno tubular, sistema de enfriamiento y analizador de gases.

Las fases líquidas y sólidas obtenidas se cuantificaron gravimétricamente para determinar el rendimiento de cada una de las fases, mientras que la fase gaseosa se calculó por diferencia al 100%.

## 2.7 Pruebas de Gasificación

La gasificación de la fracción sólida obtenida en la etapa de pirolisis (Figura 2.9) se realizó a una temperatura máxima de 900°C. La muestra se colocó en el reactor y se calentó con una rampa de calentamiento de 50°C/min hasta alcanzar los 900°C en atmósfera de inerte con un flujo de N<sub>2</sub> de 10mLs<sup>-1</sup>. Al alcanzar la temperatura se introduce aire con un flujo de 10mLs<sup>-1</sup> para dar lugar a las reacciones de oxidación y reducción del residuo sólido carbonoso. El gas generado se monitoreó en línea con el analizador de gases.



**Figura 2.9.** Fracción sólida obtenida de la fase pirolisis.

## 2.8 Evaluación del crecimiento de las especies

La estimación del incremento de las especies leñosas se realizó usando los diámetros normales (cm), altura y biomasa (Ton/ha) a partir de los valores obtenidos por Hernández-Stefanoni en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic [62] en 32 conglomerados conformados por cuatro sitios circulares de 400m<sup>2</sup> distribuidos en “Y” invertida. El estudio se realizó en una superficie de 5.12 ha desde el 2013 hasta 2015 y se contó con una medición extra en el año 2018.

En cada conglomerado con presencia de individuos de *L. leucocephala* y *P. piscipula*, se consideró un amplio rango de diámetros de árboles desde 1 a 35.3 cm para *P. piscipula* y debido a la menor presencia de *L. leucocephala*, se consideraron diámetros en el rango de 2 a 11cm. El cálculo de biomasa, altura y diámetro normal, se resumió en cuatro categorías de edades para ambas especies, considerando las siguientes: A) edades de 3 a 5 años, B) edades de 10 a 17 años, C) edades de 18 a 25 años y D) más de 60 años. Se proyectaron los incrementos anuales sin considerar factores bióticos y abióticos en gráficos para los periodos anuales del 2013, 2014 y 2015 así como una última medición en 2018. La proyección del incremento del diámetro, altura y biomasa por año se desarrolló mediante barras de crecimiento.

## CAPITULO 3.

### RESULTADOS

#### 3.1 Análisis proximales de la biomasa

Se observó que el contenido de humedad de las ramas colectadas para la especie *P. piscipula* varía notablemente con la edad de la planta, obteniéndose valores del orden del 80% para las ramas de árboles jóvenes de hasta 10 años mientras que las ramas de los árboles de mayor edad (12 años) presentaron el menor contenido de humedad (37%). La especie *L. leucocephala* presentó un contenido de humedad de las ramas, con valores del orden del 40% para todas las edades de las plantas, los valores fueron de 49% en las ramas jóvenes de 3 años y de 41% en las de 12 años (Tabla 3.1). El alto contenido de humedad de las ramas de *P. piscipula* de plantas de hasta 10 años limita su uso directo en procesos de combustión, ya que su poder calorífico es menor en comparación con el material seco, debido a que parte del calor generado es usado en la evaporación de agua y no para la combustión de la biomasa. La necesidad de un secado previo puede mejorar el rendimiento calórico y energético de las especies para su uso en combustión. En los procesos termoquímicos de pirólisis y gasificación se pueden usar biomásas con contenido de 15 y 30% de humedad, respectivamente; por lo que estos procesos son más adecuados para las especies en estudio, ya que requieren menor tiempo de secado. Los valores de humedad son similares a los reportados para especies de estas zonas en tiempo de lluvias, por lo que se esperaría que en tiempo de secas el contenido de humedad sea menor.

Tabla 3.1. Composición proximal de las biomásas leñosas en estudio de acuerdo a la edad de las plantas colectadas

Edad	<i>P. piscipula</i>		<i>L. leucocephala</i>	
	% Humedad	% Cenizas	% Humedad	% Cenizas
3 años	87 ±0.2	3.4 ±0.2	49 ±0.3	2.1 ±0.1
6 años	73 ± 3.4	4.6 ±0.2	49 ±3.2	2.1 ±0.1
10 años	80 ± 0.2	4.7 ±0.1	42 ±0.1	1.8 ±0.1
12 años	37 ± 0.2	5.6 ±0.3	41 ±0.6	2.2 ±0.2

El contenido de **cenizas** en peso de *P. piscipula* fluctuó entre 3%-5%, las ramas de plantas juveniles fueron las que presentaron la menor cantidad de cenizas (Tabla 3.1). Por otro lado, en la especie *L. leucocephala* las ramas dieron un contenido de cenizas

del orden del 2%, por lo que no hubo significancia estadística con respecto a la edad para esta especie. Estos resultados de contenido de cenizas coinciden con lo reportado en la literatura, en donde se señala que el contenido de cenizas es mayor en *P. piscipula* que *L. leucocephala* [65]. Los cambios del contenido de cenizas se pueden deber a la mayor acumulación de minerales por *P. piscipula*, ya que ambas plantas se colectaron en la misma zona.

### 3.2 Composición química de la biomasa

La composición química de las especies en estudio de acuerdo a sus edades se muestra en la tabla 3.2. Se observa que el contenido de extraíbles totales fue del orden del 18-27% para ambas especies, con un contenido de extraíbles con disolventes mayor que los extraíbles con agua para *P. piscipula* y un comportamiento opuesto para la especie *L. leucocephala*. Se ha reportado que los extraíbles con etanol-benceno y etanol son principalmente sustancias hidrofóbicas presentes en la biomasa lignocelulósica tales como ceras, grasas, resinas, esteroides e hidrocarburos no volátiles; mientras que los extraíbles con solventes de alta polaridad como el agua caliente consisten principalmente de compuestos hidrofílicos tales como taninos, gomas, azúcares y otros compuestos solubles en agua. Un estudio realizado sobre los valores caloríficos de los extraíbles en biomasa fresca y biomasa secada bajo diferentes mecanismos, señala que las moléculas de alta polaridad que incluyen taninos y flavonoides, oligosacáridos, etc. contienen una fracción pobre de energía (4,000 cal/g) debido a la presencia de un gran número de grupos funcionales oxigenados, mientras que las moléculas de baja polaridad como los aceites contienen valores caloríficos medios superiores a 10,000 cal/g ya que poseen por lo general estructuras hidrocarbonadas [66]. Un alto contenido de extraíbles favorece la formación de aceites pirolíticos (tars) que pueden causar problemas en procesos de gasificación.

El contenido de lignina varió entre el 14-18% en ambas especies y no se observa una tendencia con respecto a la edad de las plantas de las que fueron colectadas las ramas (Tabla 3.2), aunque mediante un análisis de ANOVA se obtuvo diferencias significativas del contenido de lignina con respecto a la edad de la planta. Los menores contenidos de lignina con respecto a los reportados en la literatura que son del orden de 22.4 % para *L. leucocephala* [52], se puede deber a que las ramas jóvenes tienen un menor contenido

de lignina con respecto al tronco. La lignina actúa como agente de refuerzo de la pared celular y su contenido incrementa en el tronco conforme la aumenta la edad de la planta. La relación entre la lignina y la celulosa es importante durante el proceso de pirolisis, pues a mayor contenido de lignina se bloquea la polimerización de anhidro-azúcares aumentando la formación de gases ligeros como CO y CO<sub>2</sub>; por otro lado, a mayor contenido de celulosa se reduce la formación de char y aumenta la producción de guaiacol, 4-metil-guaiacol y 4-vinyl-guaiacol [29].

El contenido de celulosa varió entre 31-42% y de 32-37% para *L. leucocephala* y *P. piscipula*, respectivamente (Tabla 3.2). En este sentido, el contenido de celulosa es mayor al contenido de lignina para ambas especies en todas las edades de ramas. De acuerdo al Análisis de ANOVA, los valores del contenido de celulosa presentan diferencias significativas con respecto a la edad de la planta. El contenido de hemicelulosa en la especie *L. leucocephala* estuvo en el orden del 30% a excepción de la edad 12 que presentó el valor mínimo (14.7%), estos valores son similares a los reportados en la literatura, donde el contenido de hemicelulosa para esta especie fluctúa entre el 15-32.9% [52], mientras que la especie *P. piscipula* se mostró entre el 25 y 32%. El contenido de hemicelulosa se calculó mediante diferencia por lo que no se realizó un análisis estadístico.

Tabla 3.2. Composición química de las biomásas leñosas en estudio de acuerdo a la edad de las plantas colectadas.

Especie /Edad (Años)	Extraíbles (% peso)				% Lignina	% Hemicel	% Celulosa
	Benceno-Etanol (2:1)	Etanol	Agua	Total			
<i>P. piscipula</i> 3	8.1 ±0.1	0.4 ±0.1	14.8 ±0.1	23.3	16.5 ±3	32.6	34.2 ±0.0
<i>P. piscipula</i> 6	13.5 ±0.2	1.4 ±0.3	12.3 ±0.1	27.2	15.5 ±3	27.7	32.6 ±0.6
<i>P. piscipula</i> 10	4.9 ±0.1	6.5 ±1.8	10.1 ±0.1	21.5	18.8 ±2	28.0	37.1 ±1.5
<i>P. piscipula</i> 12	6.1 ±0.3	0.9 ±0.1	12.3 ±0.2	19.3	17.7 ±3	25.3	37.4 ±0.2
<i>L. leucocephala</i> 3	12.9 ±0.2	0.9 ±0.3	7.2 ±0.2	21.0	18.3 ±2	34.3	31.6 ±0.5
<i>L. leucocephala</i> 6	10 ±0.2	0.5 ±0.2	7.8 ±0.3	18.3	14 ±0.8	32.4	38.7 ±1
<i>L. leucocephala</i> 10	11.1 ±0.2	1.2 ±0.2	8.1 ±0.9	20.5	15.8 ±2.4	32.9	36.1 ±0.6
<i>L. leucocephala</i> 12	7.6 ±0.6	8 ±1.5	7.1 ±1.0	22.7	18 ±0.1	14.7	42.4 ±3.8

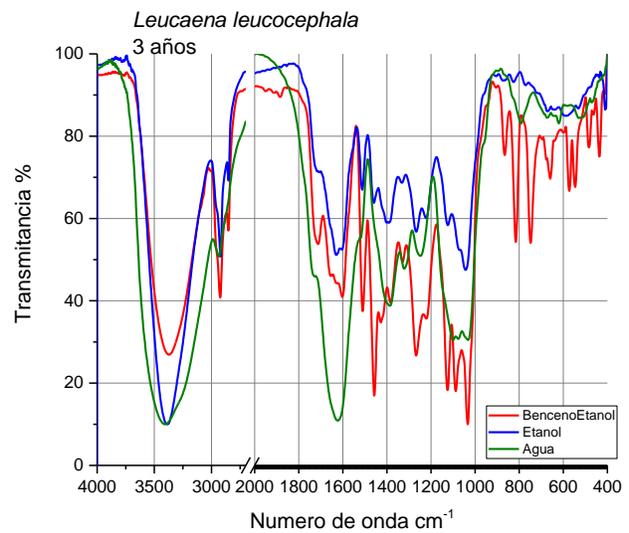
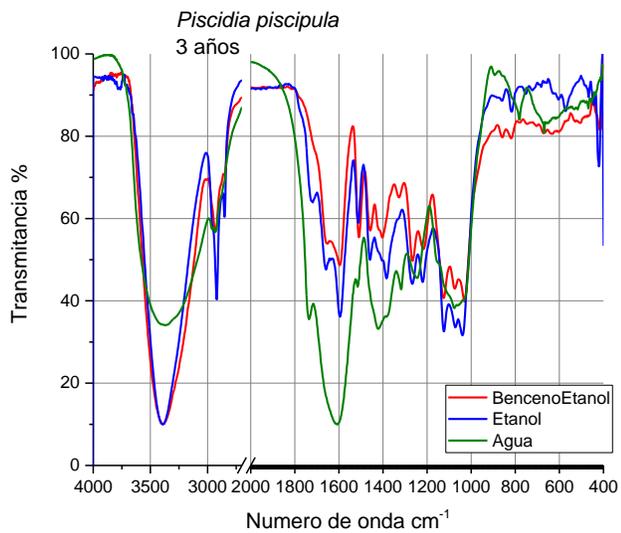
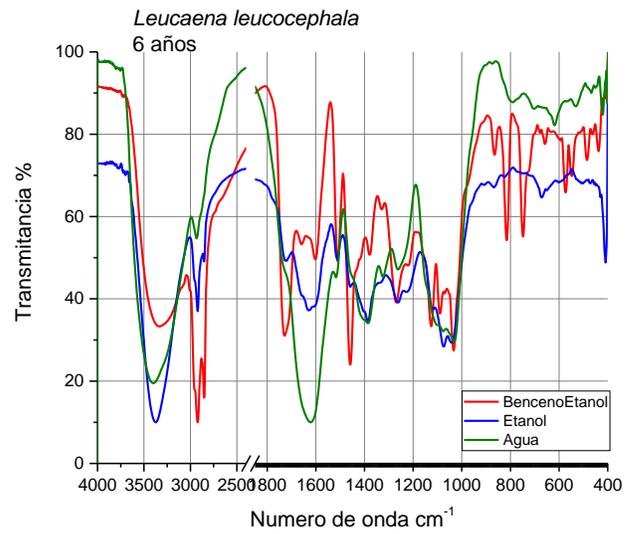
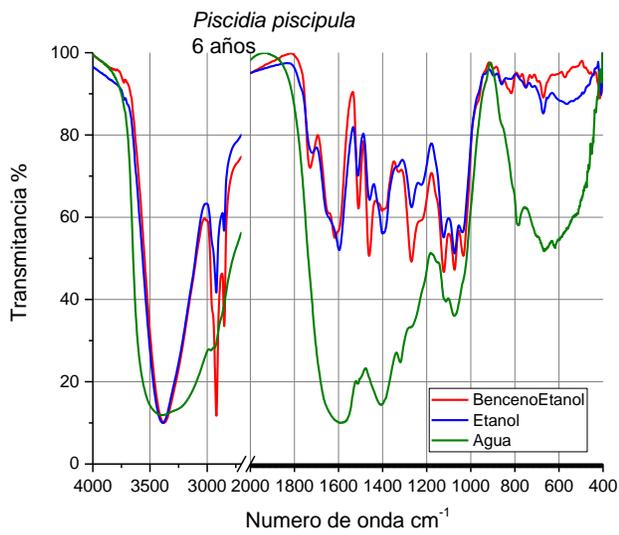
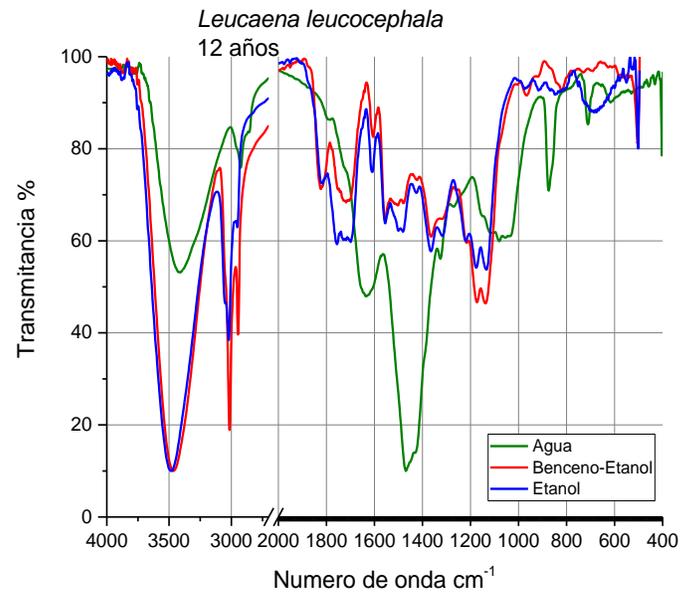
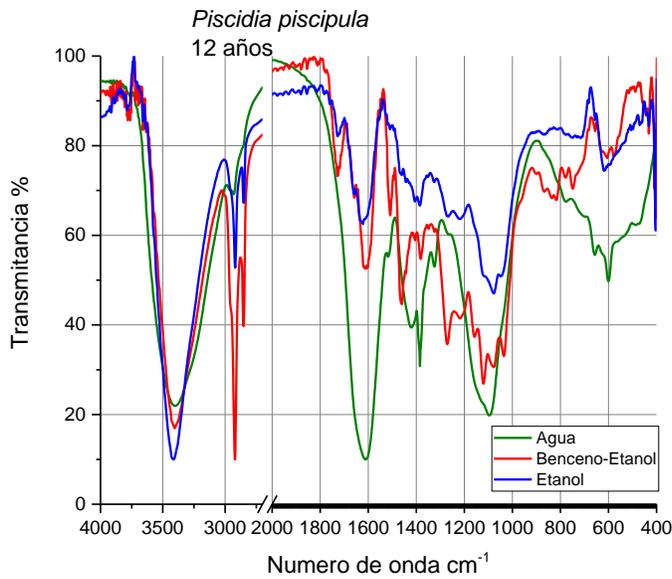
### 3.3 Caracterización de Extraíbles

#### 3.3.1. Caracterización de extraíbles mediante FTIR

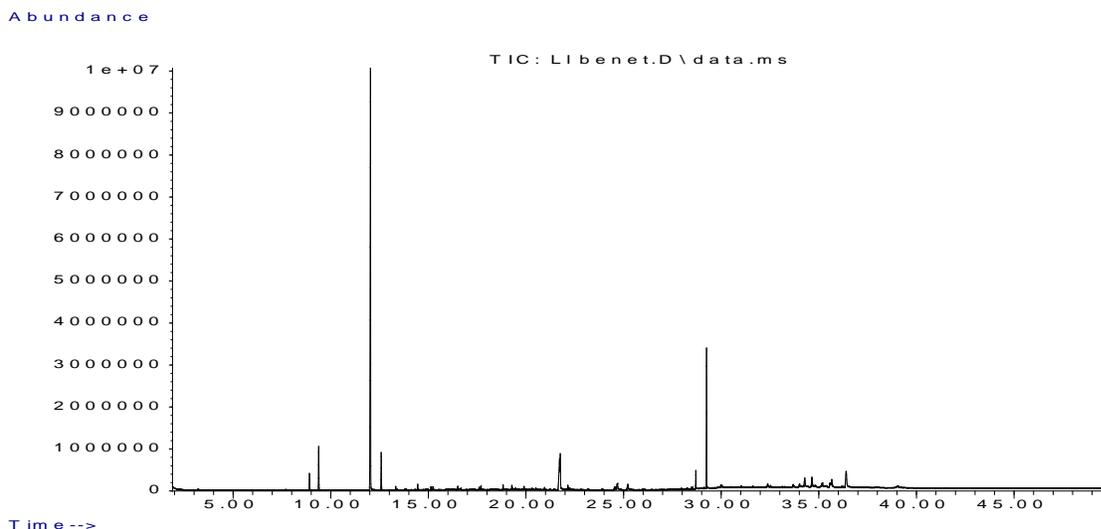
Los espectros de infrarrojo de los extraíbles de *P. piscipula* y *L. leucocephala* se muestran en la figura 3.1. Se observa que los espectros de FTIR de cada fracción de extraíbles son similares en los picos de absorción observados, independientemente de la especie y edad estudiada, indicando que se tienen grupos funcionales similares en los compuestos presentes en dichos extraíbles, pero que varían tanto en la concentración como en la estructura de los compuestos. La banda ancha e intensa con máximo a  $3400\text{cm}^{-1}$  corresponde al estiramiento de los grupos  $\text{-OH}$ . El ancho de la banda se puede atribuir a la formación de puentes de hidrógeno propios de los grupos alcoholes y/o grupos ácidos. Los picos que aparecen en la región de  $2925\text{ cm}^{-1}$  y  $2878\text{ cm}^{-1}$  se debe a la vibración de estiramiento de los grupos metilo ( $\text{-CH}_3$ ) y metileno ( $\text{-CH}_2$ ). Ese pico es mucho más intenso para los extraíbles con benceno-etanol indicando una mayor cantidad de compuestos con cadenas hidrocarbonadas y/u otros compuestos orgánicos con grupos metilo o metileno en su estructura. En las regiones entre  $1800\text{cm}^{-1}$  a  $1550\text{ cm}^{-1}$  corresponde a la vibración de estiramiento de grupos carbonilo ( $\text{C=O}$ ) indicando la existencia de compuestos con grupos funcionales ésteres, ácidos, acetonas y aldehídos. Los extraíbles con solventes orgánicos muestran un pico a  $1740\text{ cm}^{-1}$  y a  $1620\text{ cm}^{-1}$  debido grupos ésteres y ácidos, respectivamente; aunque este último pico se puede deber también a la presencia de enlaces  $\text{C=C}$  de grupos aromáticos. Se observa que la fracción extraída con agua muestra un pico ancho e intenso en esta región. Se observan picos entre  $1050\text{cm}^{-1}$  –  $1200\text{cm}^{-1}$  características de flexiones de enlace como  $\text{C-O-C}$ ,  $\text{-OH}$  y  $\text{-C-O}$ , presentes en alcoholes, ácidos carboxílicos, fenoles y ésteres. Esta variedad de grupos funcionales en los extraíbles se debe a que estos compuestos corresponden con los metabolitos secundarios que las plantas producen como respuesta a su interacción con el ambiente. Estos compuestos secundarios dependerán del origen biosintético y se clasifican en terpenoides, compuestos fenólicos y sus derivados, así como compuestos nitrogenados.

### 3.3.2 Caracterización mediante cromatografía gases-masas

En la figura 3.2 se muestra un espectro típico obtenido mediante cromatografía de gases, para una muestra de extraíbles con benceno-etanol, en el que se aprecian los picos de los compuestos separados en el cromatógrafo de gases y la intensidad de la señal de los compuestos. El área bajo los picos con respecto al área total, se puede usar para calcular la abundancia de los compuestos asociados al tiempo de retención de los picos.



**Figura 3.1.** Espectros de FTIR de compuestos extraíbles de *P. piscipula* y *L. leucocephala* a diferentes edades con solventes de mediana, baja y alta polaridad



**Figura 3.2.** Espectro de Cromatografía de Gases acoplado a Masas de compuestos extraíbles de *L. leucocephala* a 12 años con solvente benceno-etanol (2:1).

Las fracciones de compuestos extraíbles con disolventes orgánicos de baja (benceno-etanol) y mediana polaridad (etanol) presentaron compuestos, que se seleccionaron bajo el criterio de confiabilidad del software del cromatógrafo que fuese igual o mayor al 90% de similitud con el registrado. En la tabla 3.3 muestra los compuestos identificados de las especies *L. leucocephala* y *P. piscipula*, obtenidos de las ramas colectadas de plantas a diferentes edades, extraídas con la mezcla benceno-etanol (2:1). Se observa que para los extraíbles de ramas de plantas de 3 años de *L. leucocephala* se identificaron tres compuestos que representan el 1.4% y para *P. piscipula* el 2.7% del área total de los picos, mientras que en los extraíbles obtenidos de las ramas de plantas de mayor edad se pudieron identificar un mayor número de compuestos que representan el 3.4 y 16.7% para las edades de 6 y 12 años, respectivamente para *L. leucocephala*. Para la especie *P. piscipula* se pudo identificar compuestos que representan 15.6% del área total de los picos para las ramas de 12 años, mientras que para las ramas de 6 años fue de 5.1%.

Se observa que los compuestos extraídos con solvente de baja polaridad son propios de los metabolitos secundarios y presentan distintos grupos funcionales como alcoholes, cetonas, éteres y aldehídos entre otros. Los ácidos grasos saturados como el ácido

palmítico y el ácido esteárico presentes en los extraíbles de *L. leucocephala* de 12 años y *P. piscipula* de 6 y 12 años, así como los insaturados como el ácido linoleico presente en *P. piscipula* de 12 años, los aceites extraídos de fuentes vegetales tienen usos históricos por parte de la población como fuente de alimentos, energía, medicamentos y aplicaciones cosméticas; los ácidos grasos son utilizados en productos cosméticos, ya que hidratan la piel, ayudan en el proceso de curación de las dermatosis, quemaduras solares y para tratamientos en la piel [67]. Para los extraíbles de plantas de 12 años de *L. leucocephala*, entre los compuestos mayoritarios se identificó el ácido palmítico (6% de abundancia) y en *P. piscipula* en edades de 6 y 12 años en concentraciones menores 0.2% y 2.9% respectivamente. El ácido esteárico presente en *L. leucocephala* de 12 años obtuvo un porcentaje de área de 1.4%, mientras que el ácido linoleico presente en *P. piscipula* de 12 años 1.3%.

El esteroide de tipo  $\beta$ -sitosterol es un antioxidante conocido capaz de reducir el daño en el ADN y el nivel de radicales libres, además de posiblemente aumentar el nivel de las enzimas antioxidantes típicas utilizado en el mercado farmacéutico y cosmético [67], este esteroide fue identificado en extraíbles de *L. leucocephala* de 12 años con 1.8% de área.

Tabla 3.3. Compuestos orgánicos identificados en los extraíbles con benceno-etanol (2:1) de *L. leucocephala* y *P. piscipula*

Extraíbles con Benceno- Etanol <i>L. leucocephala</i>			Edad 3 años	Edad 6 años	Edad 12 años
Familia	Compuesto	T. de retención (min)	% área	% área	% área
Éter	4-(3-hidroxi-1-propenil)-2-metoxifenol	19.3	0.6	0.7	0.6
Ácido graso	Ácido palmítico	21.7	-	-	6.1
	Ácido palmítico	22.1	-	-	0.6
	Ácido esteárico	25.2	-	-	1.4
Alcano	Heptadecano	34.3	-	-	1.5
Alquilbenceno	1- Isopropil-2- metilbenceno	6.6	0.3	-	-
Alcohol graso	1- Heptacosanol	31.8	-	0.2	-
Fitosterol	Gamma sitosterol	32.2	-	1.4	-
Triterpenoide	Clionasterol	32.2	0.5	-	-
Terpenos	Lupeol	33.2	-	0.4	-
Esterol	Beta sitosterol	34.6	-	-	1.8
Cetonas	4,22- Estigmastadieno-3-ona	35.6	-	-	0.7
	Estigmasterol-4-en-3-ona	36.4	-	0.7	4

Extraíbles con Benceno- Etanol <i>P. piscipula</i>			Edad 3 años	Edad 6 años	Edad 12 años
Familia	Compuesto	T. de retención (min)	% área	% área	% área
Hidrocarburos aromáticos	Mesitileno	5.6	0.9	3.9	-
Derivados de Tolueno	Hemimeliteno	5.6	1.0	-	-
	2-etil-p-xileno	7.0	-	0.2	-
	4-etil-o-Xileno	7.1	-	0.2	-
Alquilbenceno	1- Isopropil-2- metilbenceno	6.5	-	0.4	-
Alcano	Heptadecano	18.8	-	-	0.8
Ácido graso	Ácido palmítico	19.2	-	0.2	-
	Ácido palmítico	21.7	-	-	2.9
	Ácido linoleico	24.6	-	-	1.3
	Ácido octadecanoico	25.2	-	-	1.1
Alcano	2-hidroxi- 4-metoxi-7 metil-7,8,9,10,11,12,13,14-octahidro-6- oxabenzociclodeceno-5	28.7	-	-	0.7
	1-nonadecano	30.0	-	-	0.8
Flavonoides	Medicarpina	29.4	-	-	0.8
Fitosterol	Estigmasterol	34.0	0.4	-	1.6
	Gamma sitosterol	34.6	0.5	-	1.5
Cetona	4,22-Estigmastadieno-3-ona	35.6	-	-	0.6
	Estigmasterol-4-en-1-ona	36.4	-	-	1.3
Terpenos	Lupeol	35.7	-	-	2.2

En la Tabla 3.4 se muestran los compuestos identificados en los extraíbles con etanol de las plantas en estudio. Se observa que en los extraíbles de la especie *P. piscipula* de 12 años se identificaron la mayor cantidad de compuestos (49.7%), seguido de *L. leucocephala* de 3 años (12%), las edades de 6 años se identificaron 5.3% y 3% de los compuestos obtenidos de los extraíbles de *L. leucocephala* y *P. piscipula* respectivamente. Tan solo el 1.4% de los compuestos de *P. piscipula* de 3 años lograron ser identificados.

Los ácidos grasos saturados como el palmítico y esteárico podrían significar un uso potencial del aceite para fines industriales, nutricionales, farmacéuticos y cosméticos, se ha demostrado que los ácidos palmítico y esteárico tienen un efecto potente en permear la piel

para nutrirla y suavizar la piel seca, también se sabe que restaura y rehidrata la epidermis, además, los aceites pueden usarse como vehículo para otros ingredientes activos [67]. El ácido palmítico se identificó con un alto porcentaje en extraíbles de *P. piscipula* de 12 años (19.6% de área) y en menores cantidades en *L. leucocephala* de 3 y 6 años con 0.7% y 1.8% respectivamente, el ácido esteárico se identificó en *P. piscipula* de 12 años con 3.6%.

Otro compuesto identificado es el ácido fenólico de tipo vanílico o vainillina presente en *L. leucocephala* con 7.1%, este metabolito secundario exhibe una actividad de eliminación de radicales peroxilo altamente eficiente y pueden tener efectos farmacológicos beneficiosos [67].

Los alcoholes coniferílico (unidades G) (8.6%) y sinapílico (unidades S) (1.6%) identificados en los extraíbles de 3 años de *L. leucocephala* son precursores de la lignina, se usan como bloques de construcción y en el tejido monocotiledóneo [68], el coniferil aldehído (3.1%) es un compuesto que proporciona a la planta protección contra herbívoros y contribuye en la producción de resinas fungicidas. Se identificaron también compuestos de cadena hidrocarbonada tales como el 1-nonadeceno y 1-hexadeceno son que son alquenos de 19 y 16 carbonos no ramificados con un doble enlace entre C1 y C2. En la muestra de extraíbles de *P. piscipula* también se identificaron compuestos aromáticos y cadenas hidrocarbonadas.

Tabla 3.4. Compuestos orgánicos identificados en los extraíbles con etanol de *L. leucocephala* y *P. piscipula*

Extraíbles con Etanol <i>L. leucocephala</i>			Edad 3 años	Edad 6 años	Edad 12 años
Familia	Compuesto	T. de retención (min)	% área	% área	% área
Alqueno	1- Nonadeceno	15.1	-	2.1	-
	1- Hexadeceno	17.3	-	1.4	-
Alcano	alcohol coniferílico	16.8	8.6	-	-
	Ciclotetradecano	17.6	-	-	5.6
Alcohol graso	1-Hexadecanol	17.3	1.1	-	-
Ácido graso	Ácido palmítico	19.2	0.7	1.8	-
Aldehídos	Coniferil aldehído	19.3	-	-	3.1
Alcohol	Alcohol sinapílico	19.6	1.6	-	-

Extraíbles con Etanol <i>P. piscipula</i>			Edad 3 años	Edad 6 años	Edad 12 años
Familia	Compuesto	T. de retención (min)	% área	% área	% área
Hidrocarburos aromáticos	Mesitileno	5.5	0.8	1.7	-
Cicloalcano	Ciclotetradecano	15.1	-	1.3	-
Compuestos aromáticos	Vainillina	15.2	-	-	4.7
	4,4-Bisfenol-1-metil etilideno	25.5	-	-	4.1
Ácidos aromáticos	Ácido vanílico	17.3	-	-	2.4
Alcano	Ciclododecano	17.6	-	-	2.1
	10-metilnonadecano	18.4	-	-	13.2
Ácido graso	Ácido palmítico	21.7	-	-	19.6
	Ácido esteárico	25.2	-	-	3.6
Alqueno	Nonacoseno	28.5	0.6	-	-

### 3.4 Análisis elemental y poder calorífico (HHV).

En la tabla 3.5 se muestra los resultados del análisis elemental (contenidos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno) de las muestras originales de ambas biomásas, así como el poder calorífico calculado utilizando la ecuación de Friedl. De acuerdo a este análisis, la biomasa leñosa está compuesta principalmente de compuestos ricos en carbono (43.5-49.7%) y en oxígeno (43.3-50.9%) con bajos contenidos de hidrógeno (5.5-6.6%) y nitrógeno (0-0.6%). De acuerdo a la ecuación de Friedl, el poder calorífico de una muestra está en función del contenido de carbono y de hidrógeno que son los que aportan poder energético. Se observa que los valores de poder calorífico de las especies varían de 17.2 a 19.9 MJ/kg, siendo *L. leucocephala* de 6 años la muestra que mayor poder calorífico mostró. Las especies de menor edad de *L. leucocephala* (3 y 6) en las fracciones no polares presentaron los valores más altos de poder calorífico, lo que se puede atribuir al mayor contenido de extraíbles en estas muestras.

### 3.5 Análisis termogravimétrico mediante TGA

En las figuras 3.2 y 3.3 se muestran los termogramas de TGA y DTGA de las muestras de *P. piscipula* y de *L. leucocephala* de diferentes edades. Se puede observar que los termogramas de TGA de la biomasa de *P. piscipula* (Figura 3.3) fueron muy similares sin

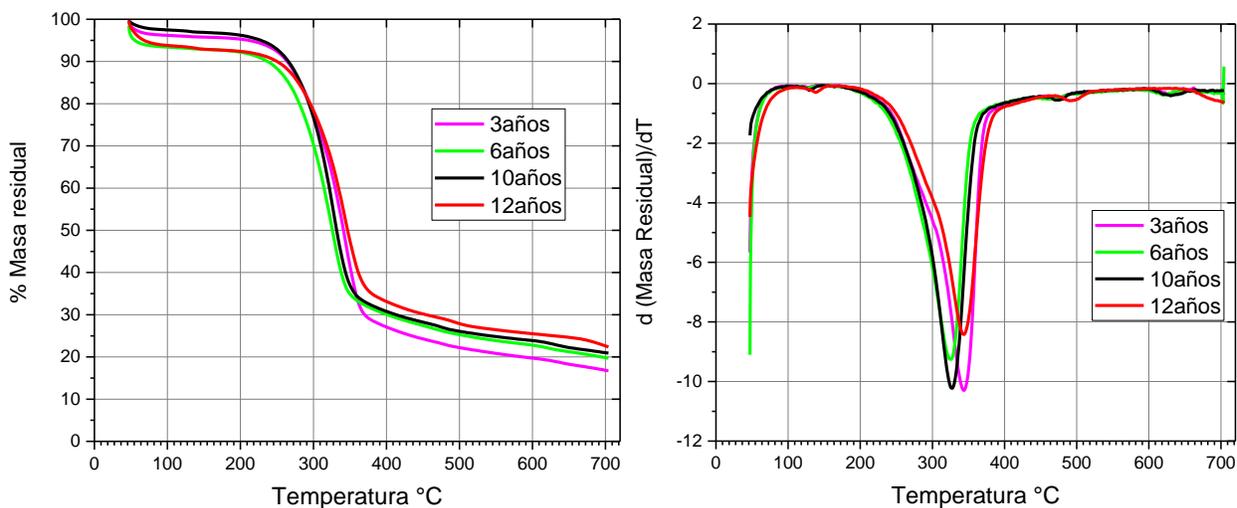
importar la edad de la planta. Se observa una primera pérdida de masa del orden del 7% en el rango de 50°C hasta los 100°C debido a la pérdida de humedad de la biomasa, la segunda pérdida de masa (del orden del 60%) ocurre en el rango de 220 a 360°C, donde la pérdida se debe a la descomposición térmica de los metabolitos secundarios, la hemicelulosa y de la celulosa, generando compuestos volátiles; en esta zona también se ha reportado que se inicia la descomposición de la lignina [29]. En la fase final de los 350°C a 700°C se observa la lenta pérdida de masa, en esta etapa se lleva a cabo la descomposición de la lignina obteniéndose una masa residual del 15% para la biomasa de 3 años y del 22% para la biomasa de las demás edades. Este último peso corresponde a la fracción carbonosa obtenida en la pirolisis de la biomasa vegetal. La variación se podría deber a la diferencia en el contenido de lignina de las muestras. En las curvas de DTGA se observa un máximo a 320 °C que corresponde a la mayor velocidad de descomposición térmica de la biomasa.

Tabla 3.5. Análisis elemental y cálculo del poder calorífico de las fuentes biomásicas por edades.

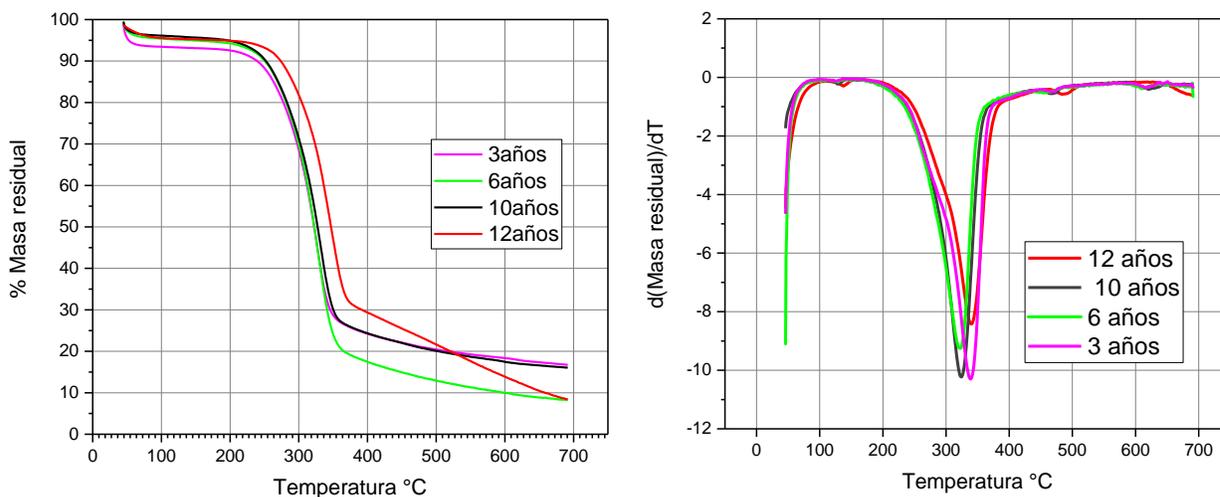
Árbol/Edad (años)	% C	% H	% O*	% N	HHV (MJ/kg)
<i>L. leucocephala</i> 3	46.64 ±0.8	6.65 ±0.2	46.09	0.62 ±0.1	<b>18.6</b>
<i>L. leucocephala</i> 6	49.72 ±6.8	6.39 ±0.2	43.32	0.57 ±0	<b>19.9</b>
<i>L. leucocephala</i> 10	45.21 ±0.0	6.43 ±0.3	47.86	0.5 ±0.0	<b>18.0</b>
<i>L. leucocephala</i> 12	44.95 ±0.6	5.79 ±0.2	49.23	0	<b>17.8</b>
<i>P. piscipula</i> 3	46.35 ±0.2	6.45 ±0.1	46.78	0.42 ±0.0	<b>18.5</b>
<i>P. piscipula</i> 6	45.35 ±0.4	6.51 ±0.1	47.71	0.43 ±0.0	<b>18.0</b>
<i>P. piscipula</i> 10	46.49 ±0.2	6.36 ±0.0	46.74	0.41 ±0.0	<b>18.5</b>
<i>P. piscipula</i> 12	43.51 ±0.2	5.54 ±0.2	50.95	0	<b>17.2</b>

El registro de la pérdida de masa para la especie *L. leucocephala* en las muestras a diferentes edades se puede observar en la figura 3.4, la primera transformación de la biomasa se observa previo a los 160°C, durante el calentamiento de la partícula, la temperatura se incrementa localmente, dando lugar primero a la evaporación de la humedad (etapa de secado), posteriormente al incrementar la temperatura entre los 180°C y 300°C se libera progresivamente los volátiles de la biomasa sufriendo su segunda transformación, la muestra de 6 años muestra mayor pérdida de masa residual (casi 80%), mientras que la muestra de 12 años pierde 70%, el material liberado está compuesta por hemicelulosa y celulosa. La lignina es el componente más estable que se descompone a un rango de temperatura más alto de 300–550 °C [69]. En la última fase

de la descomposición ambas edades tienen 90% de pérdida a los 500°C. Las edades 10 y 3 años muestran curvas similares entre ellos. Los principales compuestos volátiles se producen a partir de la ruptura térmica de los enlaces químicos de los componentes individuales de la biomasa, celulosa, hemicelulosa, lignina y extractivos, cada uno de los cuales tiene sus propias características cinéticas [29].



**Figura 3.3.** Termogramas TGA y DTGA de *P. piscipula* de diferentes edades.



**Figura 3.4.** Termogramas de TGA y DTGA de *L. leucocephala* a de diferentes edades.

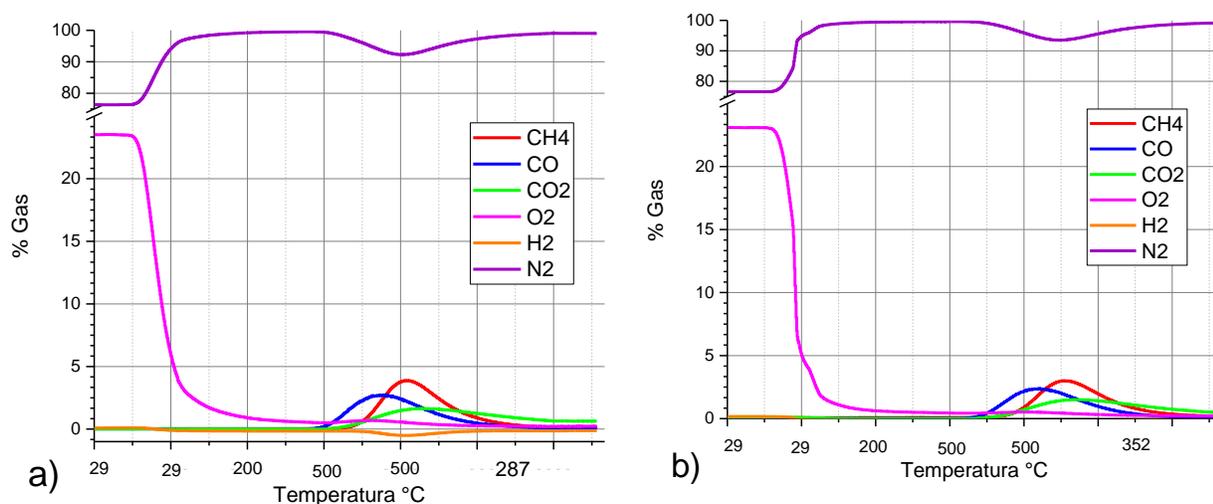
### 3.6 Pruebas de pirolisis de la biomasa leñosa

En la tabla 3.6 se muestra los rendimientos de los productos obtenidos de la pirolisis de las especies *L. leucocephala* y *P. piscipula* de las edades 3 y 6 realizadas bajo las mismas condiciones de operación del reactor, se observa que el mayor rendimiento en los tres productos de la pirolisis es el biooil de *P. piscipula* de la muestra de 3 años (61.8 %), derivado del Análisis de Varianza, las cuatro muestras no muestran diferencias significativas, sin embargo, al realizar la prueba Post hoc de Tukey arroja que en la muestra de mayor rendimiento señalada anteriormente si presenta diferencias significativas con respecto a las demás. Los diferentes componentes de la biomasa se descomponen a diferentes rangos de temperatura, siguiendo diferentes mecanismos de reacción y velocidades de descomposición. Se ha identificado un gran número de tipos de reacción que tienen lugar en serie y en paralelo, como deshidratación, despolimerización, isomerización, aromatización, descarboxilación y carbonización [31]. La descomposición de la biomasa generalmente ocurre durante la descomposición primaria para formar carbón sólido a 200–400 ° C, que es responsable de la mayor degradación de la biomasa [27], en este sentido, se esperaría que la producción de biochar sea mayor, sin embargo, el biochar de las muestras de *L. leucocephala* (edades 3 y 6) y *P. piscipula* de 6 años obtuvieron rendimientos alrededor del 30%. El Análisis de Varianza (ANOVA) indica que en la producción de gas no existe diferencias significativas en ambas especies; mientras que los rendimientos de Biooil y Biochar de señala que si existen diferencias significativas; sin embargo, la desviación estándar es muy elevada.

Tabla 3.6. Rendimiento de los productos de la pirolisis de la biomasa de *L. leucocephala* y *P. piscipula* a diferentes edades. T de pirolisis: 500 °C, t residencia: 30 minutos

<b>Especie y edad</b>	<b>%Biooil</b>	<b>%Biochar</b>	<b>%Gas</b>
<i>L. leucocephala</i> 3 años	41.3 ± 8.4	29.9 ± 2.2	28.9 ± 6.2
<i>L. leucocephala</i> 6 años	45.1 ± 1.3	29.4 ± 4.7	25.6 ± 3.5
<i>P. piscipula</i> 3 años	61.8 ± 0.4	22.9 ± 3.0	15.4 ± 2.7
<i>P. piscipula</i> 6 años	42 ± 3.4	30.9 ± 1.8	27.1 ± 1.7

En las curvas de medición de la composición de los gases generados en la pirólisis de *L. leucocephala* (Figura 3.5) se observa que los gases se empiezan a producir posterior cuando se alcanza la temperatura de 500°C en el reactor, siendo el metano (CH<sub>4</sub>) y el monóxido de carbono (CO) los gases mayoritarios generados en la pirólisis. El contenido de metano es mayor que el monóxido de carbono y presentan un máximo a la temperatura de 500°C y 452°C (transcurrido el tiempo de residencia y cuando se deja enfriar el reactor) en las edades 3 y 6 años, respectivamente. La diferencia en la descomposición de los componentes de la biomasa por diferentes mecanismos de reacción y velocidades de reacción dependen en parte de las condiciones de procesamiento térmico y el diseño del reactor [31].

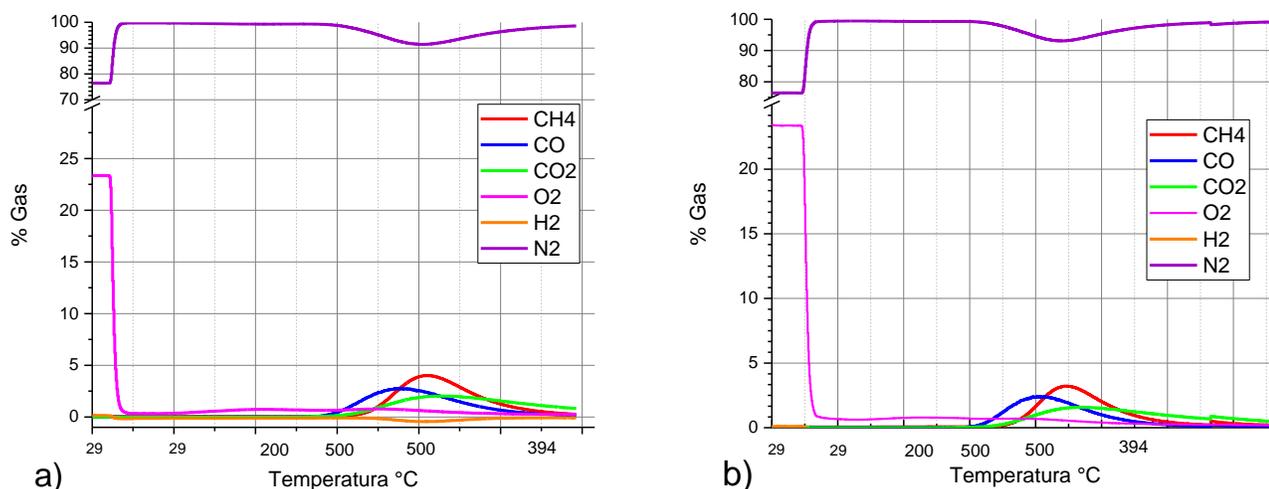


**Figura 3.5** Evolución de la composición del gas (volátiles no condensables) obtenido en la pirólisis de *L. leucocephala*. T pirólisis: 500 °C, t residencia: 30 minutos. a) Edad 3 años. b) Edad 6 años.

Las interacciones entre los principales componentes de la biomasa leñosa, como la celulosa, las hemicelulosas y la lignina, durante la pirólisis hace que la predicción de las características de la biomasa se base simplemente en el comportamiento térmico de los tres componentes individuales [14]. Por ejemplo, la interacción entre la hemicelulosa y la lignina promueve la producción de fenoles derivados de la lignina y al mismo tiempo dificulta la generación de hidrocarburos [15]. La lignina también interactúa significativamente con la celulosa durante la pirólisis, ya que la lignina dificulta la polimerización de levoglucosano a partir de la celulosa, lo que reduce la formación de biochar, mientras que la interacción celulosa-hemicelulosa tiene un efecto menor en la formación y distribución de productos de pirólisis [16]. Durante la pirólisis de biomasa, un gran número de reacciones se ubican en series paralelas, incluidas deshidratación, despolimerización, isomerización, aromatización,

descarboxilación y carbonización [12,17,18]. En general, se acepta que la pirólisis de la biomasa consiste en tres etapas principales: (i) evaporación inicial de la humedad libre, (ii) descomposición primaria seguida de (iii) reacciones secundarias (craqueo de aceite y repolimerización) [19]. Estas etapas se traslapan, con la posibilidad de observar su comportamiento de transición a través del análisis térmico. El calor específico aparente de la biomasa durante la pirólisis y los calores de reacciones correspondientes durante las diferentes etapas de pirólisis se han estudiado ampliamente en el análisis térmico asistido por computadora (CATA) bajo diferentes estratos de calor [20–26]. La descomposición de la hemicelulosa, generalmente representada por xilano, tiene lugar principalmente entre 250 y 350 °C, seguida de la descomposición de la celulosa, que ocurre principalmente entre 325 y 400 °C con levoglucosan como producto principal de la pirolisis [66, 67]. Las reacciones secundarias tienen lugar dentro de la matriz sólida con un aumento adicional de la temperatura [27].

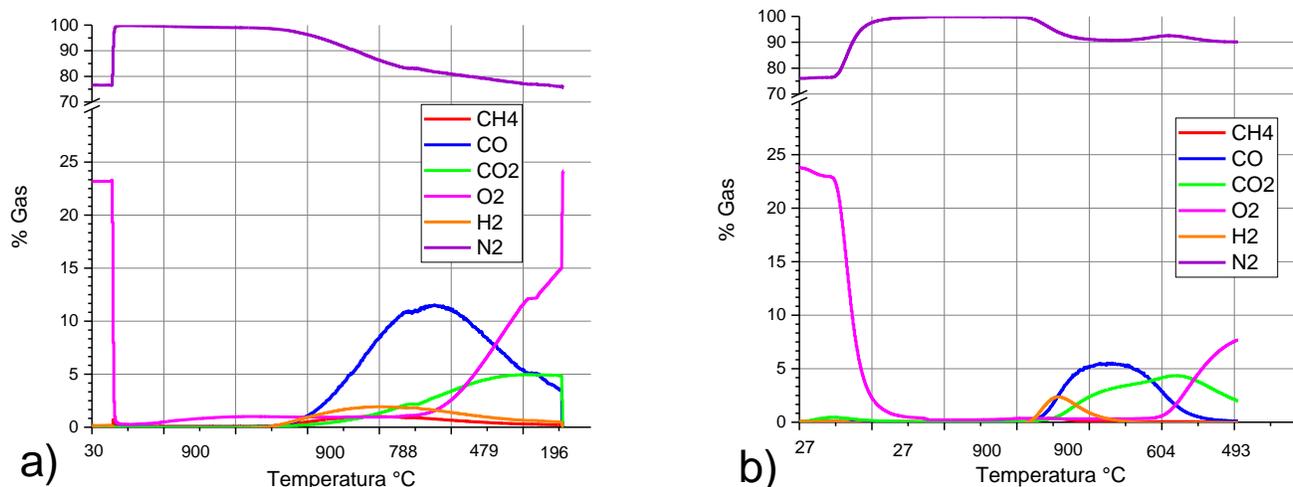
Las curvas de producción de gases derivados de la conversión termoquímica de *P. piscipula* en edades 3 y 6 años se muestran en la figura 3.6. Se observa que se tuvo un comportamiento similar a la de *L. leucocephala*, con la producción de gas metano (CH<sub>4</sub>) predomina seguido del Monóxido de carbono (CO); los gases comienzan a generarse cuando se alcanza la temperatura de 500 °C, con el máximo posterior al tiempo de retención, es decir, pasados 30 minutos a la temperatura máxima de 500°C.



**Figura 3.6** Evolución de la composición del gas (volátiles no condensables) obtenido en la pirólisis de *P. piscipula* de diferentes edades. T pirolisis: 500 °C, t residencia: 30 minutos. a) Edad 3 años. b) Edad 6 años

### 3.7 Pruebas de gasificación de la fracción carbonosa (biochar)

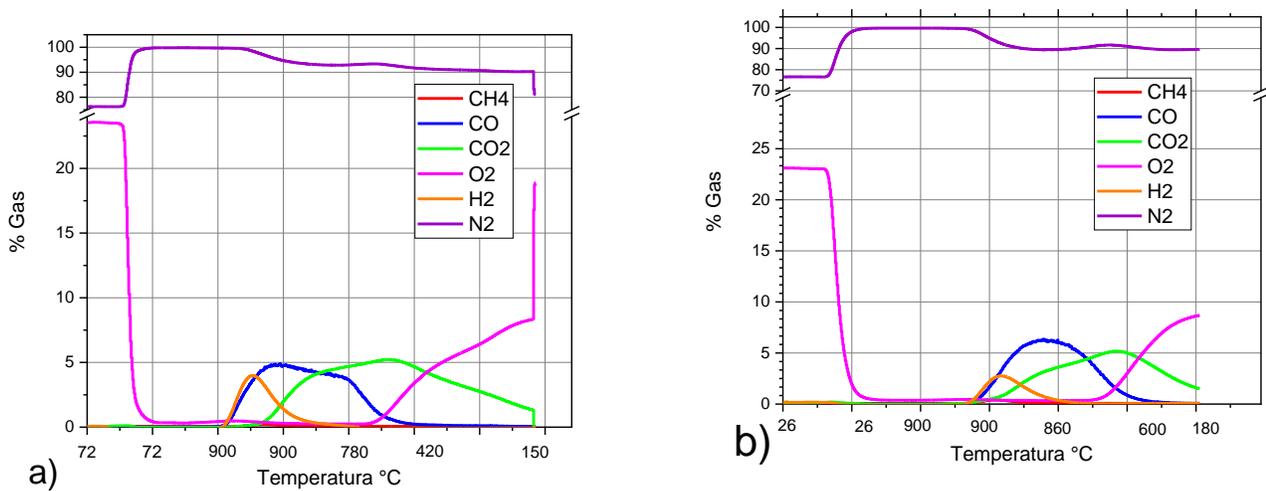
El biocarbón generado durante el proceso de pirolisis en el reactor de gasificación downdraft, es usado en otra de las etapas de la gasificación de la biomasa (en la zona de oxidación) del reactor donde el biocarbón es oxidado en presencia del aire alimentado al gasificador, para la generación de la energía necesaria en los procesos termoquímicos que ocurren en el reactor. Debido a lo anterior, el biochar obtenido en la pirolisis de las especies en estudio, fueron gasificados usando aire como gas gasificante. En las figuras 3.7 y 3.8 se muestran las curvas de los gases producidos en la gasificación de los carbones de *L. leucocephala* y *P. piscipula*, respectivamente. En la figura 3.7 se observa que los gases se producen una vez que se alcanza la temperatura de gasificación (900 °C): inicialmente se produce monóxido de carbono e hidrógeno con máximo de 10-5% y 2.6%, respectivamente y a 700 °C, una vez que se terminó el tiempo de trabajo y se empieza a enfriar el reactor. Esta etapa se conoce como desvolatilización, donde el material se descompone térmicamente produciendo una fracción gaseosa rica en CO y H<sub>2</sub>. En la segunda etapa se llevan a cabo reacciones secundarias entre los mismos gases originados, consumiéndose la mayor parte del oxígeno alimentado al gasificador y generando una mayor cantidad de CO<sub>2</sub> [29].



**Figura 3.7** Evolución de la composición del gas (volátiles no condensables) obtenido en la gasificación del biochar de *L. leucocephala* de diferentes edades: a) 3 años, b) 6 años. T gasificación: 900 °C, t residencia: 30 minutos.

En la figura 3.8 se observa que la gasificación de la fracción carbonosa de la pirolisis de *P. piscipula* se observó un comportamiento similar con respecto a la evolución de la

composición de los gases, pero con un menor contenido de producción de monóxido de carbono (CO).



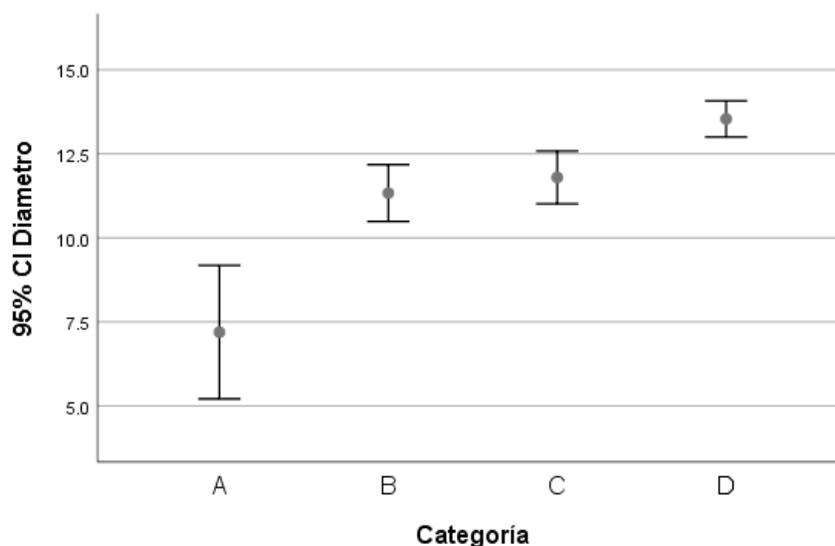
**Figura 3.8.** Evolución de la composición del gas (volátiles no condensables) obtenido en la gasificación del biochar de *P. piscipula* de diferentes edades: a) 3 años, b) 6 años. T gasificación: 900 °C, t residencia: 30 minutos.

### 3.8 Evaluación del crecimiento

Para evaluar el crecimiento de las especies en estudio, se usaron los datos colectados en 4 mediciones consecutivas de mediciones de las 2 especies en la reserva de Kiuic [62], todos los individuos medidos se desarrollaron bajo condiciones naturales, estando en competencia con otras especies e individuos por el recurso hídrico, solar, espacial y nutrimental del suelo. De las figuras 3.9 a la 3.20 se puede observar que la especie *Piscidia piscipula* es más abundante que la especie *L. leucocephala*, si se tiene en cuenta el número de individuos. Se ha reportado que esta especie es abundante en la vegetación primaria y secundaria de selvas bajas caducifolias y medias subcaducifolia [33]. La dominancia de *P. piscipula* deriva del ecosistema en el que los individuos fueron evaluados, pues en una etapa avanzada de sucesión esta especie es considerada como generalista de sucesión avanzada que comprende de 26 a 40 años [47,69].

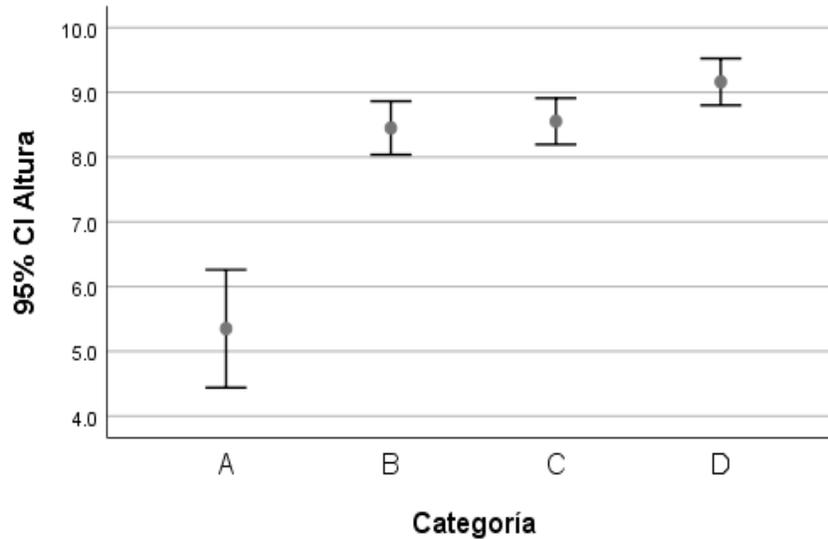
En la figura 3.9 se muestran los diámetros en centímetros de los árboles medidos en dicha reserva para la especie *P. piscipula*. Las categorías de edad A y D muestran diferencias significativas entre ellas, mientras que las categorías de edad B y C que corresponden a edades de 10 a 17 años y de 18 a 25 años respectivamente no muestran diferencias significativas entre ellas. Se sabe que en plantaciones de *P. piscipula* de 9 años el mayor número de individuos presenta diámetros normales con valores promedios de 9.4 cm [59].

Asimismo, la categoría A muestra una alta variabilidad entre los valores máximos (9 cm) y mínimos (5 cm) pues dependiendo de las condiciones de los individuos utilizará los recursos para su engrosamiento del tronco, mientras que las categorías B, C sus valores mínimos y máximos se mantienen entre los 10 y 12.5cm; con respecto a la categoría de edad D, el valor medio se encuentra entre los 12.5 y 15 cm, pues al ser la edad máxima (60 años) el engrosamiento del diámetro es mínimo o nulo.



**Figura 3.9** Valores mínimos, máximos y la media de los diámetros (cm) de *P. piscipula* en cuatro periodos de medición. Categoría A: edades de 3 a 5 años. B: edades de 10 a 17 años. C: edades de 18 a 25 años. D: edades más de 60 años.

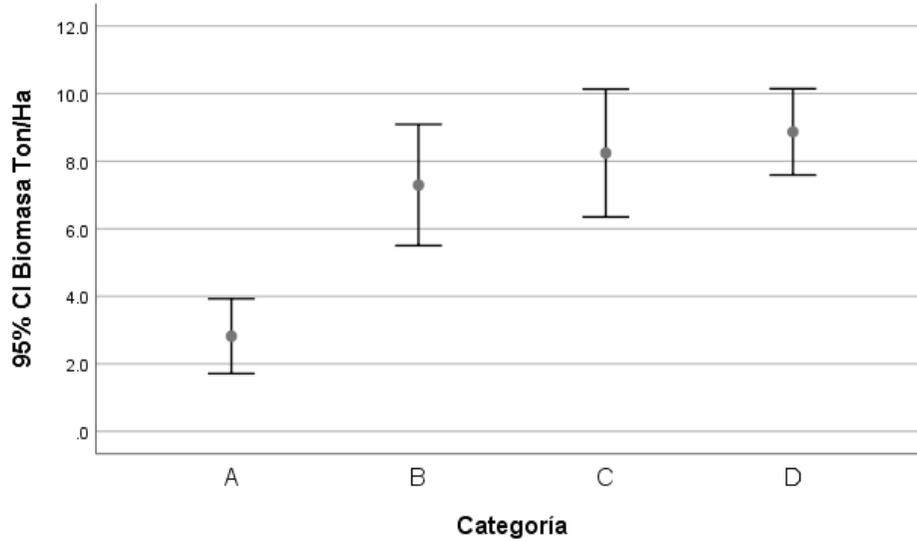
En la figura 3.10 se observan los valores máximos y mínimos en altura para *P. piscipula*, la categoría A mostró diferencias significativas con el resto de las categorías, las categorías B y C mostraron valores entre 8 y 9 metros, esto coincide con la literatura que menciona que el mayor número de individuos presenta una altura media de 8.43 metros [59]. La categoría D mostró un valor medio de 9 metros, por lo que entre las categorías B, C y D no hay diferencias significativas. Como se explicó en el análisis del diámetro, las categorías de edad B, C y D al ser edades avanzadas el crecimiento de altura es mínimo o nulo en cada individuo.



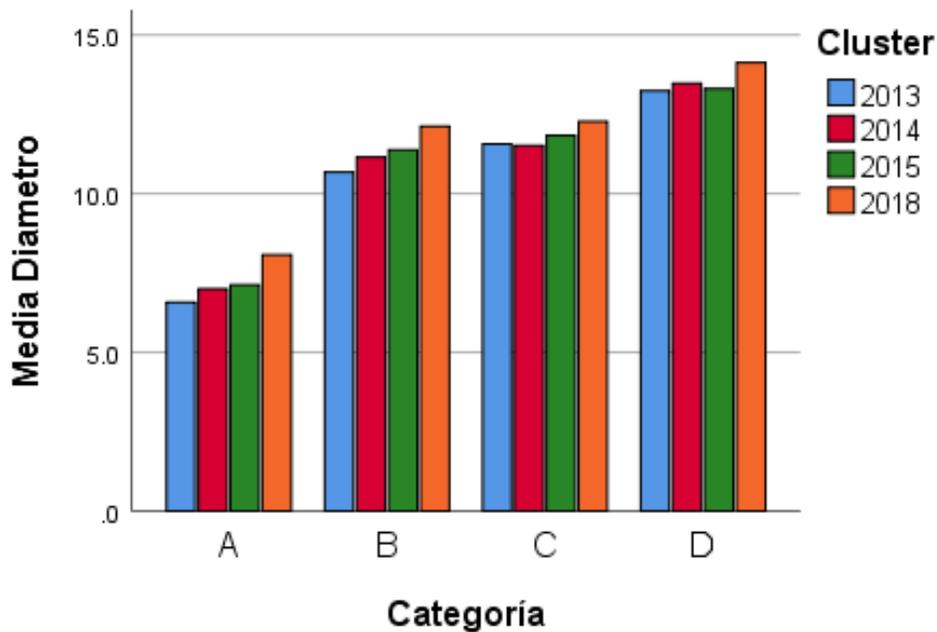
**Figura 3.10** Valores mínimos, máximos y la media de la altura (m) de *P. piscipula* en cuatro periodos de medición. Categoría A: edades de 3 a 5 años. B: edades de 10 a 17 años. C: edades de 18 a 25 años. D: edades más de 60 años.

En la figura 3.11 se observan los valores mínimos y máximos de la biomasa en Ton/ha de *P. piscipula*, en donde la categoría A mostró diferencias significativas con las categorías B, C y D. Se observa también que para estas categorías el incremento de biomasa no es significativo posterior a las edades entre 10 a 17 años (categoría B). Asimismo, la categoría A muestra menor fluctuación entre los valores máximos y mínimos de biomasa. En comparación con el crecimiento de diámetro y altura, la producción de biomasa en categorías de edades avanzadas (B, C y D) se observa un incremento entre los valores mínimos (5.8 Ton/ha) y máximos de biomasa (10.1 Ton/ha).

En la figura 3.12 se muestra el incremento del diámetro en centímetros de *P. piscipula*. Se observa que el crecimiento de las cuatro categorías de edades tiene un incremento por cada medición anual, posteriormente en el año 2018 se observa un mayor engrosamiento del diámetro.



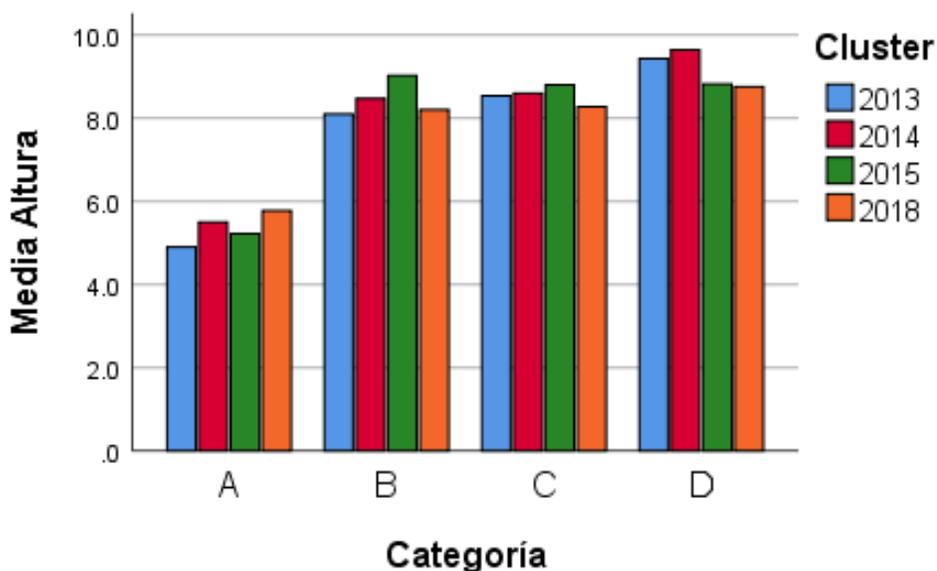
**Figura 3.11.** Valores mínimos, máximos y la media de la biomasa de *P. piscipula* en cuatro periodos de medición. Categoría A: edades de 3 a 5 años. B: edades de 10 a 17 años. C: edades de 18 a 25 años. D: edades más de 60 años.



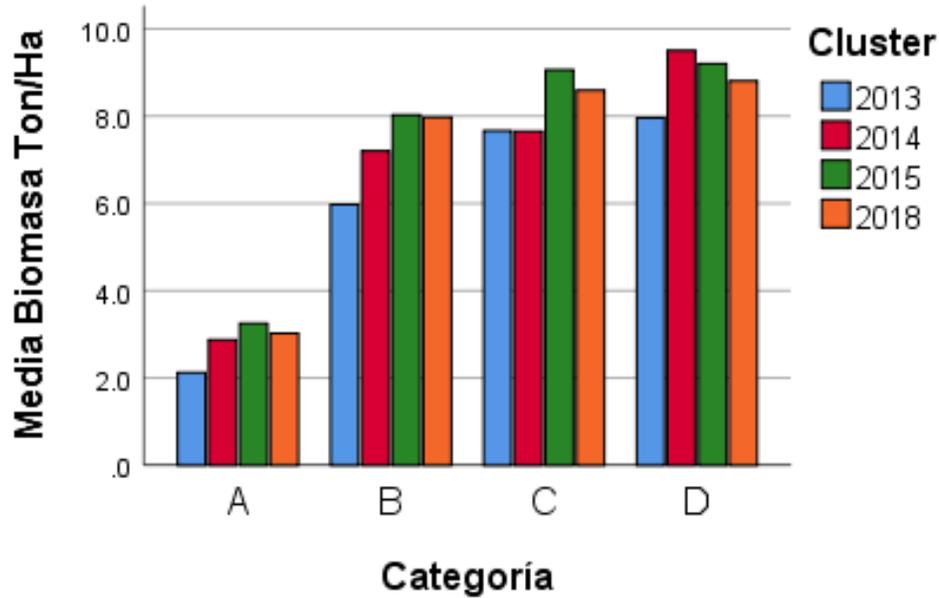
**Figura 3.12.** Incremento del diámetro de *P. piscipula* en cuatro periodos de medición. Categoría A: edades de 3 a 5 años. B: edades de 10 a 17 años. C: edades de 18 a 25 años. D: edades más de 60 años.

El incremento medio de la altura (metros) de *P. piscipula* se observa en la figura 3.13, en la categoría de edad A la altura se mantiene debajo de los 6 metros, mientras que las categorías B, C y D las alturas se encuentran por encima de los 8 metros, con incrementos mínimos para cada año de medición, inclusive se observa un decline de altura en estas tres categorías de edad en el año 2018, lo anterior debido a una disminución de los individuos de mayores altitudes.

En la figura 3.14 se observa el incremento de biomasa (Ton/ha) de *P. piscipula*, la categoría de edad más joven (A) muestra diferencias significativas con el resto de las categorías, manteniendo una media de biomasa entre las 2 y 4 Ton/ha, mientras que la categoría siguiente (B) el incremento de biomasa en los años 2015 y 2018 llega a las 8 Ton/ha. La categoría de edad D presenta la mayor producción de biomasa en el año 2014, llegando casi a las 10 Ton/ha, con pérdidas de biomasa en los años siguientes (2015 y 2018).



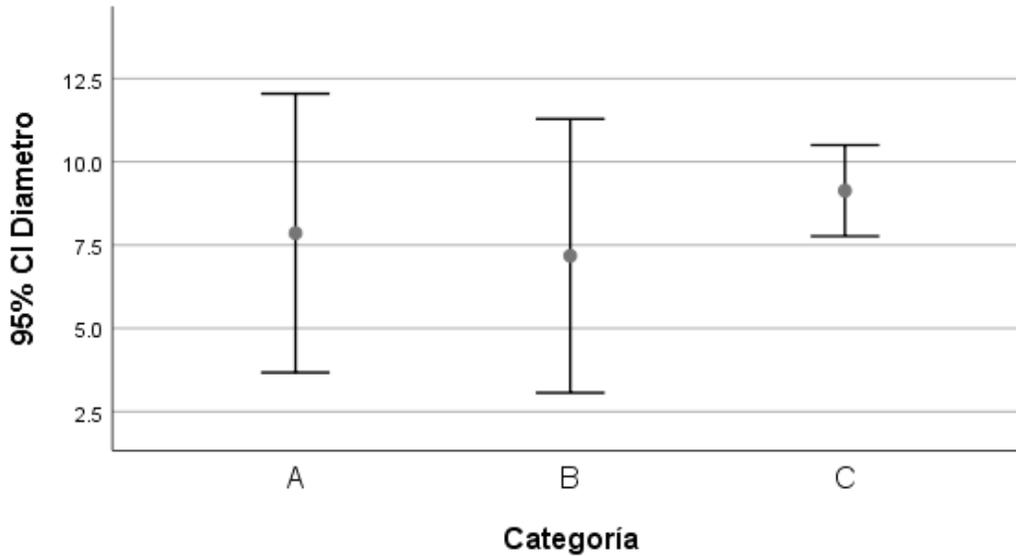
**Figura 3.13.** Incremento de la altura de *P. piscipula* en cuatro periodos de medición. Categoría A: edades de 3 a 5 años. B: edades de 10 a 17 años. C: edades de 18 a 25 años. D: edades más de 60 años.



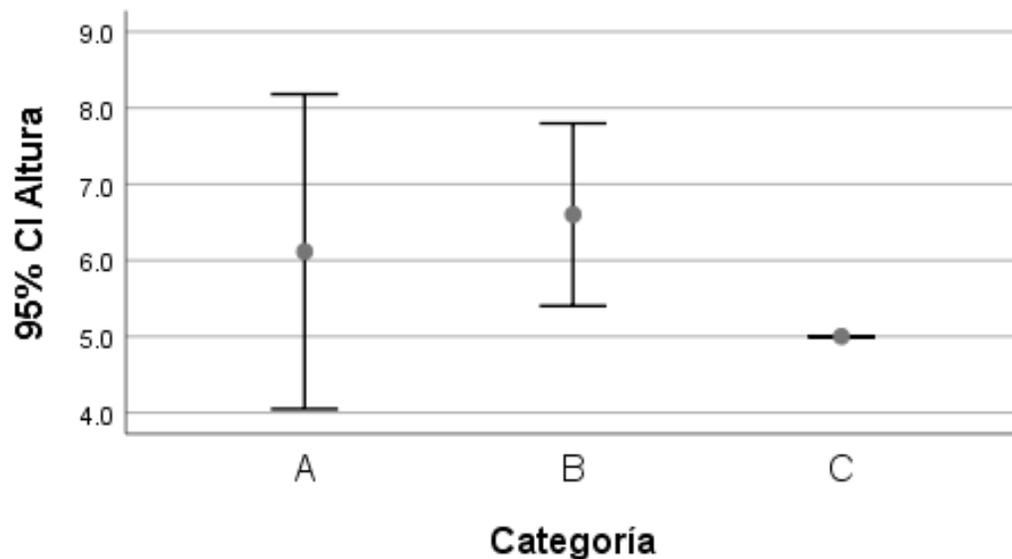
**Figura 3.14.** Incremento de la biomasa de *P. piscipula* en cuatro periodos de medición. Categoría A: edades de 3 a 5 años. B: edades de 10 a 17 años. C: edades de 18 a 25 años. D: edades más de 60 años.

La especie *L. leucocephala* se considera una especie de sucesión joven o temprana que comprende una edad sucesional de 4 a 10 años [47, 68]. La figura 3.15 muestra los valores mínimos y máximos del diámetro en centímetros. Se observa que las categorías B y C presentan una alta variación en sus valores mínimos (2.5 cm) y máximos (>12.5 cm), mientras que la categoría C la variación de los datos fue mínima entre 7.5 y 10.5 cm. Se observa también la ausencia de la categoría D (más de 60 años), por lo que se infiere que esta especie no alcanza estas edades de sucesión. La categoría C mostró diferencias significativas con respecto a las categorías A y B.

En la figura 3.16 se observa el comportamiento de la altura en metros de *L. leucocephala*, la categoría de edad más joven (A) mostró una alta variación en los valores mínimos (4 m) y máximos (8 m), mientras que la categoría C se mantiene en los 5m de altura. Se observa la ausencia de la categoría D.



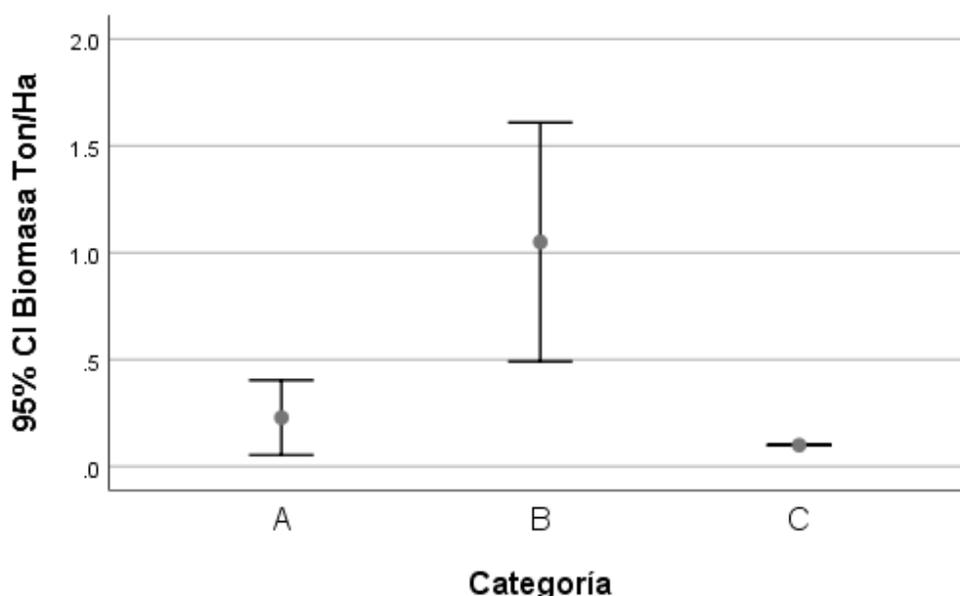
**Figura 3.15** Valores mínimos, máximos y la media de los diámetros (cm) de *L. leucocephala* en cuatro periodos de medición. Categoría A: edades de 3 a 5 años. B: edades de 10 a 17 años. C: edades de 18 a 25 años.



**Figura 3.16** Valores mínimos, máximos y la media de la altura (m) de *L. leucocephala* en cuatro periodos de medición. Categoría A: edades de 3 a 5 años. B: edades de 10 a 17 años. C: edades de 18 a 25 años.

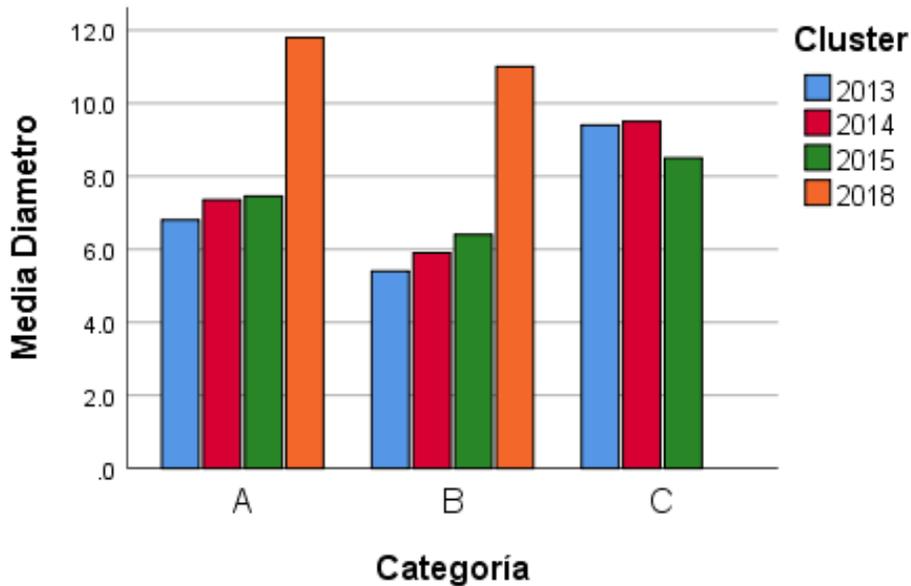
En la figura 3.17 se observan los valores mínimos y máximos de la biomasa en Ton/ha de *L. leucocephala*, la categoría B mostró diferencias significativas en sus valores mínimos (0.5 Ton/ha) y máximos (1.6 Ton/ha) con respecto a las categorías A y C que se ubican debajo de las 0.5 Ton/ha, esto indica que a medida que incrementa la edad de sucesión o

periodo de abandono de la tierra entre los 10 y 17 años también incrementa la biomasa, este aumento de biomasa aérea en edades tempranas de abandono, seguido de un aumento menos pronunciado en edades avanzadas, puede deberse a los patrones de reclutamiento, crecimiento y mortalidad de los individuos en edades tempranas de sucesión después del abandono del sitio. Las especies pioneras se establecen rápidamente por el espacio disponible, posteriormente cuando las condiciones ecológicas no son aptas para estas, mueren y comienza la dominancia de especies de crecimiento lento obteniéndose un crecimiento lento y menor en la biomasa acumulada como se observa en la categoría C (de 18 a 25 años).



**Figura 3.17** Valores mínimos, máximos y la media de la biomasa (Ton/ha) de *L. leucocephala* en cuatro periodos de medición. Categoría A: edades de 3 a 5 años. B: edades de 10 a 17 años. C: edades de 18 a 25 años.

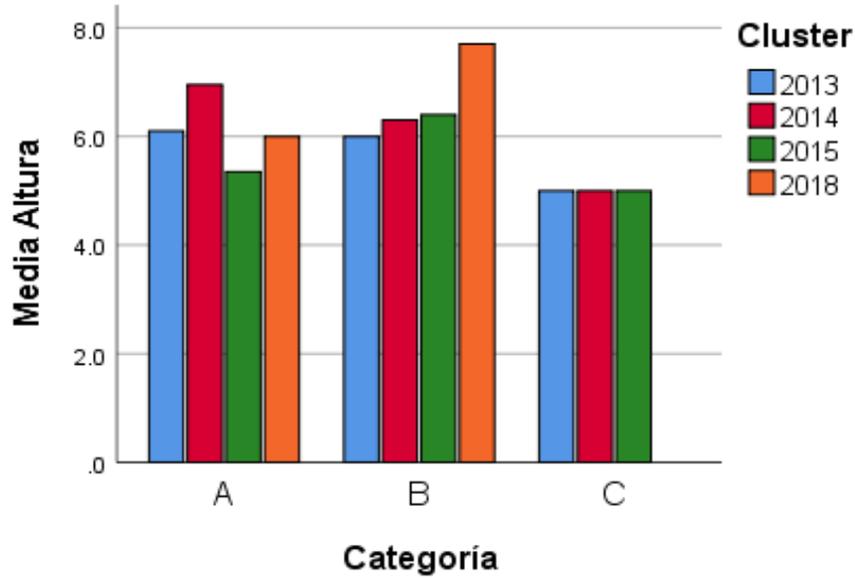
En la figura 3.18 se observa el incremento diametral en centímetros de *L. leucocephala*, la categoría de edad B (de 10 a 17 años) en la cual solo se evaluó el crecimiento de un solo individuo, se mantuvo debajo de los 6cm en los tres primeros periodos de medición, obteniendo un incremento superior a los 10cm para el 2018. Este comportamiento es similar en la categoría A (de 3 a 5 años) donde los tres primeros periodos de medición se encuentran debajo de los 8cm y en el último año (2018) el incremento de los diámetros llega casi a 12cm de diámetro. En la categoría C (18 a 25 años) los diámetros en las dos primeras mediciones se encuentran entre los 9cm disminuyendo a 8cm para la tercera medición (2015) y finalmente en la última medición la ausencia de individuos.



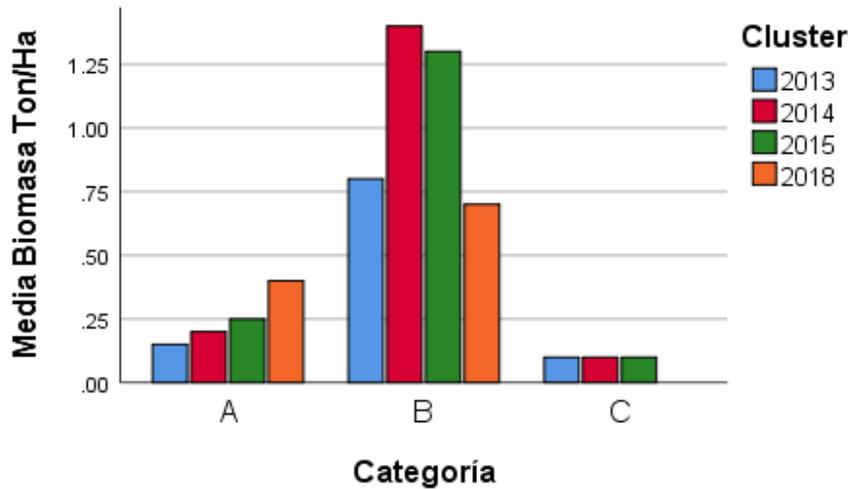
**Figura 3.18.** Incremento del diámetro de *L. leucocephala* en cuatro periodos de medición. Categoría A: edades de 3 a 5 años. B: edades de 10 a 17 años. C: edades de 18 a 25 años

La altura (m) de los individuos de *L. leucocephala* de las primeras etapas de sucesión de la categoría A (3 a 5 años) que se observa en la Figura 3.19, es relevante la dominancia de individuos de edades jóvenes, durante los dos primeros años de medición (2013 y 2014) el incremento de altura es casi de 1m, sin embargo, en el año siguiente (2015) se observa un descenso de altura y en 2018 regresa a la altura inicial de la primera medición (6m). la categoría media de edad (B de 10 a 17 años) el incremento de altura es mínimo en los tres primeros periodos de medición, apreciando un incremento significativo en el 2018 de casi 2m. Por otro lado, la categoría C el incremento de altura es mínimo o nulo durante las tres primeras mediciones, para el año 2018 se nota la ausencia de individuos.

En la figura 3.20 se observa el incremento de biomasa (Ton/ha) de *L. leucocephala*, la categoría B muestra diferencias significativas con respecto a las categorías A y C, el periodo de medición en 2014 muestra la mayor producción de biomasa (<1.25 Ton/ha), este incremento es del 50% sobre la primera medición del 2013, posteriormente se nota la disminución de la biomasa. Las categorías de edad A y C en los tres primeros periodos de medición se mantienen por debajo de las 0.25 Ton/ha.



**Figura 3.19.** Incremento de la altura de *L. leucocephala* en cuatro periodos de medición. Categoría A: edades de 3 a 5 años. B: edades de 10 a 17 años. C: edades de 18 a 25 años. D: edades más de 60 años.



**Figura 3.20.** Incremento de la biomasa de *L. leucocephala* en cuatro periodos de medición. Categoría A: edades de 3 a 5 años. B: edades de 10 a 17 años. C: edades de 18 a 25 años.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados presentados, se concluye lo siguiente:

- El alto contenido de humedad en la especie *P. piscipula* a edades de 10 años (y menores de) así como el alto contenido de cenizas (5.59%) de la misma especie pueden afectar negativamente su uso en los procesos termoquímicos, por lo que se debe considerar tratamientos previos de esta biomasa antes de su uso en estos procesos. La especie *L. leucocephala* presenta bajos valores de humedad y de cenizas, por lo que se puede usar en los procesos de gasificación con bajos tiempos de secado.
- Con base en los objetivos planteados en este trabajo, se concluye que la composición química de las biomásas se obtuvo un mayor porcentaje de compuestos extraíbles para *P. piscipula* en relación a la otra especie (*L. leucocephala*). El contenido de hemicelulosa, *L. leucocephala* presentó valores más altos respecto a *P. piscipula* en edades menores a 12 años. Los bajos contenidos de lignina se atribuyeron a que se usaron ramas jóvenes de 3 a 12 años en ambas especies de este estudio.
- Se detectaron grupos funcionales en los extraíbles de ambas especies mediante FTIR, mediante CG-masas se pudo determinar qué tipo de compuestos contienen los extraíbles, los ácidos grasos como el ácido palmítico, esteárico y linoleico son los mejores representados en ambas especies, también se detectaron ácidos fenólicos y precursores de la lignina como alcohol coniferílico y sinapílico.
- Las propiedades térmicas de las muestras a diferentes edades mostraron un potencial energético similar con valores promedio de 18.6 y 18 MJ/Kg para *L. leucocephala* y *P. piscipula* respectivamente. La edad de 6 años de *L. leucocephala* mostró mayor contenido energético con 19.9 MJ/kg. Mediante el análisis elemental se pudo observar que ambas especies en edades de 12 años presentan ausencia de Nitrógeno.
- El análisis TGA mostró que la descomposición térmica de ambas especies comienza entre los 330°C -400 °C pero, en las pruebas de pirolisis la producción de gases se observa a los 500°C posterior al tiempo de retención de 30 minutos indicando que a temperaturas menores de 500 °C se generan principalmente compuestos volátiles condensables.

- Las pruebas de pirolisis mostraron que los principales gases que se producen son en el siguiente orden de cantidad: gas metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), para todas las pruebas en edades y especies se generó >5% del total de gases.
- Las pruebas de gasificación del biochar arrojaron mayor producción de monóxido de carbono (CO) en ambas especies para las edades en estudio, lo que los hace adecuados para la producción de un gas pobre que se puede usar en motores de combustión interna.
- La evaluación del crecimiento de diámetro, altura y producción de biomasa de *P. piscipula* en edades posteriores a 10 años y menores a 60 años no muestran diferencias significativas, en edades de 3 a 10 años se observan diferencias significativas, al ser una especie de sucesión madura se mantiene estable su población a edades posteriores a 10 años. La evaluación del crecimiento de diámetro y altura de *L. leucocephala* en edades de 3 a 5 años y de 10 a 17 años no se observan diferencias significativas dentro de estos grupos de edades, por el contrario, la producción de biomasa en edades de 10 a 17 años es significativamente diferente a edades jóvenes de 3 a 5 años y edades de 18 a 25 años. en esta especie no se reportaron individuos mayores a 60 años. Con base a lo anterior una edad de 10 años sería adecuada para el aprovechamiento de estas especies en un cultivo dendroenergético.
- Con base a los resultados de la caracterización química, térmica y de crecimiento, la especie *L. leucocephala* sería la más adecuada, de las especies estudiadas, para su uso en una plantación dendroenergética.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] J. P. Dorian, H. T. Franssen, and D. R. Simbeck. 2006. "Global challenges in energy," *Energy Policy*, no. 15, pp. 1984–1991, 2006.
- [2] S. R. Naqvi, S. Jamshaid, M. Naqvi, W. Farooq, M. B. Khan Niazi, Z. Aman, M. Zubair, M. Ali, M. Shahbaz, A. Inayat, W. Afzal. 2018. "Potential of biomass for bioenergy in Pakistan based on present case and future perspectives," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, no. August 2017, pp. 1247–1258.
- [3] V. Quaschnig. 2016. *Understanding renewable energy systems*, Second edition. Routledge Taylor and Francis Group California, San Diego.
- [4] C. Andrés y F. Núñez, 2012. "Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica : una revisión a los modelos del proceso de gasificación," no. c, pp. 21–30.
- [5] G. Berndes, M. Hoogwijk, and R. Van Den Broek, 2003. "The contribution of biomass in the future global energy supply: A review of 17 studies," *Biomass and Bioenergy*, no. 1, pp. 1–28.
- [6] J. Jabbour, C. C. Science, and T. Stocker, 2009. "Fixing a Critical Climate," *Clean Air*, no. October, pp. 527–528.
- [7] D. Kumar and B. Singh, 2017. "Role of biomass supply chain management in sustainable bioenergy production," *Biofuels*, no. October.
- [8] S. N. Naik, V. V. Goud, P. K. Rout, and A. K. Dalai, 2010. "Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, no. 2, pp. 578–597.
- [9] M. F. Demirbas, 2011. "Biofuels from algae for sustainable development," *Appl. Energy*, no. 10, pp. 3473–3480.
- [10] SENER, 2012. "Prospectiva de Energías Renovables (2012-2026)," p. 151.
- [11] F. Durán, V.H., Rodríguez, C.R., Francia, J.R., Sayadi, S., Jimenez, J. A., Perea, 2014. "Biomasa de cultivos leñosos de rotación corta para la producción sostenible de energía: oportunidades y retos," *Spanish J. Rural Dev.*, pp. 21–46.
- [12] G. Alexander, I. Sophie, and J. L. L. B. Schmook, 2015. *Biodiversity and Conservation of the Yucatán Peninsula*, Springer.
- [13] J. Quiroz-Carranza and R. Orellana, 2010. "Uso y manejo de leña combustible en viviendas de seis localidades de yucatán, México," *Madera Bosques*, no. 2, pp. 47–67.
- [14] I. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007. "Energía de la biomasa," Madrid, España., pp. 41–46.
- [15] L. Carrillo, y E. Cerdá, 2012. "Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad," *Univ. Complut. Madrid*, p. 24.
- [16] R. A. Spanevello y A. G. Suárez, 2013. "Fuentes alternativas de materia prima," *Educ. química*, vol. 24, pp. 124–131.
- [17] L. Lijó, S. González-garcía, D. Lovarelli, M. T. Moreira, G. Feijoo, and J. Bacenetti,

2019. *Life cycle assessment of energy systems and sustainable energy technologies, Green energy and technology*. Springer International Publishing.

- [18] V. I. Popa, 2018. *Biomass for fuels and biomaterials*. Elsevier B.V.
- [19] S. Martínez-Lozano, 2009. "Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña".
- [20] S. González-garcía, A. C Dias, S. Clermidy, A. Benoist, V. B. Maurel, C. M. Gasol, X. Gabarrell, L. Arroja, 2014. "Comparative environmental and energy profiles of potential bioenergy production chains in Southern Europe," *J. Clean. Prod.*, pp. 1–13.
- [21] M. A. L. Navarro, 2015 "Modelo de generación de energía a partir de biomasa forestal", Universidad de Chile, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas.
- [22] F. Rosillo-Calle, 2007. *Biomass Assessment Handbook - Bioenergy for a Sustainable Environment*.
- [23] R. V. Guillén and J. P. Dávila, 2014. "Aprovechamiento sostenible de los residuos forestales para la producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada," in *Cinco proyectos para cambiarle la cara al mundo*, pp. 1–36.
- [24] B. Richard, G. M. Richter, M. Cerasuolo, and I. Shield, 2019. "Optimizing the bioenergy water footprint by selecting SRC willow canopy phenotypes : regional scenario simulations," *Ann. Bot.*, pp. 1–12.
- [25] M. Kaltschmitt, 2013. "Renewable Energy from Biomass , Introduction," in *Renewable Energy Systems*. Springer, New York, pp. 1393–1421.
- [26] J. Islas, F. Manzini, O. Masera, and V. Vargas, 2019. *Solid Biomass to Heat and Power*. Elsevier Inc.
- [27] FAO, 2004. "Enfoque Teórico," in *Terminología Unificada de Bioenergía*, pp. 8–16.
- [28] J. Jarabo, F., Fernández, D. Trujillo, N. Elortegui, and C. Pérez, 1999. *La energía de la biomasa*, 2ª ed. Madrid, España.
- [29] J. Jorge Iván Montoya Arbeláez, Farid Chejne Janna, Edgar F. Castillo Monroy, J. A. S. Raquel Acero Reyes, Carlos Andrés Gómez Gutiérrez, J. O. V. Chaparro, Carlos F. Valdés Rentería, Laura L. Garzón Fuentes, G. David Fernando Tirado, L. Adriana Blanco, Nelson Moreno Safra, and E. Y. O. A. Marrugo, 2014. *Pirólisis rápida de biomasa*, no. December. Medellín, Colombia.
- [30] A. Tursi, 2019. "A review on biomass: Importance, chemistry, classification, and conversion," *Biofuel Res. J.*, no. 2, pp. 962–979.
- [31] T. Kan, V. Strezov, and T. J. Evans, 2016. "Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 126–1140.
- [32] R. Beedu and P. Modi, 2014. "Design of Bio Gas Generation Plant Based on Food Waste," *Int. Journall Curr. Eng. Technol.*, pp. 1–4.
- [33] S. A. C. Tun, 2013 "Rendimiento y calidad del carbón vegetal elaborado en un horno tipo fosa con subproductos forestales de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. Y *Lonchocarpus castilloi* Standl. en Campeche," Universidad Autónoma de Nuevo

León.

- [34] S. Paulrud, 2004. *Upgraded Biofuels - Effects of Quality on Processing , Handling Characteristics , Combustion and Ash melting*.
- [35] H. K. Sharma, C. Xu, and W. Qin, 2019. "Biological Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuels and Bioproducts: An Overview," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, no. 2, pp. 235–251.
- [36] V. Dhyani and T. Bhaskar, 2019. "Chapter 9 - Pyrolysis of biomass," in *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels (Second Edition)*, pp. 217–244.
- [37] A. H. C. John W. Rowe, 1979. *Extractives in Eastern Hardwoods — A Review*. Madison, Wisconsin.
- [38] X. Guo, S. Wang, K. Wang, Q. Liu, and Z. Luo, 2010. "Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis," *J. Fuel Chem. Technol.*, no. 1, pp. 42–46.
- [39] Y. Lin, J. Cho, G. A. Tompsett, P. R. Westmoreland, and G. W. Huber, 2009. "Kinetics and Mechanism of Cellulose Pyrolysis," pp. 20097–20107.
- [40] M. E. D. Marvin Chávez-Sifontes, 2013. "Lignin , structure and applicaations : depolymerization methods for obtaining aromatic derivatives of industrial interest," *Av. en Ciencias e Ing.*, vol. 4, pp. 15–46.
- [41] F. V. F. Prieto, 2013. "Pirólisis de los residuos lignocelulósicos del henequén para la obtención de bioaceite," Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- [42] M. G. Martínez, T. Ohra-aho, D. Silva, T. Tamminen, and C. Dupont, 2018. "Influence of step duration in fractionated Py-GC / MS of lignocellulosic biomass," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, no. June, pp. 1–8.
- [43] E. A. Esquivel Segura, 2014. "Evaluación de la Sustentabilidad de Plantaciones Dendroenergéticas en la Región Biobío Chile," Universidad de Concepción.
- [44] M. A. Trossero, 2002. "Dendroenergía: perspectivas de futuro," *Unasyuva*, vol. 53, pp. 3–12.
- [45] Lignum, 2014. "Plantaciones dendroenergéticas : Nueva opción forestal," Providencia, Santiago de Chile.
- [46] M. Trossero, 2017. "Contribución de los sistemas dendroenergéticos optimizados al desarrollo rural, a la protección del medio ambiente y al combate de la desertificación," *Los sistemas dendroenergéticos optimizados*. [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep//006/AD097S/AD097S07.htm>.
- [47] J. Salvador, F. Guido, R. Durán, G. Juan, and J. Ortiz, 2010. "Comunidades vegetales terrestres," in *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*, Yucatán, México., pp. 125–129.
- [48] L. N. López-Jiménez, R. Durán-García, J. M Dupuy-Rada, 2019. "Recuperación de la estructura, diversidad y composición de una selva mediana subperennifolia en Yucatán, México.," *Madera y Bosques*, pp. 1–17.
- [49] M. A. Ramírez Guardado, 2015. "Estimación del carbono retenido en la biomasa aérea, en una selva tropical de Yucatán, México.," Centro de Investigación

Científica de Yucatán.

- [50] F. Tun and F. May, 2012. "Investigación Ambiental L Ciencia y política pública".
- [51] E. M. Remedio, 2002. "La dendroenergía y los sistemas de subsistencia: un estudio de caso de Filipinas," *Unasyva*, pp. 13–22.
- [52] M. J. Feria, F. López, J. C. García, A. Pérez, M. A. M. Zamudio, and A. Alfaro, 2011. "Valorization of *Leucaena leucocephala* for energy and chemicals from autohydrolysis," *Biomass and Bioenergy*, no. 5, pp. 2224–2233.
- [53] J. T. Njunge, I. K. Kaholongo, M. Amutenya, and K. Hove, 2017. "Invasiveness and biomass production of *Leucaena leucocephala* under harsh ecological conditions of north-central Namibia.," *J. Trop. For. Sci.*, vol. 29, no. 3, pp. 297–304.
- [54] J. M. Loaiza, F. López, M. T. García, J. C. García, and M. J. Díaz, 2017. "Biomass valorization by using a sequence of acid hydrolysis and pyrolysis processes. Application to *Leucaena leucocephala*," *Fuel*, vol. 203, pp. 393–402.
- [55] M. R. Vanlauwe B, Sanginga N, 1998. "Recovery of *Leucaena* and *Dactyloctenium* Residu Nitrogen-15 in Alley Cropping Systems," *Soil sci Soc Am J*.
- [56] V. L. Goel and H. M. Behl, 2002. "Selection of *leucaena* species for afforestation and amelioration of sodic soils," *L. Degrad. Dev.*, no. July, pp. 387–393.
- [57] V. I. Keffer, S. Q. Turn, C. M. Kinoshita, and D. E. Evans, 2009. "Ethanol technical potential in Hawaii based on sugarcane , banagrass , *Eucalyptus* , and *Leucaena*," *Biomass and Bioenergy*, no. 2, pp. 247–254.
- [58] A. Radrizzani, S. A. Dalzell, O. Kravchuk, and H. M. Shelton, 2010. "A grazier survey of the long-term productivity of *leucaena* ( *Leucaena leucocephala* ) -grass pastures in Queensland," *Anim Prod sci*, no. Wildin 1981, pp. 105–113.
- [59] L. Yero, A. Mercadet, A. Escalona, J. L. Rodríguez, and M. A. Guyat, 2003. "Rendimiento de biomasa para leña de *Piscidia piscipula* (L.) Sargent en el Municipio Niquero, provincia Granma.," *Rev. electrónica la Agencia Medio Ambient.*, no. 5, pp. 5–8.
- [60] M. Tamayo-Chim, C. Reyes-García, and R. Orellana, 2012. "A combination of forage species with different responses to drought can increase year-round productivity in seasonally dry silvopastoral systems," *Agrofor. Syst.*, vol. 84, no. 2, pp. 287–297.
- [61] A. Friedl, E. Padouvas, H. Rotter, and K. Varmuza, 2005. "Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition," *Anal. Chim. Acta*, vol. 544, no. 1-2 SPEC. ISS., pp. 191–198.
- [62] J. L. Hernández-Stefanoni, J. M Dupuy, K. D. Johnson, R. Birdset, F. Tun-Dzul, A. Peduzzi, J. P Caamal-Sosa, G. Sánchez-Santos, D. López-Merlín, 2014. "Improving species diversity and biomass estimates of tropical dry forests using airborne LiDAR," *Remote Sens.*, no. 6, pp. 4741–4763.
- [63] J. de D. G. Quezada, G. A. P. Carrasco, C. A. Wehenkel, M. Á. E. Bretado, F. R. Aquino, and A. C. Parra, 2019. "Caracterización energética del carbón vegetal de diez especies tropicales," *Rev. Mex. Agroecosistemas*, vol. 6, no. 1, pp. 37–47.

- [64] J. K. Francis and C. A. Lowe, 2000. *Bioecología de Árboles Nativos y Exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales*.
- [65] C. A. Sandoval-Castro, H. L. Lizarraga-Sanchez, and F. J. Solorio-Sanchez, 2005. "Assessment of tree fodder preference by cattle using chemical composition, in vitro gas production and in situ degradability," *Anim. Feed Sci. Technol.*, pp. 277–289.
- [66] S. M. Wiatr, 1984. "Effect of Drying on Yield and Calorific Values of Extractables from Leafy Spurge ( *Euphorbia esula* )," *Biotechnol. Bioeng.*, pp. 3–7.
- [67] I. Vermaak, G. P. P. Kamatou, B. Komane-mofokeng, A. M. Viljoen, and K. Beckett, 2011. "African seed oils of commercial importance — Cosmetic applications," *South African J. Bot.*, vol. 77, no. 4, pp. 920–933.
- [68] M. N. Belgacem, A. Gandini, A. Pizzi, and J. Lora, 2008. *Monomers , Polymers and Composites*, Elsevier. 2008.
- [69] S. B. Paul T. Williams, 1996. "The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass," *Renew. Energy*, no. 96, pp. 6–7.
- [70] S. D. Stefanidis, K. G. Kalogiannis, E. F. Iliopoulou, C. M. Michailof, P. A. Pilavachi, and A. A. Lappas, 2014. "A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, pp. 143–150.
- [71] G. N. Richards, 1993. "Chemistry of Pyrolysis of Polysaccharides and Lignocellulosics," in *Advances in Thermochemical Biomass Conversion*, pp. 727–745.
- [72] M. A. Haas-ek, N. A. González-valdivia, B. Hendricus, J. De Jong, S. Ochoa-gaona, and D. R. Aryal, 2019. "Rebrote arbóreo en la regeneración del bosque tropical de Calakmul, Campeche, México," *Biol. Trop.*, vol. 67, no. March, pp. 164–181.