



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA**



T E S I S

**Caracterización química de la madera y corteza de 7 especies de  
fabáceas de la cuenca del Lago de Cuitzeo, en Michoacán,  
México, con propósitos bioenergéticos**

Que para obtener el título de  
INGENIERO EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

Presenta:

**Federico Salazar Herrera**

Director de tesis: **Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones**

Co-Director: **M.C. Luis Fernando Pintor Ibarra**

Morelia, Michoacán, México, octubre de 2023.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

## COMITÉ DE TITULACIÓN

Edificio "D", planta alta, Tel. 3 22 35 00 Ext. 3056 y 3057  
Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán



Of. No. 0262/2021

Morelia, Mich., a 30 de abril de 2021

### P. ING. FEDERICO SALAZAR HERRERA

EGRESADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍA DE LA MADERA.

PRESENTE.

Para su debido cumplimiento, me permito informar a usted, que ha sido aceptada por el Comité de Titulación de esta Dependencia Educativa, con fecha 23 de abril de 2021, la modalidad de titulación: TESIS, con el Título: "CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA MADERA Y CORTEZA DE 7 ESPECIES DE Fabaceas DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO, EN MICHOACÁN, MÉXICO, CON PROPÓSITOS BIOENERGÉTICOS", bajo la dirección del Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, Tel. 4431.871679, E-mail: [rutiaga@umich.mx](mailto:rutiaga@umich.mx), y como Coasesor, el M.C. Luis Fernando Pintor Ibarra, Tel: 4431. 049267, E-mail: [pintoribarra@hotmail.com](mailto:pintoribarra@hotmail.com)., Lo anterior, para que pueda continuar con sus trámites.

Sin otro particular por el momento, envío a usted un cordial saludo.

ATENTAMENTE



FACULTAD DE INGENIERIA  
EN TECNOLOGIA DE LA MADERA

*Fabiola Eugenia Pedraza B.*

**M.C. FABIOLA EUGENIA PEDRAZA BUCIO**

Presidenta del Comité de Titulación  
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

FEPB/aaa

## DEDICATORIA

A mi esposa Elizabeth por su paciencia y comprensión en todo momento, que sin tu apoyo no podría seguir superándome como profesionalista, esposo y padre de nuestros hijos.

A nuestros hijos Aura Elizabeth, Mariana, Luis Ángel, Gabriel Fernando y José Leonardo, ya que en todo momento siempre me han brindado su fortaleza ante las adversidades y me han permitido ser un ejemplo para ustedes, me han mostrado persistir de nuestros sueños y nunca desistir.

A mi abuelo José Herrera Torres, ya que, ante su ejemplo, me brindaron la fuerza y la seguridad de salir adelante, para superarme como persona y como profesionalista, asimismo por no dejarme en los momentos más importantes de mi vida y brindarme su apoyo.

Al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, quien en todo momento me brindó su apoyo incondicional, consejos, comprensión y por siempre estar en los momentos más significativos e importantes de mi vida, gracias mi buen y estimado amigo y compadre.

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo de tesis se ha desarrollado en el marco del proyecto apoyado por el Fondo Sectorial FSE-SENER-CONACYT (CEMIE-Bio) número 246911, titulado "Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica".

A las familias: Gaspar-Arévalo, Vega-Izquierdo y Pintor-González, por la donación de las muestras de madera y corteza colectadas en los predios ubicados en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán.

A M.C. Luis Fernando Pintor Ibarra, por su tiempo, su ayuda y paciencia para poder realizar este trabajo.

A mis sinodales: Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, M.C. Luis Fernando Pintor Ibarra, Ing. Nicolás González Ortega, M. C. Fabiola Eugenia Pedraza Bucio e Ing. Ciro Hernández Álvarez.

Agradezco a la vida, al destino por coincidir en este espacio (tiempo): Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, sinceramente por su gran amistad, su apoyo por su tiempo, por todo.

## ÍNDICE

	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>2</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>4</b>
<b>4. OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
4.1. Objetivo general	4
4.2. Objetivos específicos	4
<b>5. METODOLOGÍA</b>	<b>5</b>
5.1. Colecta y preparación del material	5
5.2. Poder calorífico	7
5.3. Análisis químico	7
5.4. Análisis proximal	7
5.5. Microanálisis de las cenizas	7
5.6. Análisis elemental	7
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>9</b>
6.1. Poder calorífico	9
6.2. Análisis químico	10
6.2.1. Polisacáridos (Celulosa y hemicelulosas)	10
6.2.2. Lignina	13
6.2.3. Extraíbles	14
6.3. Análisis proximal	16
6.3.1. Cenizas	16
6.3.2. Materia volátil	17
6.3.3. Carbono fijo	19
6.4. Microanálisis de cenizas	20
6.5. Análisis elemental	23
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>27</b>
<b>8. REFERENCIAS</b>	<b>28</b>
<b>9. ANEXOS</b>	<b>36</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<b>Tabla 1.</b> Lista de 7 especies y tipo de material de estudio.	1
<b>Tabla 2.</b> Ubicación geográfica y características de las siete especies de fabáceas estudiadas.	6
<b>Tabla 3.</b> Resultados del microanálisis de las cenizas de la madera y corteza de siete especies de fabáceas (ppm).	21
<b>Tabla 4.</b> Continuación de los resultados del microanálisis de las cenizas de la madera y corteza de siete especies de fabáceas (ppm).	21
<b>Tabla 5.</b> Continuación de los resultados del microanálisis de las cenizas de la madera y corteza de siete especies de fabáceas (ppm).	22
<b>Tabla 6.</b> Análisis elemental de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	23

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> Ubicación geográfica de los sitios de colecta de madera y corteza de 7 especies de fabáceas en la Cuenca de Lago de Cuitzeo, en Michoacán, México.	5
<b>Figura 2.</b> Diagrama general de la metodología.	8
<b>Figura 3.</b> Poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	9
<b>Figura 4.</b> Celulosa de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	10
<b>Figura 5.</b> Gráfica de correlación entre celulosa y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	11
<b>Figura 6.</b> Hemicelulosas de la madera y corteza de siete especies de fabáceas	12
<b>Figura 7.</b> Gráfica de correlación entre hemicelulosas y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas	12
<b>Figura 8.</b> Lignina de la madera y corteza de siete especies de Fabáceas.	13
<b>Figura 9.</b> Gráfica de correlación entre lignina y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	14
<b>Figura 10.</b> Extraíbles de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	15
<b>Figura 11.</b> Gráfica de correlación entre extraíbles y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	15
<b>Figura 12.</b> Cenizas de la madera y corteza de siete especies de fabáceas	17
<b>Figura 13.</b> Gráfica de correlación entre cenizas y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	17
<b>Figura 14.</b> Materia volátil de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	18
<b>Figura 15.</b> Gráfica de correlación entre materia volátil y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	19
<b>Figura 16.</b> Carbono fijo de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	20

<b>Figura 17.</b> Gráfica de correlación entre carbono fijo y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas	<b>20</b>
<b>Figura 18.</b> Gráfica de correlación entre carbono y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	<b>24</b>
<b>Figura 19.</b> Gráfica de correlación entre oxígeno y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	<b>24</b>
<b>Figura 20.</b> Gráfica de correlación entre hidrógeno y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas	<b>25</b>
<b>Figura 21.</b> Gráfica de correlación entre nitrógeno y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	<b>26</b>
<b>Figura 22.</b> Gráfica de correlación entre azufre y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.	<b>26</b>
<b>Figura 23.</b> Árbol de <i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd	<b>36</b>
<b>Figura 24.</b> Árbol de <i>Acacia pennatula</i> (Schl. et Cham) Benth.	<b>38</b>
<b>Figura 25.</b> Árbol de <i>Albizia plurijuga</i> (Standl.) Britton & Rose.	<b>40</b>
<b>Figura 26.</b> Árbol de <i>Erythrina coralloides</i> DC	<b>42</b>
<b>Figura 27.</b> Árbol de <i>Eysenhardtia polystacya</i> (Ortega) Sarg.	<b>44</b>
<b>Figura 28.</b> Árbol de <i>Pakinsonia aculeate</i> L.	<b>46</b>
<b>Figura 29.</b> Árbol de <i>Prosopis laevigata</i> (Humb. & Bonpl.) Jonhst.	<b>48</b>

## RESUMEN

En este trabajo se evaluó la composición química básica, el análisis proximal, el microanálisis de las cenizas, el análisis elemental y poder calorífico de la madera (duramen y albura) y corteza de siete especies de *Fabaceae*, con propósitos bioenergéticos. Las especies estudiadas fueron las siguientes: *Acacia farnesiana* (L.) Willd, *Acacia pennatula* (Schl. et Cham.) Benth, *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose, *Erythina caralloides* DC. *Eysenhardtia polystacya* (Ortega) Sarg., *Pakinsonia aculeate* L., *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) Jonhst. Los resultados obtenidos variaron en madera y (corteza) como sigue: celulosa 37.4-58.8% (20.2-37%), hemicelulosas 8.8-23.7% (9.7-17.6%), lignina 10.6-23.3% (13.1-26.5%), extraíbles totales 11.6-24.2% (23-36.1%), cenizas 0.7-3.8% (5.8-11.4%), materia volátil 78.3-91.7% (70-78.7%), carbono fijo 6.9-19.8% (9.7-23.4%). El microanálisis de cenizas revela la presencia de 20 elementos químicos y los más frecuentes en madera y corteza fueron  $Ca > K > P > Mg$  y  $Na$ . Por otro lado, el análisis elemental varió en madera y (corteza) como sigue: C 45.9-49.5% (42.4-49.1%), H 6.8-7.3% (6.4-7.2%), O 43.21-46.7% (42.32-50.45%), N 0.11-0.41% (0.58-1.64%), y S 0.04-0.14% (0.06-0.14%). Finalmente, el poder calorífico en madera varió de 18.3 a 20.1 MJ/kg, mientras que en la corteza los valores variaron de 17.3 a 21.2 MJ/kg. En base a los resultados obtenidos, la madera de las siete fabáceas puede usarse localmente como de biocombustibles sólidos.

**Palabras claves:** madera, corteza, biocombustibles sólidos, poder calorífico, *Fabaceae*.

## ABSTRACT

In this work, the basic chemical composition, proximate analysis, ash microanalysis, ultimate analysis and calorific value of wood (heartwood and sapwood) and bark of seven species of *Fabaceae*, for bioenergetic purposes were evaluated. The species studied were the following: *Acacia farnesiana* (L.) Willd, *Acacia pennatula* (Schl. et Cham.) Benth, *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose, *Erythina caralloides* DC. *Eysenhardtia polystacya* (Ortega) Sarg., *Pakinsonia aculeate* L., *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) Jonhst. The results obtained varied in wood and (bark) as follows: cellulose 37.4-58.8% (20.2-37%), hemicellulose 8.8-23.7% (9.7-17.6%), lignin 10.6-23.3% (13.1-26.5%), total extractives 11.6-24.2% (23-36.1%), ash 0.7-3.8% (5.8-11.4%), volatile matter 78.3-91.7% (70-78.7%), and fixed carbon 6.9-19.8% (9.7-23.4%). The ash microanalysis reveals the presence of 20 chemical elements and the most frequent wood and bark were  $Ca > K > P > Mg$  and  $Na$ . On the other hand, the ultimate analysis varied in wood and (bark) as follows: C 45.9-49.5% (42.4-49.1%), H 6.8-7.3% (6.4-7.2%), O 43.21-46.7% (42.32-50.45%), N 0.11-0.41% (0.58-1.64%), and S 0.04-0.14% (0.06-0.14%). Finally, the calorific value in wood varied from 18.3 to 20.1 MJ/kg, while in bark the values ranged from 17.3 to 21.2 MJ/kg. Based on the results obtained, the wood of the seven *Fabaceae* can be used locally as solid biofuels.

**Keywords:** Wood, bark, solid biofuels, calorific value, *Fabaceae*.



## 1. INTRODUCCIÓN

Las Fabáceas son el segundo grupo de plantas más diverso de México y sus especies se encuentran ampliamente distribuidas en todo el país (Sousa y Delgado, 1993; Estrada *et al.*, 2004). En la cuenca del Lago de Cuitzeo, ubicado en el estado de Michoacán, México, estas especies son abundantes y se desarrollan en vegetación de tipo bosques templado, matorrales, selva baja caducifolia (Bravo-Espinosa *et al.*, 2008; Maza-Villalobos *et al.*, 2014). Las Fabáceas que destacan en esta cuenca y que fueron aquí estudiadas se encuentran en la Tabla 1. Según fuentes locales, algunas de estas especies son utilizadas en la región como combustible principalmente, y son *Acacia farnesiana* (L.) Willd. y *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) Jonhst; la madera de esta última especie también se utiliza en la fabricación de muebles rústicos, puertas, ventanas y pisos. Con respecto a *Erythina caralloides* se elaboran artesanías con su madera y el resto de las especies no tiene uso comercial.

**Tabla 1.** Lista de 7 especies y tipo de material de estudio.

Nombre científico	Nombre común	Zona o tejido estudiado			
		M	D	A	C
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	Huizache	♦	-	-	♦
<i>Acacia pennatula</i> (Schl. et Cham) Benth.	Tepame	♦	-	-	♦
<i>Albizia plurijuga</i> (Standl.) Britton & Rose	Palo blanco	-	♦	♦	♦
<i>Erythina caralloides</i> DC.	Colorin	♦	-	-	♦
<i>Eysenhardtia polystacya</i> (Ortega) Sarg.	Palo dulce	-	♦	♦	♦
<i>Pakinsonia aculeate</i> L.	Palo verde	♦	-	-	♦
<i>Prosopis laevigata</i> (Humb. & Bonpl.) Jonhst.	Mezquite	-	♦	♦	♦

M: madera; D: duramen; A: albura; C: corteza. ♦: Zonas de la madera estudiada; -: zona de la madera no estudiada en cada especie debido a nula diferencia a nivel macroscópico entre albura y duramen.

Recientemente una de las prioridades del mundo es la generación de bioenergéticos sustentables y amigables con el medio ambiente, el uso de los recursos forestales son una fuente de biomasa para la generación de biocombustibles que representan una alternativa potencial, menos contaminante a comparación con los de origen fósil (Ayala-Mendivil y Sandoval, 2018).

Existen pocos estudios relacionados a las propiedades de los biocombustibles sólidos de maderas de la familia Fabaceae, sin embargo, investigaciones sobre este tema se han centrado en el género *Quercus* (Herrera-Fernández *et al.*, 2017; Cárdenas-Gutiérrez *et al.*, 2018) y al género *Pinus* (Pintor-Ibarra *et al.*, 2017; Morales-Máximo *et al.*, 2020; Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020). Así, se han elegido estas siete especies maderables para determinar su composición química y sus propiedades energéticas, para conocer su viabilidad como biocombustibles y contribuir a su conocimiento científico.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. *Acacia farnesiana* (L.) Willd.

En la literatura se han reportado algunas determinaciones sobre la caracterización química en frutos, corteza y madera de *A. farnesiana*, sin embargo, no se han realizado estudios sobre esta especie con fines bioenergéticos.

Barrientos-Ramírez *et al.* (2012) realizaron un estudio para determinar el análisis químico del fruto de huizache (*A. farnesiana*) para su posible uso en curtiduría o alimentación animal; entre los métodos destaca la obtención de taninos y número de Stiasny.

Daza-Bareño (2014) realizó una caracterización fitoquímica de los extraíbles obtenidos con éter de petróleo, acetato de etilo, butanol y agua a partir de la corteza de *A. farnesiana*.

Ramírez-Casillas *et al.* (2019) propone el uso de la madera de *A. farnesiana* para la fabricación de pulpa celulósica para papel; en esta investigación también se reportan algunos de sus componentes químicos (lignina, holocelulosa, hemicelulosas y cenizas).

### 2.2. *Acacia pennatula* (Schl. et Cham) Benth.

Apolinar-Hidalgo *et al.* (2017) caracterizaron la madera de *A. pennatula* y *Trema micrantha* (L.) Blume con fines energéticos, reportan su análisis proximal, algunas propiedades físicas como: contenido de humedad y densidad básica, además de su poder calorífico.

### 2.3. *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose

No se dispuso de reportes sobre la caracterización química de su madera

### 2.4. *Erythina caralloides* DC.

Mata-González (2015) evaluó el rendimiento de los extraíbles y su actividad antimicrobiana de la madera de *E. caralloides* y *E. americana* Miller.

No se encuentran registros sobre la evaluación química de los componentes estructurales de su madera (Lignina y carbohidratos), ni de su fracción inorgánica (cenizas), tampoco se ha propuesto su caracterización energética.

### 2.5. *Eysenhardtia polystacya* (Ortega) Sarg.

La literatura carece de reportes sobre el uso de la madera de *E. polystacya* para generar energía; algunas investigaciones existentes sobre esta especie se encuentran centradas en la actividad biológica de sus extraíbles en su madera y corteza (Pérez-Gutiérrez *et al.* 2016; Ambriz-Ortiz 2019).

## 2.6. *Pakinsonia aculeata* L.

Al-Youssef y Hassan (2015) caracterizaron la composición química de los extraíbles y su actividad antimicrobiana y antioxidante de la madera de *P. aculeata*. No se dispuso información sobre su composición química básica, tampoco antecedentes sobre su caracterización como materia prima para biocombustible

## 2.7. *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) Jonhst.

Carrillo *et al.* (2008) documentan el porcentaje de carbohidratos, lignina Klason y extraíbles en la madera de *P. laevigata*.

Martínez-Pérez *et al.* (2015) reportan el poder calorífico, porcentaje de cenizas y el microanálisis de los elementos inorgánicos en albura, duramen y corteza de *P. laevigata*.

Como se puede constatar en los antecedentes *A. pennatula* y *P. laevigata* son las únicas especies donde se han registrado su caracterización como materia prima para biocombustibles sólidos.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

Se dispuso de pocos estudios relacionados a la caracterización química y bioenergética de las especies del género Fabaceae elegidas para esta investigación, por otro lado, actualmente existe la búsqueda de fuentes de biomasa para generar bioenergía menos contaminantes a comparación de los de origen fósil (Ayala-Mendivil y Sandoval, 2018), sin embargo, es necesario evaluar algunas características como la composición química de las diferentes estructuras que conforman las especies maderables para proponer usos (Vassilev *et al.*, 2010; García *et al.*, 2012). De la presente investigación se esperan obtener resultados demostrativos de las propiedades de la biomasa estudiada, con la calidad adecuada para elaborar biocombustibles, que pudieran ser una alternativa viable para elaborar biocombustibles sólidos.

### **4. OBJETIVOS**

#### **4.1. Objetivo general**

Conocer la composición química de la madera y corteza de siete especies del género Fabaceae de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, que pudieran ser materia prima para uso bioenergético.

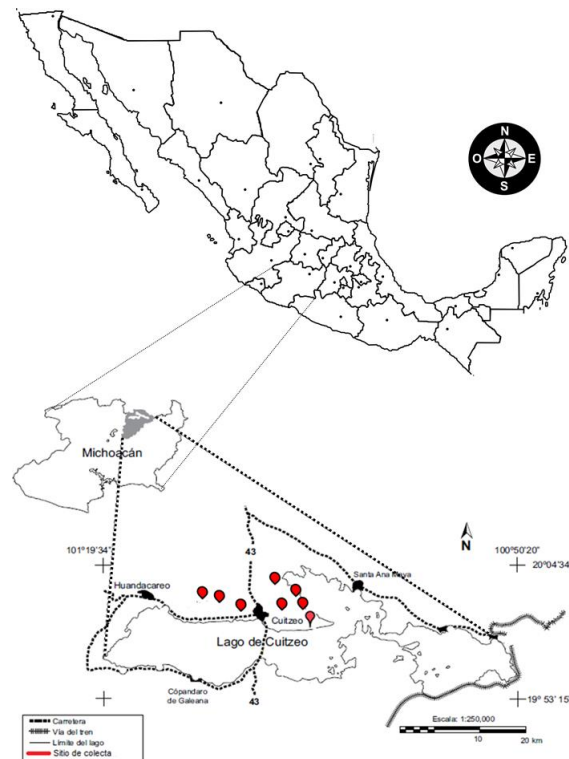
#### **4.2 Objetivos específicos**

- Conocer el poder calorífico
- Evaluar el contenido porcentual de celulosa, hemicelulosas, lignina y extraíbles
- Realizar análisis proximal
- Conocer qué elementos químicos están presentes en las cenizas
- Realizar análisis elemental

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 Colecta y preparación del material de estudio

Las especies se colectaron en la cuenca del Lago de Cuitzeo, en el Estado de Michoacán, México, en los sitios que se indican gráficamente en la Figura 1 y Tabla 2. De cada especie se colectaron tres individuos, se tomó una rodaja de 10 cm a una altura de 1.30 cm (DAP), después se procedió a separar de las rodajas la madera y corteza; estas zonas se astillaron de forma manual y se dejaron secar bajo sombra hasta una humedad en equilibrio (aproximadamente 12 %). Ya concluido el secado, las astillas de madera y corteza se molieron en un equipo convencional para finalmente proceder a tamizar la harina de biomasa utilizando tamices mallas número 20, 40 y 60; la harina malla 40 (425  $\mu\text{m}$ ) se utilizó para la caracterización química y energética (Figura 2).



**Figura 1.** Ubicación geográfica de los sitios de colecta de madera y corteza de 7 especies de fabáceas en la Cuenca de Lago de Cuitzeo, en Michoacán, México (Sánchez y Guevara, 2013).

**Tabla 2.** Ubicación geográfica y características de las siete especies de fabáceas muestreadas.

Nombre científico	Nombre Común	Ubicación Geográfica	DAP (cm)	Altura (m)	asnm (m)
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	Huizache	Árbol 1: 19° 57' 49" N 101° 6' 21" O	10	3.40	1870
		Árbol 2: 19° 57' 50" N 101° 6' 23" O	14	2.80	1880
		Árbol 3: 19° 58' 29" N 101° 9' 20" O	16	4.20	1840
<i>Acacia pennatula</i> (Schl. et Cham) Benth	Tepame	Árbol 1: 19° 58' 53" N 101° 7' 16" O	20	5.10	1840
		Árbol 2: 19° 57' 53" N 101° 6' 19" O	21	3.80	1880
		Árbol 3: 19° 58' 32" N 101° 5' 47" O	13	4.30	1860
<i>Albizia plurijuga</i> (Standl.) Britton & Rose	Palo blanco	Árbol 1: 19° 58' 34" N 101° 5' 40" O	22	8.30	1860
		Árbol 2: 19° 58' 28" N 101° 15' 51" O	34	9.10	1860
		Árbol 3: 19° 59' 3" N 101° 8' 45" O	36	10.45	1920
<i>Erythina caralloides</i> DC.	Colorin	Árbol 1: 19° 58' 8" N 101° 6' 28" O	14	3.5	1910
		Árbol 2: 19° 58' 7" N 101° 6' 24" O	12	5.40	1910
		Árbol 3: 19° 58' 19" N 101° 6' 3" O	13	3.70	1920
<i>Eysenhardtia polystacya</i> (Ortega) Sarg.	Palo dulce	Árbol 1: 19° 58' 32" N 101° 5' 45" O	16	5.30	1860
		Árbol 2: 19° 58' 38" N 101° 5' 42" O	15	4.80	1850
		Árbol 3: 19° 58' 13" N 101° 6' 11" O	24	4.60	1930
<i>Pakinsonia aculeate</i> L.	Palo verde	Árbol 1: 19° 58' 31" N 101° 8' 55" O	14	5.30	1840
		Árbol 2: 19° 58' 27" N 101° 8' 45" O	21	6.10	1840
		Árbol 3: 19° 58' 13" N 101° 8' 50" O	10	3.60	1840
<i>Prosopis laevigata</i> (Humb. & Bonpl.) Jonhst.	Mezquite	Árbol 1: 19° 58' 51" N 101° 7' 15" O	76	9.10	1850
		Árbol 2: 19° 58' 17" N 101° 7' 30" O	82	9.80	1880
		Árbol 3: 19° 58' 21" N 101° 7' 28" O	71	7.40	1880

## **5.2. Poder calorífico**

El poder calorífico se determinó en una bomba calorimétrica en base la norma UNE-EN-14918 (2011).

## **5.3. Análisis químico**

La determinación del porcentaje de celulosa, hemicelulosas, lignina y extraíbles se realizó en base a las condiciones de operación según Musule *et al.* (2016).

## **5.4. Análisis Proximal**

El porcentaje de cenizas se determinó según UNE-EN 14775 (2010) y el contenido de material volátil en base a la norma ASTM E872-82 (2013). El carbono fijo se calculó por diferencia, restando a 100 el porcentaje de cenizas y el porcentaje de material volátil (García *et al.*, 2012).

## **5.5. Microanálisis de cenizas**

El microanálisis de las cenizas se determinó en un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), bajo condiciones de operación reportadas por Arcibar *et al.* (2014).

## **5.6. Análisis elemental**

El contenido de carbón, hidrógeno, nitrógeno y azufre se analizó en base al método Dumas modificado (Rotz y Giuzzi 2012) y el contenido de oxígeno se calculó por diferencia en base a reportes de Ghetti *et al.* (1996).



**Figura 2.** Diagrama general de la metodología, **a)** derribo del árbol, **b)** astillado, **c)** molienda en un equipo convencional, **d)** tamizado para obtener harina de madera de tamaño de partícula 425  $\mu\text{m}$ , **e)** análisis de la composición química (celulosa, hemicelulosa, lignina y extraíbles), **f)** análisis proximales (cenizas, materia volátil y carbono fijo), **g)** microanálisis de las cenizas, **h)** análisis elemental (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre), **i)** determinación del poder calorífico.



## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Poder calorífico

En la figura 3 se puede apreciar que las maderas presentaron mejor poder calorífico en comparación con las cortezas, con la única excepción de la corteza de *P. laevigata*; esta tendencia puede estar correlacionada con el alto contenido de cenizas en la corteza (Figura 13), ya que algunos estudios han demostrado que a mayor cantidad de cenizas el poder calorífico disminuye (Martínez-Pérez *et al.*, 2015; Ngangyo-Heya *et al.*, 2016). En relación a las zonas duramen y albura resultó que el duramen presentó mayor poder calorífico y estos resultados coinciden con los estudios reportados por Martínez-Pérez *et al.* (2015) y por Ruiz-Aquino *et al.* (2019) en especies de latifoliadas mexicanas.

En la bibliografía se ha escrito que el poder calorífico de la madera está influenciado por su constitución química como el alto porcentaje de lignina y sustancias extraíbles (Moya y Tenorio, 2013; Ngangyo-Heya *et al.*, 2016). Con respecto al poder calorífico obtenido en las cortezas en esta investigación resultó que son mayores al rango de 14.46 a 17.06 MJ/kg encontrados para cortezas de seis árboles frutales según Martínez-Pérez *et al.* (2012). Por otro lado, los resultados obtenidos son comparables con el rango de 15.01 a 18.87 MJ/kg dado a conocer para cortezas de diez especies de latifoliadas mexicanas (Martínez-Pérez *et al.*, 2015). Finalmente, los resultados del poder calorífico obtenidos en las zonas madera y corteza de las siete fabáceas son comparables con el rango 17.56 a 21.7 MJ/kg relacionadas con especies de maderas del territorio mexicano (Ngangyo-Heya *et al.*, 2016; Ruiz-Aquino *et al.*, 2019; Gutiérrez-Acosta *et al.*, 2021).

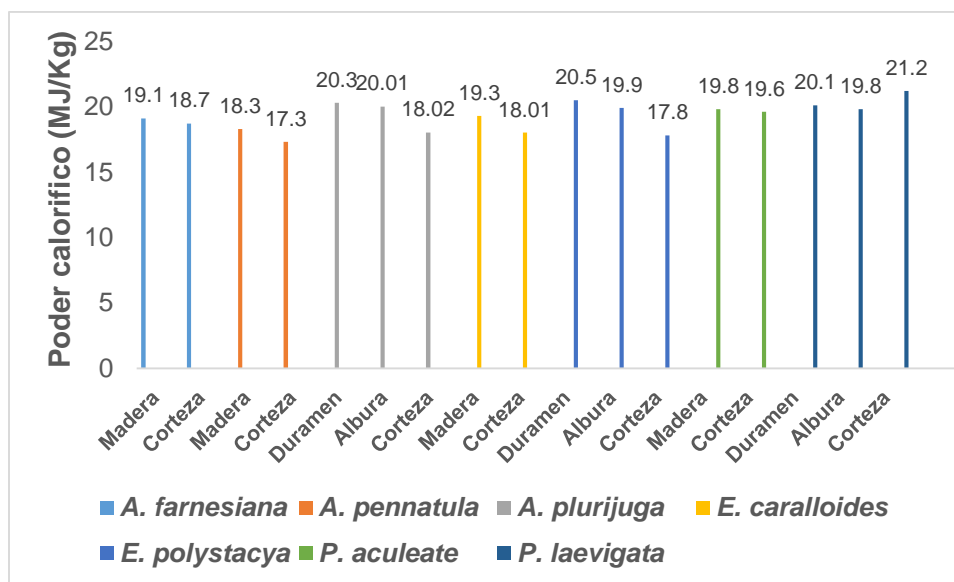


Figura 3. Poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

## 6.2. Análisis químico

### 6.2.1. Polisacáridos (Celulosa y hemicelulosas)

La holocelulosa es la fracción total de polisacáridos, estos componentes están conformados en conjunto por celulosa y hemicelulosas (Macdonald y Franklin, 1969; Sjöström, 1981; Fengel y Wegener, 1984; Pettersen, 1984). Los resultados obtenidos indican básicamente que las maderas de las siete Fabáceas son más ricas en celulosa en comparación de las cortezas; particularmente las alburas de *A. plurijuga* y *E. polystacya* presentaron mayor proporción de celulosa con respecto al duramen (Figura 4). En relación a las hemicelulosas en general las maderas presentaron mayores valores a comparación de las cortezas, pero la corteza de *E. caralloides* presentó mejor porcentaje en contraste con su madera (Figura 6). Los porcentajes de celulosa obtenidos en las maderas en este trabajo son comparables con los valores reportados para maderas de latifoliadas (38-49 %) (Pettersen, 1984), y en general para madera ya que diversos autores han reportado que el porcentaje de celulosa oscila entre 40 y 50% (Macdonald y Franklin, 1969; Pettersen 1984; Han y Rowel, 1996).

En la figura 5 se muestra el efecto de la celulosa sobre el poder calorífico donde el modelo de ajuste fue  $y = (0.0298) * X + 18.101$  ( $R^2 = 0.1089$ ), con una correlación baja en donde se observa que a mayor porcentaje de celulosa el poder calórico se favorece, por otro lado, Uceda (1984) reporta que las maderas ricas en carbohidratos (celulosa y hemicelulosas) pueden tener un bajo poder calorífico debido a que contendrán menor cantidad de lignina.

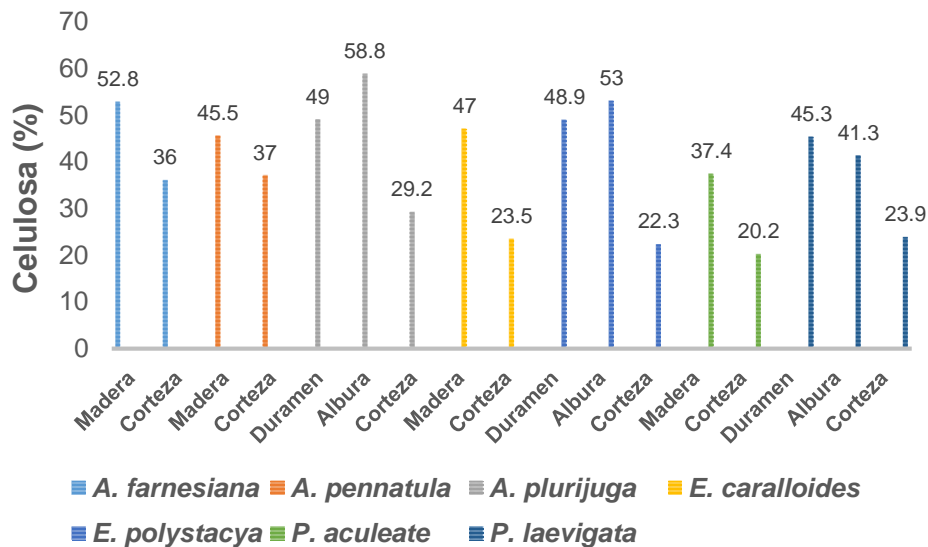
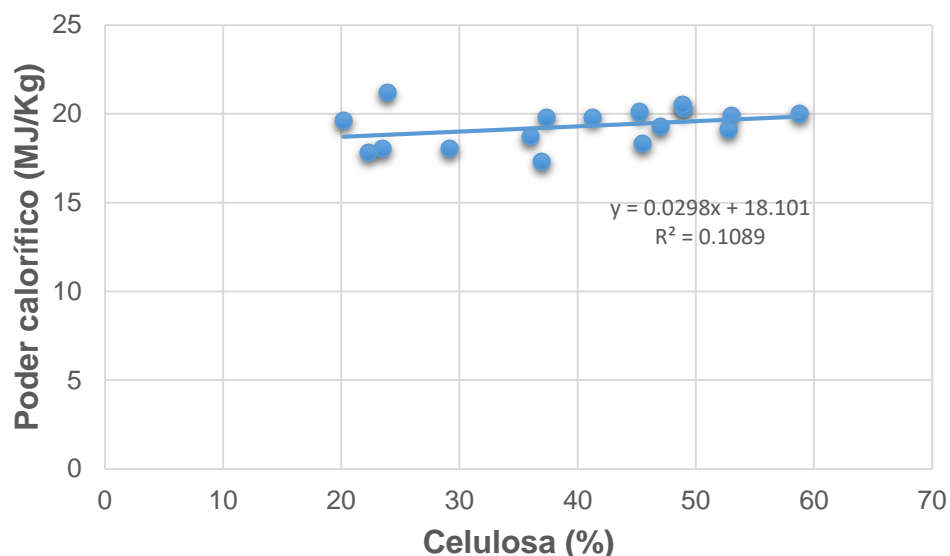


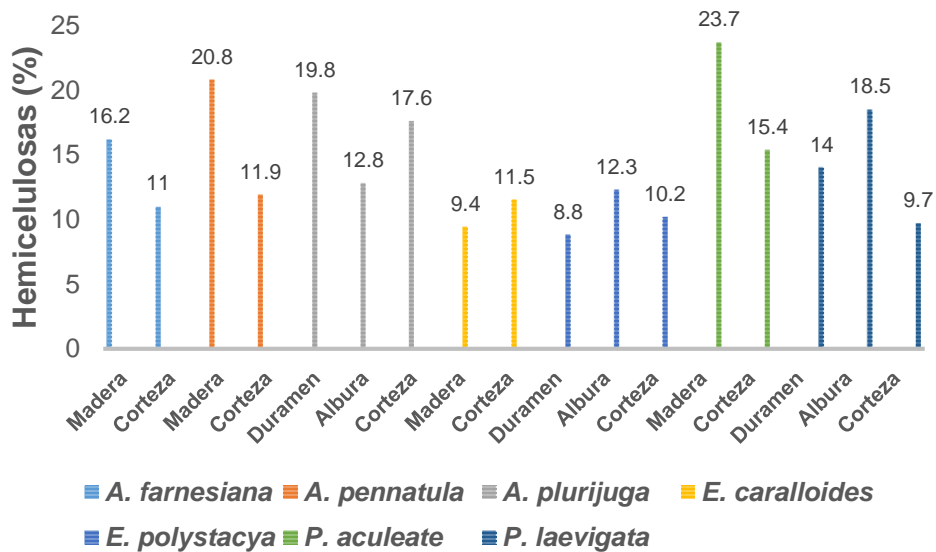
Figura 4. Celulosa de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.



**Figura 5.** Gráfica de correlación entre celulosa y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

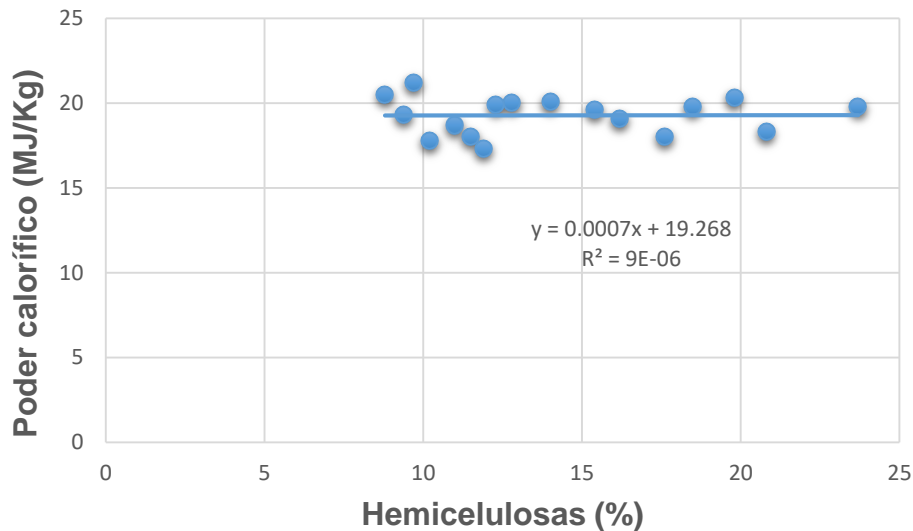
Investigaciones sobre la composición química de la madera de *A. farnesiana* reportan 51.48 % de celulosa y este valor es comparable con el obtenido en este trabajo, y en cuanto a hemicelulosas se reporta 11.40 % (Ramírez-Casillas *et al.*, 2019) que resulta menor al encontrado aquí (Figura 6). En relación a otros estudios químicos sobre el duramen de *P. laevigata*, Carrillo *et al.*, (2008) reportan 45.7 % de celulosa y 15.1 % de hemicelulosas, estos valores de carbohidratos son comparables con los porcentajes encontrados en este trabajo.

Los valores de hemicelulosas de las maderas de *A. farnesiana*, *A. pennatula* y *P. aculeate*, en los tejidos del duramen de *A. plurijuga*, y en albura de *P. laevigata* (Figura 6) encontrados en esta investigación se encuentran dentro del rango 15 a 35 % reportado para maderas de latifoliadas (Bustamante *et al.*, 2016). Por otro lado, los porcentajes de hemicelulosas del duramen en *A. plurijuga* y *P. laevigata*, se encuentran dentro de rango de 12.88 a 24.38 % publicado para tejidos de duramen en maderas de latifoliadas por Ruiz-Aquino *et al.* (2019); el valor aquí encontrado para el duramen de *E. polystacya* fue menor al rango citado. Con respecto a los valores de hemicelulosas en albura se encuentran dentro del rango (11.75 a 19.82 %) reportado en cinco especies de latifoliadas mexicanas (Ruiz-Aquino *et al.*, 2019).



**Figura 6.** Hemicelulosas de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

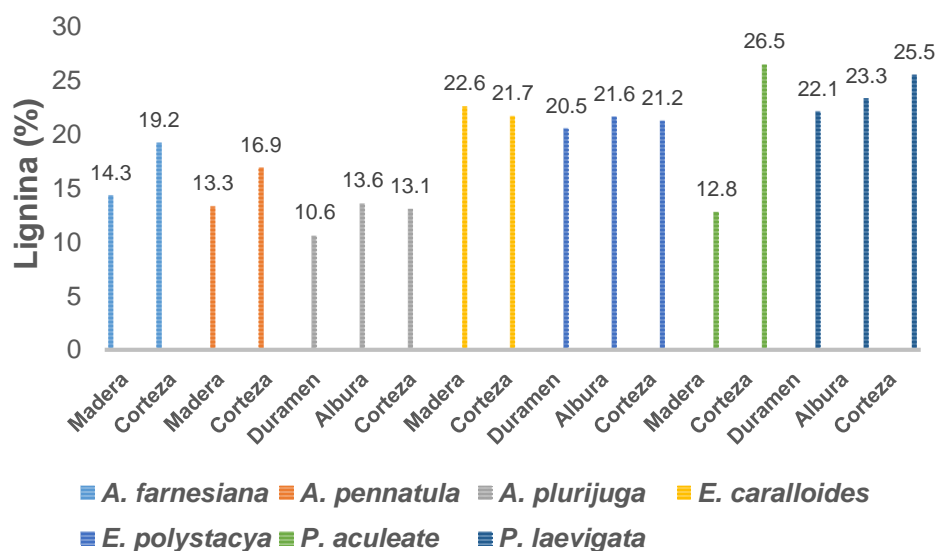
En este trabajo no se encontró correlación significativa:  $y = 0.0007 * X + 19.268$ , ( $R^2 = 9e^{-06}$ ) entre el porcentaje de hemicelulosas sobre el poder calorífico (Figura 7), sin embargo, Uceda (1984) encontró que maderas con altas cantidades de hemicelulosas presentan un poder calorífico bajo.



**Figura 7.** Gráfica de correlación entre hemicelulosas y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

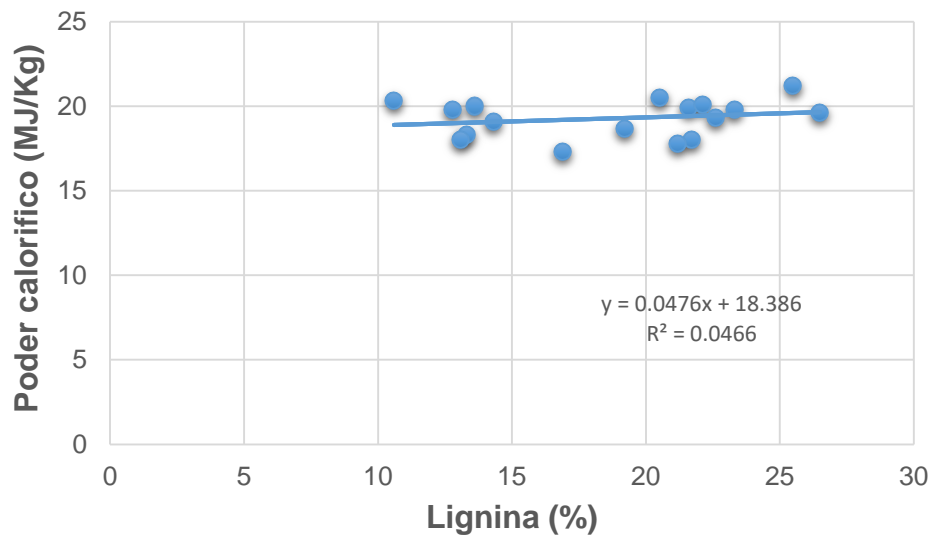
## 6.2.2. Lignina

En general resultó que las cortezas contienen mayores porcentajes de lignina en contraste con las maderas, a excepción de *A. plurijuga*, *E. caralloides* y *E. caralloides* (Figura 8); en la literatura también se ha documentado que la corteza concentra mayor cantidad de lignina (Sjöström, 1981; Fengel y Wegener 1984). En estudios previos sobre la madera de *A. farnesiana* encontraron que contenía 17.40 % de lignina (Ramírez-Casillas *et al.*, 2019), que resulta mayor al porcentaje encontrado en este trabajo. Por otro lado, Carrillo *et al.* (2008), también reportan mayor cantidad de lignina (29.8 %) en el duramen *P. laevigata*. Con respecto a las zonas de la madera, en la albura se registraron mejores rendimientos en comparación del duramen (Figura 8), esta tendencia coincide con otros estudios donde también caracterizaron las zonas albura y duramen en algunas especies de latifoliadas (Herrera-Fernández *et al.*, 2017; Ruiz-Aquino *et al.*, 2019; Ruiz-Aquino *et al.*, 2020). Por otra parte, los porcentajes de lignina encontrados en las maderas de *E. caralloides*, *E. polystacya* y *P. laevigata* se encuentran dentro del rango de 16 a 25 % registrado para maderas de latifoliadas (Miller, 1999; Bustamante *et al.*, 2016), el resto de las especies presentaron menores porcentajes.



**Figura 8.** Lignina de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

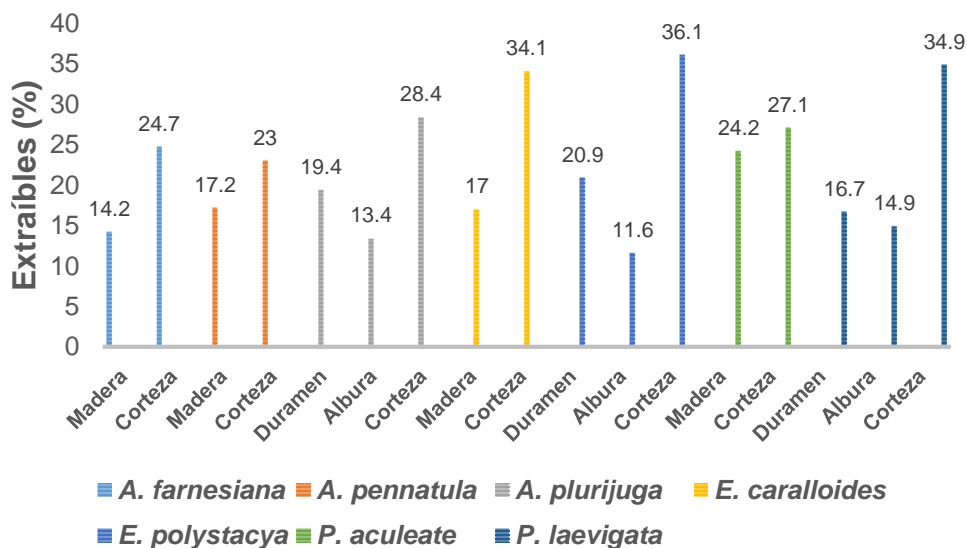
Investigaciones previas han declarado que altas cantidades de lignina en la madera y corteza favorecen el poder calorífico y la calidad de los biocombustibles sólidos (Varfolomeev *et al.*, 2015; Ngangyo-Heya *et al.*, 2016). Lo anterior es consistente con la correlación encontrada en este trabajo (Figura 9), donde a mayor porcentaje de lignina el poder calorífico se favoreció positivamente ( $y = 0.0476 * X + 18.386$ ), y ( $R^2 = 0.0466$ ).



**Figura 9.** Gráfica de correlación entre lignina y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

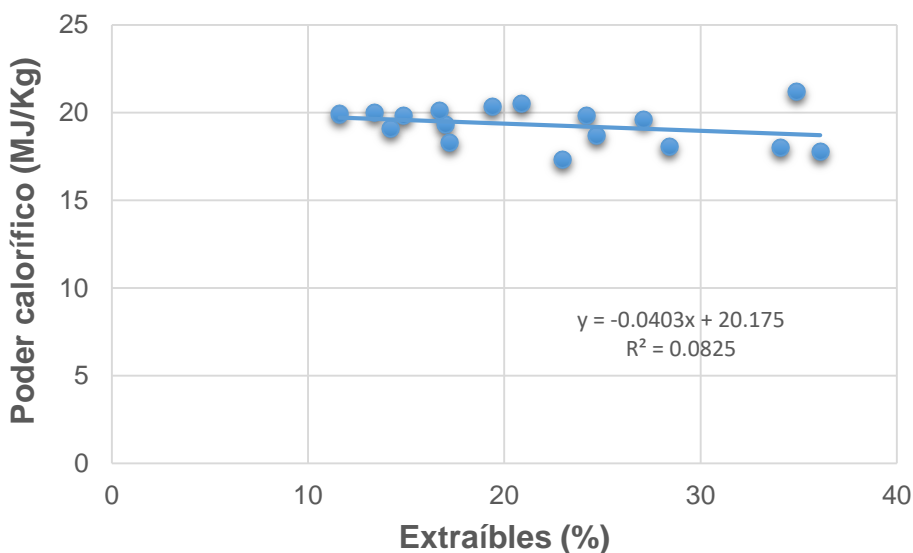
### 6.2.3. Extraíbles

Las cortezas de las siete especies son más ricas en sustancias extraíbles a comparación de las maderas, en específico el duramen presentó mejores rendimientos con respecto a la albura (Figura 10), estos resultados coinciden con los reportados en la literatura para maderas de latifoliadas (Hillis, 1971; Sjöström, 1981; Fengel y Wegener, 1984). Los valores de extraíbles en las cortezas obtenidos en este trabajo se encuentran dentro de los valores de 20 a 40 % reportados por Sjöström (1981) y por Yang y Jaakkola (2011) para maderas de latifoliadas. Con respecto a los valores de extraíbles presentes en el duramen de *A. plurijuga* y *E. polystacya* se encuentran dentro de los valores de 19 a 29.7 %, y la albura de *A. plurijuga*, *E. polystacya* y *P. laevigata* al rango de 9.84 a 15.8 % reportados en otras especies de Fabáceas: *Andira inermis*, *Enterolobium cyclocarpum* y *Haematoxylon brasiletto* (Téllez-Sánchez *et al.*, 2010; Ramos-Pantaleón *et al.*, 2011; Ávila-Calderón y Rutiaga-Quiñones, 2014); el porcentaje de extractos del duramen de *P. laevigata* es menor a los valores mencionados anteriormente, sin embargo, el porcentaje obtenido en esta investigación es comparable con el rango (14.1 a 16 %) reportado en duramen de la misma especie por Carrillo *et al.* (2008).



**Figura 10.** Extraíbles de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

En general la madera y las cortezas de las siete especies en esta investigación son ricas en sustancias extraíbles, y se encontró en la gráfica de correlación de los extraíbles sobre el poder calorífico (Figura 11), que a mayor cantidad de extraíbles el poder calorífico disminuye ( $y = (-0.0403) * X + 20.175$ ), ( $R^2 = 0.0825$ ), lo anterior coincide con Demirbaş y Demirbaş (2004), estos autores mencionan que los extraíbles afectan el poder calorífico de los materiales lignocelulosicos. Sin embargo, otros autores como: Uceda (1984) y Ngangyo-Heya *et al.*, (2016) mencionan que los extraíbles favorecen el poder calorífico en los biocombustibles sólidos, esta controversia puede estar relacionada con el hecho de que al aumentar la proporción de cenizas y extraíbles la fracción de lignina disminuye en la biomasa (Figuras 11 y 13).



**Figura 11.** Gráfica de correlación entre extraíbles y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

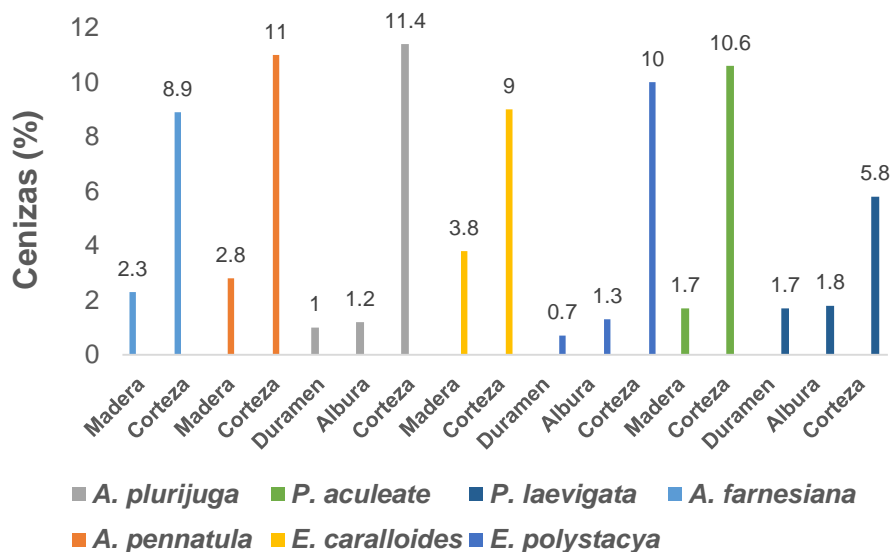
## 6.3. Análisis proximal

### 6.3.1. Cenizas

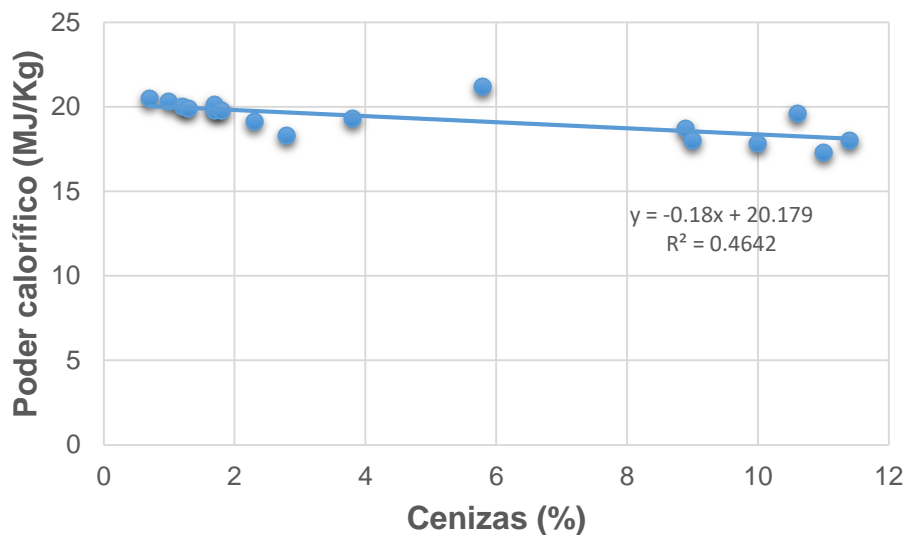
La evaluación de las cenizas es un parámetro importante que determina la calidad de los biocombustibles sólidos (Demirbaş y Demirbaş, 2004). Los resultados obtenidos indican que la corteza contiene mayor cantidad de cenizas en comparación con la madera (Figura 12), esto coincide con literatura, donde también se ha declarado que la corteza de algunas especies puede contener hasta diez veces más cenizas que su madera (Fengel y Wegener, 1984; Martínez-Pérez *et al.* 2015). Alto contenido de cenizas obstruye el flujo de los gases de combustión dentro de la caldera de biomasa, reducen la calidad de los biocombustibles sólidos, aumentan la emisión de partículas al medio ambiente y reduce el poder calorífico de la biomasa (Obernberger y Thek, 2006; Tumuluru *et al.*, 2010; Werkelin *et al.*, 2011), además en la Figura 13 con respecto a la correlación de las cenizas sobre el poder calorífico  $R^2 = 0.4642$  ( $y = (-0.18) * X + 20.179$ ) se puede apreciar que a mayor cantidad de cenizas el poder calorífico de los biocombustibles sólidos disminuye en otras investigaciones también se ha demostrado la misma correlación (Martínez-Pérez *et al.* 2015; Ngangyo-Heya *et al.*, 2016; Carrillo *et al.*, 2018). En cuanto a las zonas de la madera se encontró que la albura es más rica en sustancias inorgánicas en comparación con el duramen, esta tendencia coincide con Kollmann (1959) y con Ávila-Calderón y Rutiaga-Quiñones *et al.* (2014). Estudios previos sobre la caracterización de la madera y corteza de *P. laevigata* encontraron la misma tendencia aquí observada en cuanto a la concentración de cenizas en las zonas de corteza y madera (corteza > albura > duramen) (Martínez-Pérez *et al.* (2015), por otro lado, Apolinar *et al.* (2017) reportan un valor menor de cenizas (1.07%) en madera de *A. pennatula*, al aquí obtenido.

En relación a los estándares internacionales sobre los contenidos de cenizas en los biocombustibles sólidos, sólo el duramen *E. polystacya* cumple con los requisitos de comercialización, el resto de las muestras caracterizadas en este trabajo no cumplen con los estándares para la elaboración de pélets, ya que se requieren valores no mayores a 0.70 % (Obernberger y Thek, 2010), ni tampoco para elaborar briquetas, cuyo valor límite es 0.5 % (ÖNORM M 7135, 2000), sin embargo, la biomasa de las siete Fabáceas pudiera ser utilizada de forma local.





**Figura 12.** Cenizas de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.



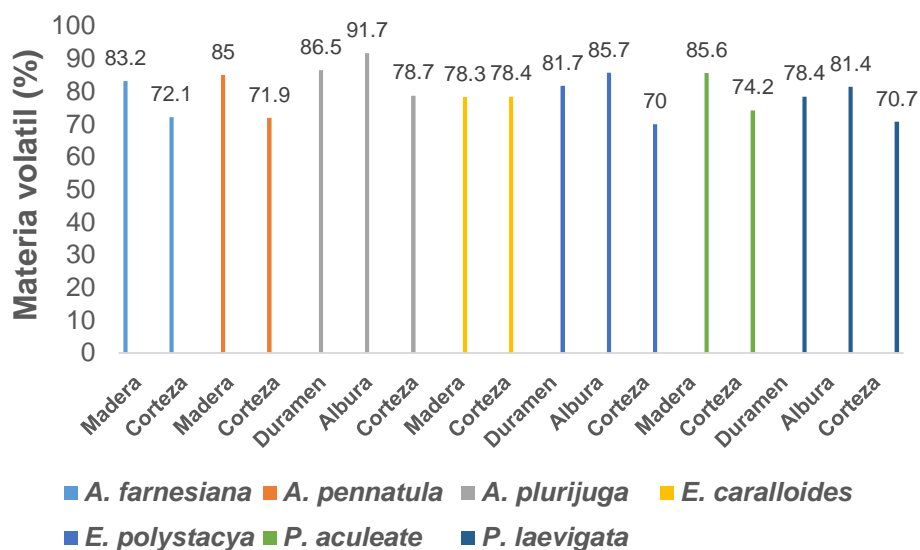
**Figura 13.** Gráfica de correlación entre cenizas y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

### 6.3.2. Materia volátil

La materia volátil es un parámetro importante que debe evaluarse en los biocombustibles sólidos (Tauro *et al.*, 2018). La fracción volátil en las muestras estudiadas fue mayor en la madera en comparación con la corteza, y con respecto a las zonas de la madera se encontró que la albura contiene mayores porcentajes en contraste con el duramen (Figura 14). Los porcentajes de materia volátil encontrados en las distintas zonas de las Fabáceas, a excepción de la albura de *A. plurijuga*, se encuentran dentro del intervalo de 66 a 85 % reportados para biocombustibles sólidos como pellets, briquetas, astillas y aserrines derivados de especies maderables (García *et al.*, 2012). Además, en general los valores de materia volátil encontrados en las especies maderables de este trabajo son similares al rango (81.7 a 87.33 %) encontrado para seis maderas de latifoliadas

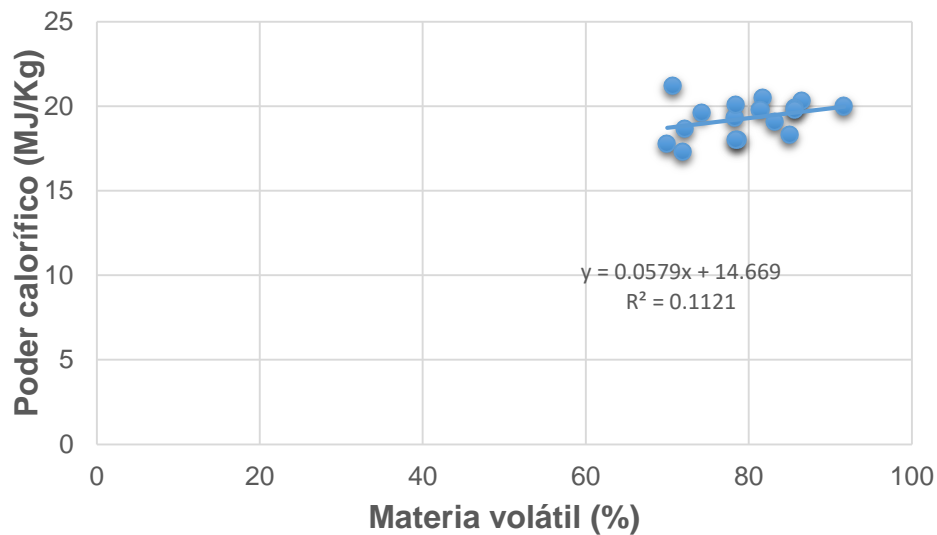
tropicales (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020). En este contexto, es bien sabido que la biomasa contiene altas cantidades de materia volátil (64-98%) en comparación con el carbón fósil (<40%) (Vassilev *et al.*, 2010). Con respecto a otra investigación, el valor de materia volátil encontrado en la madera de *A. pennatula* es comparable con el 86.56% reportado por Apolinar *et al.* (2017).

En la literatura se ha reportado que biomásas con altos porcentajes de materia volátil son adecuadas para su conversión como biogás, pirolisis, etc. (Holt *et al.*, 2006), además, Kataki y Konwer (2002) reportan que altos porcentajes de materia volátil generan una rápida combustión en los biocombustibles lo que pudiera ser una desventaja, por lo tanto, la biomasa derivada de las siete Fabáceas pudiera ser fuente de otros biocombustibles derivados de la conversión termoquímica.



**Figura 14.** Materia volátil de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

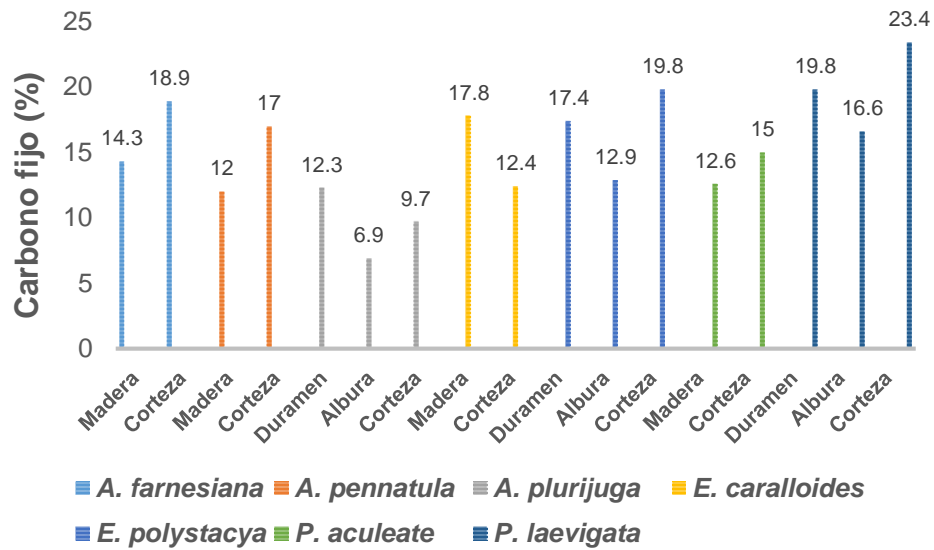
Con respecto a la materia volátil sobre el poder calorífico presento una correlación baja  $R^2 = 0.1121$ , ( $y = 0.0579 * X + 14.669$ ), resultando que mayor proporción de materia volátil favorece el poder calorífico (Figura 15), esta misma afinidad la reportan Palamanit *et al.* (2019) Y Sánchez-Martínez 2021. Por otro lado, porcentajes altos de materia volátil en los biocombustibles sólidos, favorecen la rápida ignición, presencia de flama y producción alta de chispas (García, 2008), en desventaja alto porcentaje de esta fracción volátil provocaría grandes cantidades de humos durante la combustión (De la Cruz *et al.*, 2020).



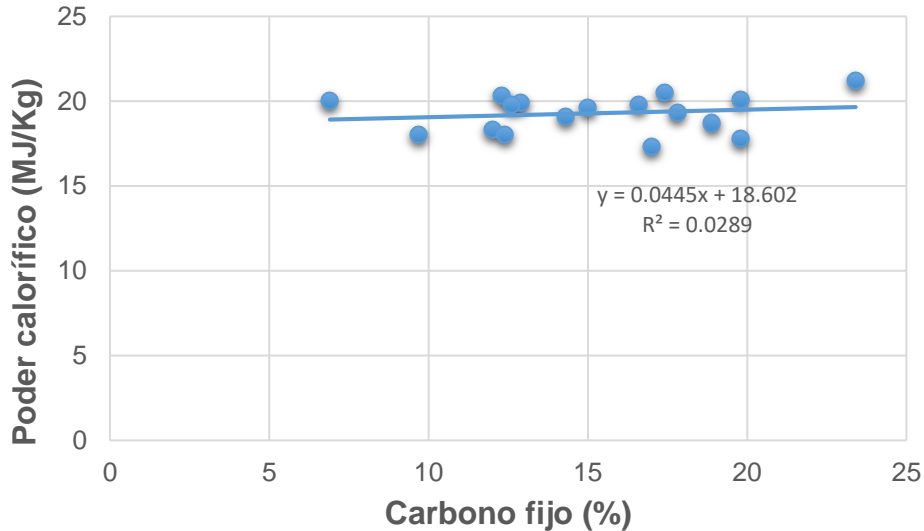
**Figura 15.** Gráfica de correlación entre materia volátil y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

### 6.3.3. Carbono fijo

El carbono fijo es una propiedad de la biomasa que tiene influencia positiva en el poder calorífico de los biocombustibles sólidos, en la gráfica de correlación entre carbono fijo sobre el poder calorífico ( $R^2 = 0.0289$ ) y ( $y = 0.0445 * X + 18.602$ ), se puede verificar que a mayor el porcentaje de carbono fijo el poder calorífico aumenta (Figura 17), lo que coincide con otros estudios previos (Forero-Nuñez *et al.*, 2015; Tenorio *et al.*, 2015; Palamanit *et al.*, 2019; De la Cruz *et al.*, 2020). En este trabajo resultaron valores de carbono fijo de 6.97 a 23.44%, y en general la corteza contiene mayor contenido de carbono fijo en comparación con la madera, a excepción de las maderas de *A. plurijugá* y *E. caralloides*, en particular el duramen concentró mejores cantidades de carbono fijo en comparación con la albura (Figura 16). En otro trabajo sobre la caracterización energética de *A. pennatula* se obtuvo 12.37 % de carbono fijo (Apolinar *et al.*, 2017), este valor es comparable con el encontrado en este trabajo para esa misma especie (Figura 16). En contraste con otros trabajos y a excepción de la albura y corteza de *A. plurijugá*, los resultados de carbono fijo se encuentran dentro del rango de 11.20 a 24.90 % reportados para diversos biocombustibles sólidos comerciales (García *et al.* 2012), y en general los resultados derivados de las maderas son comparables con el intervalo de 9.32 a 16.69 % correspondiente a maderas tropicales mexicanas (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020).



**Figura 16.** Carbono fijo de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.



**Figura 17.** Gráfica de correlación entre carbono fijo y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

#### 6.4. Microanálisis de las cenizas

Se identificaron veinte elementos inorgánicos en las cenizas de la biomasa de las siete Fabáceas (Tablas 3, 4 y 5). La norma internacional UNE-EN 14961-1 (2011) menciona que los minerales más frecuentes en las cenizas son: Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P y Si; estos minerales anteriores fueron detectados tanto en las maderas como en cortezas de las siete especies aquí estudiadas. Sin embargo, los resultados obtenidos indican que los elementos más abundantes, y de mayor a menor concentración, tanto en madera como en corteza de las siete Fabáceas, fueron el Ca > K > P > Mg > Na. También se encontró que estos minerales se encuentran en mayor proporción en las maderas en comparación con las cortezas (Tabla 3). En la literatura se ha reportado que el Ca, K, P y Mg son los principales elementos químicos en la madera (Fengel y Wegener, 1984; Miller, 1999; Ngangyo-

Heya *et al.*, 2016; Ruiz-Aquino *et al.*, 2020; Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020), lo que está en concordancia con lo aquí encontrado. Por otra parte, los resultados aquí obtenidos muestran que el calcio y el potasio fueron los elementos más abundantes en la corteza, lo que coincide con Sjöström (1981). También se observó mayor concentración de potasio, fósforo y magnesio en la albura en comparación con la corteza, lo que concuerda con Rowell (2005); Ávila-Calderón y Rutiaga-Quiñones (2014). Por otro lado, Sjöström (1981) menciona que se puede encontrar la presencia de B, Cu, Mn, Si y Zn, y en este trabajo se detectaron estos elementos, tanto en la madera como en la corteza. Otra investigación sobre el microanálisis de las cenizas en madera y corteza de *P. laevigata* también se detectó el Ca, K, Mg, P, Si y Al (Martínez-Pérez *et al.*, 2015).

**Tabla 3.** Resultados del microanálisis de las cenizas de la madera y corteza de siete especies de fabáceas (ppm).

Especie	Zona	Ca	K	P	Mg	Na
<i>A. farnesiana</i>	Madera	5857.73	17816.19	4931.83	1741.02	1112.67
	Corteza	1148.42	4819.37	1408.56	355.89	288.11
<i>A. pennatula</i>	Madera	3608.25	12151.00	3131.79	1233.74	975.55
	Corteza	995.38	4618.75	1415.00	347.39	173.17
<i>A. plurijuga</i>	Duramen	5808.86	19958.07	340.06	2075.61	2773.95
	Albura	8341.36	23627.18	5393.37	2442.03	2076.00
	Corteza	786.60	3911.98	1076.34	316.04	260.89
<i>E. caralloides</i>	Madera	3538.31	9697.37	5540.06	915.15	736.64
	Corteza	1179.51	4802.26	1546.80	334.18	265.17
<i>E. polystacya</i>	Duramen	11972.38	26465.17	637.67	3414.15	601.81
	Albura	6107.08	17414.83	11380.60	1720.43	1856.34
	Corteza	1473.15	5679.15	1807.69	486.36	302.65
<i>P. aculeate</i>	Madera	6884.34	20791.99	7164.49	2038.47	4160.62
	Corteza	5934.58	19482.88	1453.56	2042.74	1822.37
<i>P. laevigata</i>	Duramen	6933.19	20249.06	349.69	648.53	2818.17
	Albura	5938.52	16946.85	3555.77	1468.00	1985.28
	Corteza	2204.21	7611.24	636.42	526.32	498.99

La norma especializada en biocombustibles sólidos UNE-EN 14961-1 (2011) indica que los elementos químicos presentes en menor proporción en las cenizas son: As, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, V y Zn, sin embargo, en este trabajo no se detectó As, Cd, Co, Hg, y sólo se identificó la presencia de Cr y Pb, en bajas concentraciones, en las cortezas de *E. caralloides* y *P. aculeate*, respectivamente (Tablas 5). En los resultados del microanálisis también se detectó la presencia de Sr y Ba en concentraciones notables y en menor cantidad Li y Sn; otro estudio con maderas mexicanas también reporta la presencia de Ba y Li (Rutiaga-Quiñones *et al.*, 2020).

**Tabla 4.** Continuación de los resultados del microanálisis de las cenizas de la madera y corteza de siete especies de fabáceas (ppm).

Especie	Zona	Sr	Ba	Mn	Al	B	Ni	Si
<i>A. farnesiana</i>	Madera	455.12	352.01	27.95	29.69	86.07	3.26	13.46
	Corteza	120.63	145.80	10.54	106.51	55.94	1.48	142.96
<i>A. pennatula</i>	Madera	329.02	245.41	25.59	10.45	45.34	35.92	ND
	Corteza	115.94	136.38	9.75	32.15	53.28	12.09	48.48
<i>A. plurijuga</i>	Duramen	517.85	116.19	11.92	34.14	345.07	13.55	93.20
	Albura	600.06	123.87	47.34	59.97	114.08	4094.75	51.94
	Corteza	104.66	122.69	24.38	18.81	44.87	0.47	7.43

<i>E. caralloides</i>	Madera	259.82	191.80	81.39	15.25	54.69	52.10	456.42
	Corteza	129.15	143.92	70.02	27.18	72.23	127.39	205.24
<i>E. polystacya</i>	Duramen	861.95	886.69	134.04	52.07	262.23	177.20	77.73
	Albura	447.32	406.16	124.44	42.64	162.86	8.52	30.34
	Corteza	151.75	172.74	35.26	87.38	102.96	1.13	95.17
<i>P. aculeate</i>	Madera	503.97	129.07	72.06	7.31	84.78	156.10	251.43
	Corteza	512.88	170.34	48.40	284.94	95.80	118.08	616.68
<i>P. laevigata</i>	Duramen	523.49	100.90	16.33	154.87	60.27	0.02	ND
	Albura	444.57	83.89	59.77	12.88	52.62	0.96	ND
	Corteza	192.89	116.78	56.53	83.02	109.07	24.14	91.57
ND = elemento no detectado								

Los elementos Ca, K, P y Mg encontrados en mayor proporción en esta investigación son de importancia, ya que pueden ser una limitante para el uso de estas biomásas como biocombustibles sólidos, ya que según diversos estudios han demostrado que estos minerales pudieran causar problemas en el punto de fusión de las cenizas, causar escorias, corrosión, emisión de partículas finas y formación de incrustaciones en hornos y calderas (Oberberger y Thek, 2004; Van Lith *et al.*, 2006; Oberberger y Thek, 2010; Telmo *et al.*, 2010). Pero, autores como Van Lith *et al.* (2006) y De la Cruz *et al.* (2020) mencionan que el Ca y Mg pueden ser favorables en la combustión porque aumentan el punto de fusión de la ceniza, reducen la cantidad de la misma en los equipos de combustión y favorecen la inocuidad de los residuos al momento de su dispersión al ambiente. Finalmente, Na, Fe, y Si, pueden causar problemas en la fusión de las cenizas, incrustaciones y corrosión (Oberberger y Thek, 2004; Oberberger y Thek, 2010).

**Tabla 5.** Continuación de los resultados del microanálisis de las cenizas de la madera y corteza de siete especies de fabáceas (ppm).

Especie	Zona	Zn	Cu	Li	Cr	Fe	Pb	Sn	V
<i>A. farnesiana</i>	Madera	15.88	28.14	20.15	ND	165.58	ND	ND	ND
	Corteza	10.77	10.52	12.67	ND	35.35	ND	0.26	0.13
<i>A. pennatula</i>	Madera	15.62	18.83	24.98	ND	21.95	ND	ND	ND
	Corteza	9.23	6.92	19.39	ND	ND	ND	0.12	ND
<i>A. plurijuga</i>	Duramen	7.51	39.72	137.36	ND	86.76	ND	ND	ND
	Albura	45.76	30.83	59.55	ND	11.51	ND	ND	ND
	Corteza	6.61	3.53	6.52	ND	ND	ND	0.16	ND
<i>E. caralloides</i>	Madera	29.33	23.70	24.06	ND	ND	ND	ND	ND
	Corteza	21.44	10.91	25.69	0.18	1.11	ND	0.20	ND
<i>E. polystacya</i>	Duramen	123.31	292.09	13.19	ND	ND	ND	ND	ND
	Albura	102.78	85.84	153.77	ND	0.41	ND	ND	ND
	Corteza	45.95	26.72	22.92	ND	7.04	ND	0.25	0.10
<i>P. aculeate</i>	Madera	199.13	34.02	127.23	ND	ND	ND	1.00	ND
	Corteza	34.38	15.10	5.38	ND	1.30	0.32	5.04	0.09
<i>P. laevigata</i>	Duramen	12.19	28.13	59.68	ND	ND	ND	0.18	ND
	Albura	25.03	31.66	6.28	ND	ND	ND	11.42	ND
	Corteza	10.97	13.57	12.01	ND	ND	ND	ND	0.11
ND = elemento no detectado									

## 6.5. Análisis elemental

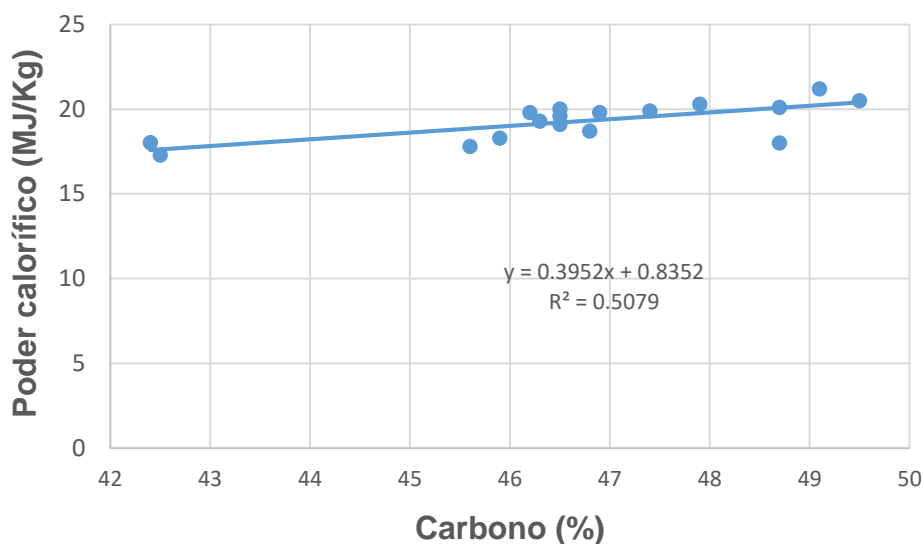
Los análisis elementales detectan características importantes de la biomasa, ya que muestran, exactamente, los elementos atómicos que contiene, sin considerar la fracción inorgánica que conforman las cenizas (Bustamante *et al.*, 2016). Los resultados de este análisis indican que las zonas del duramen de *A. plurijuga*, *E. polystacya* y *P. laevigata* registraron mayor cantidad de C en comparación de sus alburas, mientras que las alburas contienen mayores cantidades de H, O, N y S (Tabla 6). En general los resultados obtenidos en este trabajo son comparables con los valores reportados para biocombustibles sólidos comerciales (C: 38.94 a 48.15%; O: 45.20 a 54.13%; H: 4.81 a 6.39%; N: 0.27 a 1.24%; S: 0.17 a 0.84%) como pellets, briquetas, astillas y aserrín de diversas especies por García *et al.* (2012). Por otra parte, los valores promedio de la sustancia madera de las siete especies aquí estudiadas (C: 47.28%; O: 43.67; H: 7.08%; N: 0.25%), se encuentran muy cercanos a rangos (C: 49.13 a 49.85%; O: 43.62 a 44.49%; H: 6.02 a 6.20%; N: 0.14 a 0.42%) encontrados en varias especies de maderas tropicales mexicanas según Rutiaga-Quiñones *et al.* (2020). De manera general, los resultados del análisis elemental son cercanos a los rangos reportados para maderas de latifoliadas ISO 17225-2 (2014).

**Tabla 6.** Análisis elemental de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

Especie	Zona	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
<i>A. farnesiana</i>	Madera	46.5	6.8	43.9	0.32	0.14
	Corteza	46.8	6.5	33.5	1.16	0.08
<i>A. pennatula</i>	Madera	45.9	7.1	43.9	0.21	0.08
	Corteza	42.5	6.4	39.4	0.58	0.07
<i>A. plurijuga</i>	Duramen	47.9	7.2	43.7	0.11	0.06
	Albura	46.5	7.3	44.7	0.15	0.06
	Corteza	42.4	6.6	38.5	0.96	0.06
<i>E. caralloides</i>	Madera	46.3	6.9	42.5	0.41	0.08
	Corteza	48.7	7.2	34.05	0.91	0.14
<i>E. polystacya</i>	Duramen	49.5	7.1	42.5	0.14	0.05
	Albura	47.4	7.2	43.7	0.29	0.07
	Corteza	45.6	6.4	36.4	1.52	0.08
<i>P. aculeate</i>	Madera	46.2	7.2	44.4	0.41	0.05
	Corteza	46.5	6.8	34.8	1.12	0.12
<i>P. laevigata</i>	Duramen	48.7	6.9	42.4	0.21	0.04
	Albura	46.9	7.1	43.8	0.34	0.06
	Corteza	49.1	6.8	36.5	1.64	0.14

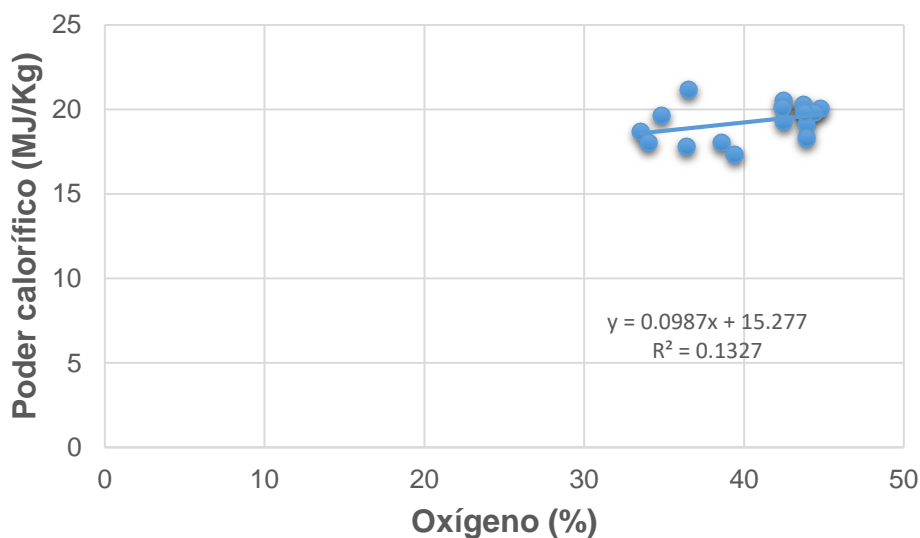
El resultado del análisis elemental de la biomasa de las especies aquí caracterizadas indican modesta concentración mayoritaria de C (Tabla 6), además en la figura 18 se puede elucidar la correlación entre el porcentaje de carbono sobre el poder calorífico ( $y = 0.3952 * X + 0.8352$ ) y ( $R^2 = 0.5079$ ), donde resultado que al aumentar la porción de carbono el poder calorífico mejora, estos resultados son consistentes con la bibliografía citada donde también se reporta que altas cantidades de carbono producen mejor energía y es favorable para los biocombustibles sólidos ya que estos elementos durante la combustión generan una

reacción exotérmica lo que favorece el poder calorífico del combustible (García *et al.*, 2012; Palamanit *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2021).



**Figura 18.** Gráfica de correlación entre carbono y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

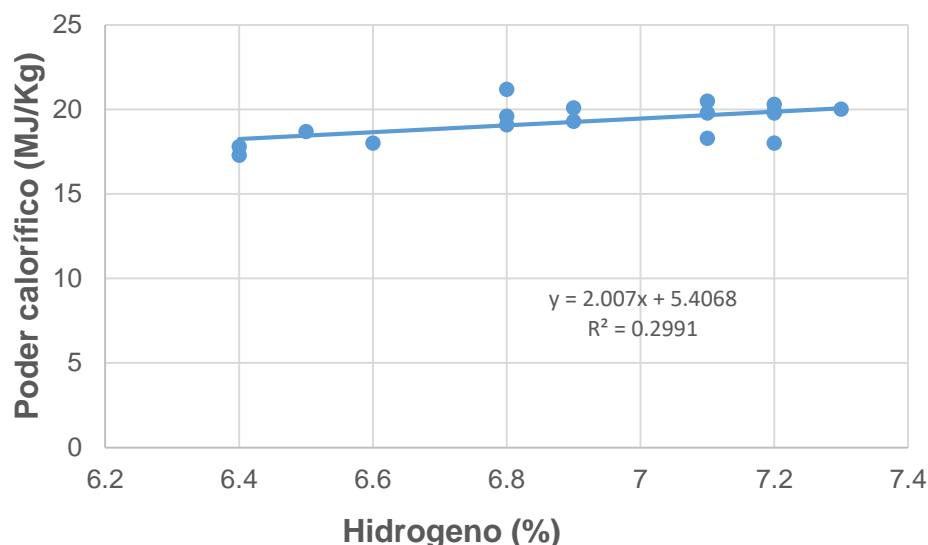
El carbono y el oxígeno reaccionan durante la combustión en una reacción exotérmica, generando  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Por lo tanto, el C y O contribuyen de forma positiva al poder calorífico del combustible (García *et al.*, 2012). En la gráfica 19 de correlación entre oxígeno sobre el poder calórico ( $y = 0.0987 * X + 15.277$ ) y ( $R^2 = 0.1327$ ), resultado que al aumentar la proporción de oxígeno contribuye de forma positiva al poder calórico. Sin embargo, Ali *et al.* (2021) mencionan que las biomásas con alto contenido de O pueden provocar corrosión.



**Figura 19.** Gráfica de correlación entre oxígeno y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

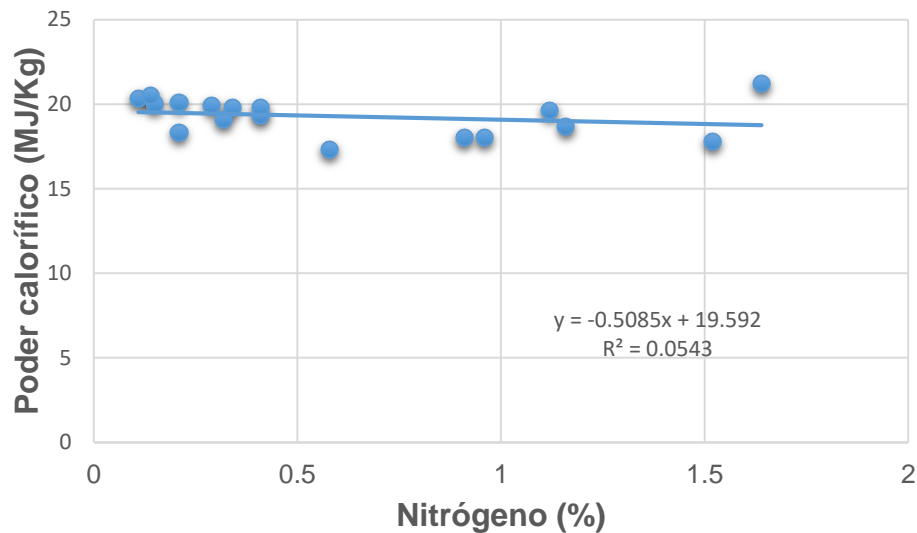


El H contenido en las maderas y cortezas de las siete fabáceas se encuentra en bajas cantidades en comparación con el C (Tabla 6), por lo tanto, como lo han manifestado estudios previos la contribución del H al poder calorífico es menor que la del C (García *et al.*, 2012). En la gráfica 20 de correlación del hidrogeno sobre el poder calorífico, resulto que la contribución del H fue positiva al poder calorífico ( $y = 2.007 * X + 5.4068$ ) y ( $R^2 = 0.2991$ ), además en consistente con otros estudios realizados en distintas fuentes de biomasa (García *et al.*, 2012; Palamanit *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2021).



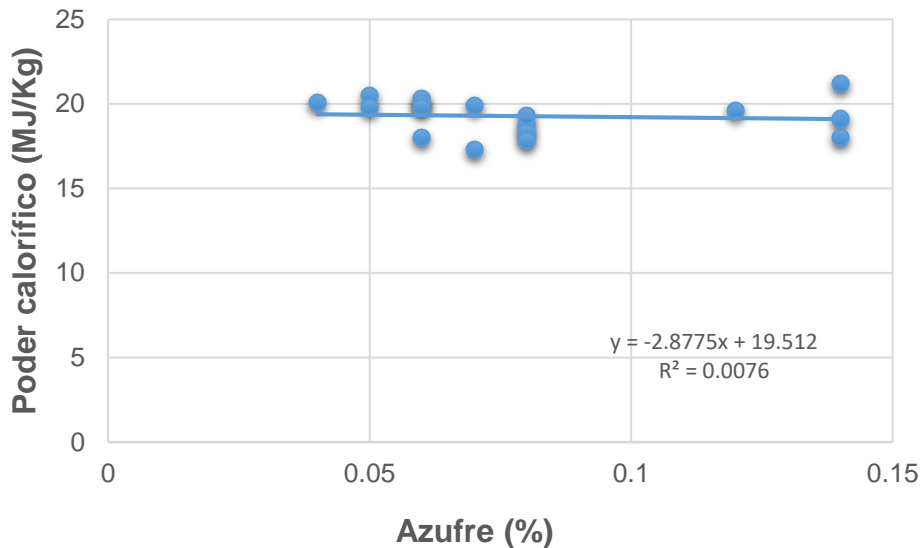
**Figura 20.** Gráfica de correlación entre hidrogeno y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

Durante la combustión el nitrógeno se convierte prácticamente en gas  $N_2$  y óxidos de nitrógeno  $NO_x$  casi en su totalidad, este elemento es el principal causante del impacto ambiental durante la combustión de la biomasa (Oberberger *et al.* 2006; García *et al.*, 2012). Por lo tanto, el porcentaje de N contenido en las cortezas de *A. farnesiana*, *E. polystacya*, *P. aculeate* y *P. leivigata* resulta negativo ya que es comparable con el rango 1.0 a 1.5 % de N contenido en los combustibles fósiles (Demirbaş, 2005). Por otro lado, en la gráfica de correlación del nitrógeno sobre el poder calorífico (Figura 21), resulto que al aumentar el contenido de nitrógeno se afecta negativamente el poder calorífico ( $y = (-0.5085) * X + 19.592$ ) y ( $R^2 = 0.0543$ ). Por otro lado, García *et al.*, (2012) mencionan que la cantidad de  $N_2O$  se puede reducir calderas modernas de biomasa.



**Figura 21.** Gráfica de correlación entre nitrógeno y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

Finalmente, con respecto al análisis elemental, las maderas y las cortezas de las siete Fabaceae (Tabla 6) contienen bajos contenidos de S (<1%), lo cual es favorable ya que este elemento químico puede formar sulfatos que provocan daños a la salud humana y genera incrustación en los equipos de combustión (Oberberger *et al.*, 2006; García *et al.*, 2012). Además, en la figura 22 sobre el análisis de correlación del S sobre el poder calorífico se demuestra que este elemento afecta el poder calórico ( $y = (-2.8775) * X + 19.512$ ) y ( $R^2 = 0.0076$ ).



**Figura 22.** Gráfica de correlación entre azufre y poder calorífico de la madera y corteza de siete especies de fabáceas.

## 7. CONCLUSIONES

En el análisis químico de la madera resultó que las maderas de las siete fabáceas contienen mayor porcentaje de celulosa a comparación de las cortezas, en cuanto a la fracción de las hemicelulosas presentaron la misma tendencia, con respecto a la lignina los valores fueron consistentes con lo reportado en la literatura coincidiendo que la lignina se concentra en mayor cantidad en las cortezas en contraste con las zonas de la madera y las sustancias extraíbles tuvieron la siguiente tendencia de porcentajes cortezas > duramen > albura. Derivado de las gráficas de correlación entre los principales componentes químicos resultó: al aumentar la porción de celulosa y lignina el poder calorífico se favorece, y las hemicelulosas presentaron una tendencia horizontal, mientras que al aumentar la porción de extraíbles el poder calórico es afectado negativamente.

En la evaluación de los análisis proximales; las cenizas se encontraron en mayor cantidad en las cortezas de las siete especies a comparación de sus maderas, comparando estos resultados de cenizas con los estándares internacionales se encontró que solo el duramen *E. polystacya* cumple con los requisitos de comercialización de biocombustibles sólidos, sin embargo, la biomasa de las especies estudiadas en este trabajo, pudieran tener uso local. En relación a la fracción volátil, fue mayor en la madera a comparación de la corteza, por otro lado, en general la corteza contiene mayor contenido de carbono fijo a comparación de la madera de las siete fabáceas. Los resultados de las gráficas de correlación de los análisis proximales sobre el poder calorífico: a mayor cantidad de cenizas el poder calorífico disminuye, en contra parte al aumentar la porción de materia volátil y carbono fijo el poder calorífico se favorece.

En el microanálisis de las cenizas se detectaron veinte elementos y los más abundantes tanto en madera como en corteza de las siete fabáceas fueron el Ca > K > P > Mg > Na.

En el análisis elemental resaltó que zonas del duramen de *A. plurijuga*, *E. polystacya* y *P. laevigata* registraron mayor cantidad de C a comparación de su albura, mientras que la albura contienen mayores cantidades de H, O, N, y S. Las tendencias de correlación entre los análisis elementales sobre el poder calorífico mostraron que a mayor porción de C, O, H en poder calorífico se favorece positivamente, en contraste a mayor concentración de N y S el poder calorífico disminuye.

Las cortezas contienen altas cantidades de cenizas que principalmente están constituidas por Ca y K, además, de un contenido de N comparable con los combustibles fósiles, por lo tanto, esta biomasa pudiera ser limitante como biocombustible sólido, debido a la emisión de partículas finas al ambiente.

Con respecto al poder calorífico las maderas presentaron mayor poder calorífico a comparación de las cortezas, se estima que esta tendencia pudo ser ocasionada por el alto contenido de cenizas en las cortezas.

Finalmente, los resultados obtenidos en la madera y corteza de las siete fabáceas pueden usarse como de biocombustibles sólidos de forma local.

## 8. REFERENCIAS

- Al-Youssef, H. M., y Hassan W. H. B. (2015). Antimicrobial and antioxidant activities of *Parkinsonia aculeata* and chemical composition of their essential oils. Merit Research Journal of Medicine and Medical Sciences 3(4): 147-157.
- Ambriz Ortiz, M. (2019). Estudio fotoquímico y evaluación de la actividad biológica de extractos de madera. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Andrade, M. G., Calderón de Rzedowski, G., Camargo-Ricalde, S. L., Grether, R., Hernández, H. M. Martínez-Bernal, A., Rico, L., Rzedowski, J., y Sousa S., M. (2007). Flora del Bajío y de regiones adyacentes; familia Leguminosae, subfamilia Mimosoidae. Instituto de Ecología A. C. Centro Regional del Bajío, Pátzcuaro, Michoacán, México.
- Ali, L., Ahmed Baloch, K., Palamanit, A., Raza, S. A., Laohaprapanon, S., y Techato, K. (2021). Physicochemical Characterisation and the Prospects of Biofuel Production from Rubberwood Sawdust and Sewage Sludge. Sustainability 13(11): 5942.
- Apolinar Hidalgo, F., Honorato-Salazar, J. A., y Colotl Hernández, G. (2017). Caracterización energética de la madera de *Acacia pennatula* Schltdl. & Cham. y *Trema micrantha* (L.) Blume. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 8 (39): 71-8.
- Aquino, G. D. (2012). Plantas de importancia económica en los desiertos de México. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo. México, México.
- Arcibar-Orozco, J. A., Josue, D. B., Ríos Hurtado, J.C. y Rangel Méndez, J. R. (2014). Influence of iron content, surface area and charge distribution in the arsenic removal by activated carbons. Chemical Engineering Journal 249 (1): 201-209.
- ASTM E872–82 (2013). Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Ávila-Calderón, L. E. A., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2014). Componentes químicos de la madera y la corteza de *Haematoxylum brasiletto* Karsten (Leguminosae). Madera y Bosques 20 (2): 153-158.
- Ayala-Mendivil, N., y Sandoval, G. (2018). Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. Madera y Bosques 24(Núm. esp.): 1-14.
- Barrientos-Ramírez, L., Vargas-Radillo, J. J., Rodríguez-Rivas, A., Ochoa-Ruíz H. G., Navarro-Arzate, F., y Zorrilla, J. (2012). Evaluación de las características del fruto de huizache (*Acacia farnesiana* (L.) Willd.) para su posible uso en curtiduría o alimentación animal. Madera y Bosques 18(3): 23-35.

Bravo Espinoza, M., F. García Oliva, E. Ríos Patrón, M. Mendoza Cantú, G. Barrera Camacho y Granados López E. (2008), La cuenca del lago de Cuitzeo: problemática, perspectiva y retos hacia el desarrollo sostenible, Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán, México [[http://www.ciga.unam.mx/ciga/imagenes/stories/publicaciones/folleto\\_lago\\_cuitzeo.pdf](http://www.ciga.unam.mx/ciga/imagenes/stories/publicaciones/folleto_lago_cuitzeo.pdf)], [Consultado 08 de diciembre 2020].

Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. A., Corral-Rivas, J. J., y Hernández Díaz, J. C. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7 (38): 5-24.

Calderón de Rzedowski G., y Rzedowski, J. (2001). Flora fanerogámica del Valle de México, Segunda edición, Co-edición entre el Instituto de Ecología, A.C. y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Cárdenas-Gutiérrez, M.A., Pedraza- Bucio, F.E., López- Albarrán, P., Rutiaga- Quiñones, J.G. (2018) Chemical Components of the Branches of Six Hardwood Species. *Wood Research* 63(5): 795-862.

Carrillo, A., Mayer, I., Koch, G., y Hapla, F. (2008). Wood anatomical characteristics and chemical composition of *Prosopis laevigata* grown in the Northeast of Mexico. *IAWA Journal* 29(1): 25-34.

Carrillo Parra, A., Ngangyo Heya, Maginot., Colín-Urieta, S., Foroughbakhch Pournavab, R., Rutiaga Quiñones, J. G. y Correa-Méndez, F. (2018). Physical, mechanical and energy characterization of wood pellets obtained from three common tropical species. *Peer Journal* 6: e5504.

Daza Bareño, A. Z. (2014). Estudio fitoquímico de la corteza de *Acacia farnesiana* utilizada tradicionalmente para el tratamiento de la malaria. Tesis de Magister en Ciencias Farmacéuticas. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Farmacia, Bogotá, Colombia.

De la Cruz Montelongo, C., Herrera Gamboa, J., Ortiz Sánchez, I. A., Ríos Saucedo J. C., Rosales Serna, R., y Carrillo-Parra, A. (2020). Caracterización energética del carbón vegetal producido en el Norte-Centro de México. *Madera y Bosques* 26(2): e2621971.

Demirbaş, A., y Demirbaş, A. H. (2004). Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. *Energy Exploration & Exploitation* 22(2): 135-143.

Demirbaş, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science* 31(2): 171-192

Estrada, E., C. Yen, A. Delgado y J. Villarreal. (2004). Leguminosas del centro del estado de Nuevo León, México. *Anales del Instituto de Biología, Serie Botánica*. Universidad Nacional Autónoma de México 75: 73-85.

Fengel, D., y Wegener, G. (1984) Wood chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter, Berlin, 613 pp.

Forero-Nuñez, C. A, Jochum, J., y Sierra, F. E. (2015). Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets. *Ingeniería e Investigación* 35(1): 17–23.

García, M. (2008). Carbón de encino: fuente de calor y energía. *CONABIO. Biodiversitas* 77: 7–9.

García Ruiz, I., y Linares Linares, A. (2012). Árboles y arbustos de la cuenca de río Tepalcatepec (Michoacán y Jalisco, México) para uso urbano. Ave editorial. México.

García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., and Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology* 103(1): 249-258.

Ghetti, P., Ricca, L., y Angelini, L. (1996). Thermal analysis of biomass and corresponding pyrolysis products. *Fuel* 75(5): 565-573.

Gutiérrez-Acosta, J. M., Orihuela-Equihua, R., Pintor-Ibarra, L. F., González-Ortega, N., Hernández-Solís, J. J., Ruíz-Aquino, F., Navarrete-García, M. A., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). On the basic chemical composition of selected biomass types from four regions of Mexico, for bioenergetic purposes. *BioResources* 16(3): 5694-5705.

Han, J. S., y Rowel, J. S. (1996). Chemical composition of fibers. In: Rowell R. M. Young, R. A. Rowel, J. (es) Paper and composites from agrobased resources. CRC. London.

Herrera-Fernández, A. C., Carrillo-Parra, A., Pedraza-Bucio, F. E., Correa-Méndez, F., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2017). Densidad, composición química y poder calorífico de la madera de tres especies de encino (*Quercus candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*). *Ciencia Nicolaita* 72: 136-154.

Holt, G. A., Blodgett, T. L., y Nakayama, F. S. (2006). Physical and combustion characteristics of pellet fuel from cotton gin by-products produced by select processing treatments. *Industrial Crops and Products* 24: 204–213.

Hillis, W. E. (1971). Distribution properties and formation of some wood extractives. *Wood Science Technology* 5: 272-289.

ISO 17225-2 (2014). Solid biofuels-Fuel specifications and classes, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Kataki, Ra, y Konwer, D. (2002). Fuel wood characteristics of indigenous tree species of northeast India. *Biomass and Bioenergy* 22(6): 433–437.

Kollmann, F. (1959). Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones. Ministerio de Agricultura. Instituto Forestal de Investigaciones y experiencias, Madrid.

Macdonald, R.G., y Franklin, J.N., (1969). The pulping of wood, McGraw-Hill, New York, USA, pp. 34-35.

Martínez-Pérez, R., Pedraza-Bucio, F. E., Apolinar-Cortes, J., López-Miranda, J., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2012). Poder calorífico y material inorgánico en la corteza de seis árboles frutales. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente 18(3): 375-384.

Martínez Pérez, R., Pedraza Bucio, F. E., Orihuela Equihua, R., López Albarrán, P., Rutiaga Quiñones, J. G., (2015). Calorific value and inorganic material of ten Mexican wood species. Wood Research 60(2): 281-292.

Mata González S. (2015). Evaluación de la actividad antimicrobiana de los extractos de *Erythrina americana* Miller y *Erythrina coralloides* DC. (*Fabaceae*). Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México. Los Reyes Iztacala, Edo. De México. México.

Maza-Villalobos S, Macedo-Santana F, Rodríguez-Velázquez J, Oyama K, y Martínez-Ramos M. (2014). Variación de la estructura y composición de comunidades de árboles y arbustos entre tipos de vegetación en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Botanical Sciences 92(2): 243-258.

Morales-Máximo, M., Ruíz-García, V. M., López-Sosa L. B. y Rutiaga-Quiñones J. G. (2020). Exploitation of wood waste of *Pinus* spp for briquette production: a case study in the community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. Applied Sciences 8(10): 1-20.

Moya, R., y Tenorio, C. (2013). Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. Biomass and Bioenergy 56: 14-21.

Miller, R. B. (1999). Structure of wood, chapter 2. In: Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory. Department of Agriculture. Madison, WI. USA. pp 463.

Musule, R., Alarcón-Gutiérrez, E., Houbron, E. P., Bárcenas-Pazos, G. M., del Rosario Pineda-López, M., Domínguez, Z., Sánchez-Velásquez, L. R. (2016). Chemical composition of lignocellulosic biomass in the wood of *Abies religiosa* across an altitudinal gradient. Journal of Wood Science 62: 537–547.

Naturalista (2021). *Acacia pennatula* (Schl. et Cham) Benth. Consultada 13 noviembre 2021, en: [https://www.naturalista.mx/taxa/273948-Acacia-pennatula#cite\\_note-Trop-1](https://www.naturalista.mx/taxa/273948-Acacia-pennatula#cite_note-Trop-1).

Ngangyo-Heya, M., Foroughbahchk-Pournavab, R., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Volker Zelinski, Pintor-Ibarra, L. F. (2016). Calorific value and chemical composition of five Semi-Arid Mexican tree species, *Forests* 7(58): 1-12.

Obernberger, I., y Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy* 27(6): 653–669.

Obernberger, I., y Thek, G. (2006). Recent developments concerning pellet combustion technologies- a review of Austrian developments. In: Proc. of the 2nd world conference on pellets, May/June 2006, Jönköping, Sweden. Swedish Bioenergy Association (Ed), 47–56.

Obernberger, I., Brunner, T., y Bärnthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. *Biomass Bioenergy* 30(11): 973-982.

Obernberger, I., y Thek, G. (2010). *The pellet handbook* (1st ed.). London-Washington DC: Earthscan.

ÖNORM M 7135 (2000). Compressed wood or compressed bark in natural state-pellets and briquettes, requirements and test specifications. Vienna, Austria: Österreichisches Normungsinstitut.

Palamanit, A., Khongphakdi, P., Tirawanichakul, Y., y Phusunti, N. (2019). Investigation of yields and qualities of pyrolysis products obtained from oil palm biomass using an agitated bed pyrolysis reactor. *Biofuel Research Journal* 24: 1065–1079.

Pennington, T. D. y Sarukhán, K. J. (2012). *Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies*. Universidad Nacional Autónoma de México y Fondo de Cultura Económica. México.

Pérez-Gutiérrez, R. M., García-Campoy, A. H., Muñiz-Ramírez A. (2016). Properties of flavonoids isolated from the bark of *Eysenhardtia polystachya* and their effect on oxidative stress in streptozotocin-induced diabetes mellitus in mice. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 915651.

Pettersen, R. C. (1984). The chemical wood. In: Rowell, R. M., ed. *The chemistry of solid wood*. Advances in chemistry series 207. Washington, DC. USA, American Chemical Society, chapter 2.

Pintor-Ibarra, L. F., Carrillo-Parra, A., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2017). Physical and chemical properties of timber by-products from *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* and *P. pseudostrabus* for a bioenergetic use, *Wood Research* 62(6): 849-861.

Ramos-Pantaleón, D., Ávila-Calderón, L. E. A., Ochoa-Ruíz, H. G., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2011). Contenido de sustancias extraíbles en la madera de



- Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. (Leguminosae). *Ciencia Nicolaita* 53: 7-19.
- Ramírez-Marcial, N. Camacho-Cruz, A.; Martínez, I. M. Luna, G. A. Golicher, D. J. y González-Espinosa, M. (2010). Árboles y arbustos de los bosques de montaña en Chiapas. El Colegio de la Frontera Sur. Chiapas, México.
- Ramírez-Casillas, R., López-López, M. C., Becerra-Aguilar, B., Dávalos-Olivares, F., and Satyanarayana, K. G. (2019). Obtaining dissolving grade cellulose from the huizache (*Acacia farnesiana* L. Willd.) plant. *BioResources* 14(2): 3301-3318.
- Rendón Correa, A., Dorantes Hernández, F., Mejía Valencia, S., y Alamilla Fonseca, L. N. (2021). Características macroscópicas, propiedades y usos de la madera de especies nativas y exóticas de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Tlalpan, Ciudad de México.
- Rico Arce, M. L., Gale, S. L. Maxted, N. A. (2008). Taxonomic study of *Albizia* (Leguminosae: Mimosoideae: Ingeae) in México and Central América. *Anales del Jardín Botánico de Madrid* 65 (2): 255-305.
- Rotz, L.; Giuzzi, G. (2012). Characterization of Pharmaceutical Products by the Thermo Scientific FLASH 2000 Elemental Analyzer; Thermo Fischer Scientific: Milan, Italy.
- Rowell, R. (2005). Handbook of wood chemistry and wood composites. Taylor & Francis. Boca Raton. 473 p.
- Rutiaga-Quiñones J. G., Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Avila, N., Carrillo-Parra, A., Navarrete-García, M. A., Ruiz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J. R., Hernández-Solís, J. J., y Luján-Álvarez, C. (2020). Characterization of Mexican waste biomass relative to energy generation. *BioResources* 15(4): 8529-8553.
- Ruiz-Aquino, F., Ruiz-Ángel, S., Feria-Reyes, R., Santiago-García, W., Suárez-Mota, M. E., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2019). Wood Chemical Composition of Five Tree Species from Oaxaca, Mexico. *BioResources* 14(4), 9826-9839.
- Ruiz-Aquino, F., Luna Bautista, L., Luna Bautista, A. E., Santiago-García, W., Pintor-Ibarra, L. F., y Rutiaga-Quiñones, J. G. (2020). Anatomical Characterization, Physical, and Chemical Properties of Wood of *Quercus macdougalii* Martínez, Endemic Species of the Sierra Juárez of Oaxaca, Mexico. *BioResources* 15(3): 5975-5998.
- Sánchez-Blanco, J., y Guevara-Féfer, F. (2013). Plantas arvenses asociadas a cultivos de maíz de temporal en suelos salinos de la ribera del Lago de Cuitzeo, Michoacán. *Acta Botánica Mexicana* 105: 107-129.
- Sánchez-Martínez, O. (2021). Componentes químicos de la madera de *Trema micrantha* L. Blume y su relación con las propiedades energéticas. Tesis de

Licenciatura de Ingeniería Forestal. Universidad de la Sierra Juárez, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.

Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF). (2017). *Acacia farnesiana* (L.) Willd. Consultada 13 noviembre 2021, en: <http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/usos/fichas-snif>. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). México.

Sjöström, E. (1981). *Wood Chemistry: Fundamentals and applications*. London, UK, Academic Press, Inc

Sousa S., M. y A. Delgado S. (1993). Mexican Leguminosae: phytogeography, endemism, and origins. In: T.P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (eds.). *Biological diversity of Mexico: origins and distribution*. Oxford University Press, New York, pp. 459-511.

Tauro, R., García, C. A., Skutsch, M., y Masera, O. (2018). The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82(1): 380–389.

Tenorio, C., Moya, R., Tomazello-Filho, M., y Valaert, J. (2015). Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in Costa Rican tropical climates. *BioResources* 10(1): 482–498.

Téllez-Sánchez, C., Ochoa-Ruiz, H. G., Sanjuan-Dueñas, R., y Rutiaga Quiñones J. G. (2010). Componentes químicos del duramen de *Andira inermis* (W. Wright) DC. (*Leguminosae*). *Revista Chapingo Ciencias Forestales y del Ambiente* 16(1): 87-93.

Telmo, C., Luosada, K., y Moreira, N. (2010). Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. *Bioresource Technology* 101 (11): 3808-3815.

Tumuluru, J. S, Sokhansanj, S., Lim, C. J., Bi, T., Lau, A., Melin, S., Oveisi, E. (2010). Quality of wood pellets produced in British Columbia for export. In: *In Annual Meeting asPaper No 9, 7265*. Paris, France.

UNE-EN 14775. (2010). Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas. AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos CONFEMADERA, AENOR, Grupo 9, Madrid, España, Sept. 2010, 10 p.

UNE-EN 14918. (2011). Determinación del Poder Calorífico; UNE-EN 14918:2011; Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): Madrid, España.

UNE-EN 14961-1 (2011). Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: requisitos generales. AENOR, Madrid, España.

Uceda Castillo, M. E. (1984). Determinación del poder calorífico de 20 especies forestales del Amazonía Peruana. *Revista Forestal del Perú* 12(1-2): 1-15.

Van Lith, S. C., Alonso, V., Jensen, P. A., Frandsen, F. J., y Glarborg, P. (2006). Release to the gas phase of inorganic elements during wood combustion. Part 1: Development and evaluation of quantification methods. *Energy & Fuels* 20(3): 964–978.

Varfolomeev, M. A., Grachev, A. N., Makarov, A. A., Zabelkin, S. A., Emel'yanenko, V. N., Musin, T. R., Gerasimov, A. V., y Nurgaliev, D. K. (2015). Thermal analysis and calorimetric study of the combustion of hydrolytic wood lignin and products of its pyrolysis. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 51(1): 140-145.

Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L. K., y Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 89(5), 913-933.

Werkelin, J., Lindberg, D., Boström, D., Skrifvars, B. J., y Hupa, M. (2011). Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples. *Biomass and Bioenergy* 35(1): 725–733.

Yang, G., y Jaakkola, P. (2011). Wood chemistry and isolation of extractives from wood – Literature study for BIOTULI project. Lappeenranta: Saimaa University of Applied Sciences.

## 9. ANEXOS

### 9.1. Anexo 1

Nombre científico: ***Acacia farnesiana* (L.) Willd.**

Nombre común: huizache



**Figura 23.** Árbol de *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (SNIF, 2017).

#### 9.1.1. Descripción técnica (Basada en Calderón y Rzedowski, 2001)

Hábito y forma de vida: arbusto o arbolito.

Tamaño: de 2 a 5 m de altura.

Tallo: tronco muy ramificado con las últimas ramillas pubescentes en la juventud; estípulas en forma de espinas de color blanquecino.

Lenticelas: abundantes, conspicuas, pequeñas y suberificadas, dispuestas en líneas transversales (Pennington y Sarukhán, 2012; SNIF, 2017; Rendón *et al.*, 2021).

Hojas: de 2 a 6 cm de largo, pecíolo corto, con 2 a 6 pares de pinnas, cada una con 10 a 25 pares de folíolos lineares, de 3 a 6 mm de largo por 1 mm de ancho, ápice agudo u obtuso, margen entero, base obtusa.

Inflorescencia: cabezuelas de  $\pm 1$  cm de diámetro, solitarias o fasciculadas, pedúnculos de 1 a 3 cm de largo.

Flores: sésiles, reunidas en cabezuelas; cáliz en forma de embudo, pubescente hacia el ápice; corola tubular, de 2 a 2.5 mm de largo, amarilla.

Frutos y semillas: el fruto es una legumbre cilíndrica, verde al principio y negra después, sin pelos, de 4 a 8 cm de largo por  $\pm 1$  cm de diámetro, con el ápice agudo.

Características especiales: huele a miel cuando florece.

### 9.1.2. Distribución

Aguascalientes, Baja California, Baja California Sur, Campeche, Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Colima, Durango, Estado de México, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán (Rendón *et al.*, 2021).

### 9.1.3. Usos

En construcción rural, postes, cercas, muebles y finas incrustaciones para muebles, fabricación de paraguas, construcción de barcos, marcos finos, mangos para herramientas (serrotes, formones, entre otros), instrumentos e implementos agrícolas (yugos), ejes de ruedas, utensilios domésticos en general, horcones, trapiches, cajas para empaque, carpintería en general, en aserrío, parquet y para elaborar artículos torneados artesanales. Usos potenciales: se recomienda para parquet (Aquino, 2012; SNIF, 2017; Rendón *et al.*, 2021).

## 9.2. Anexo 2

Nombre científico: ***Acacia pennatula* (Schl. et Cham) Benth.**

Nombre común: tepame



**Figura 24.** Árbol de *Acacia pennatula* (Schl. et Cham) Benth.

### 9.2.1. Descripción técnica (basada en Naturalista, 2021 y Rendón *et al.*, 2021)

Son árboles que alcanzan un tamaño de hasta 8 m de alto, muy ramificados en la copa, tallos hispídulos, ramas en general densamente velutinas.

Hojas (9.5–) 11.5–15 (–20) cm de largo, pinnas 25–30 (–40) pares, 2–3 (–4.5) cm de largo; folíolos 30–50 pares por pinna, linear oblongos a angostamente oblongos, 1–2 mm de largo y 0.5–1.5 mm de ancho, ápice agudo, base truncada, inserción marginal, generalmente estrigulosos, sólo el nervio central es evidente; raquis 4–9.2 (15) cm de largo, con una glándula entre los últimos pares de pinnas, pecíolos 1.5–2.5 cm de largo, densamente pubescentes, con una glándula circular cerca de la base, estípulas espinescentes, hasta 10 mm de largo, persistentes.

Las inflorescencias en fascículos comúnmente de 3 capítulos sobre un eje principal de hasta 10 cm de largo, capítulos 6 mm de diámetro, pedúnculos 1.2–3 cm de largo, estrigulosos o amarillo-velutinos, basalmente con 5 brácteas involucrales, bráctea floral clavada, ca 1.3 mm de largo, pubescente, flores amarillas; cáliz campanulado, 1.3–1.5 (–1.8) mm de largo, 5 o 6-lobado en 1/5 de su longitud, más densamente pubescente hacia el ápice; corola tubular, 2–2.5 mm de largo, 5 o 6-lobada en 1/4 de su longitud, lobos pubescentes; anteras con una glándula sésil; ovario 1 mm de largo, estriguloso en el ápice, sésil o subsésil; nectario ausente.

Fruto túrgido, recto o ligeramente curvo, hasta 12.5 cm de largo, 1.7–2.5 cm de ancho y 6–10 mm de grueso, ápice y base redondeados, indehiscente, valvas leñosas, café oscuras, septadas entre las semillas, sésil; semillas ampliamente elípticas, 7 mm de largo, 4–4.5 mm de ancho y 3–4 mm de grueso, café-amarillentas.

### 9.2.2. Distribución

Aguascalientes, Campeche, Chiapas, Chihuahua, Colima, Durango, Estado de México, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz, Yucatán y Zacatecas (Rendón *et al.*, 2021).

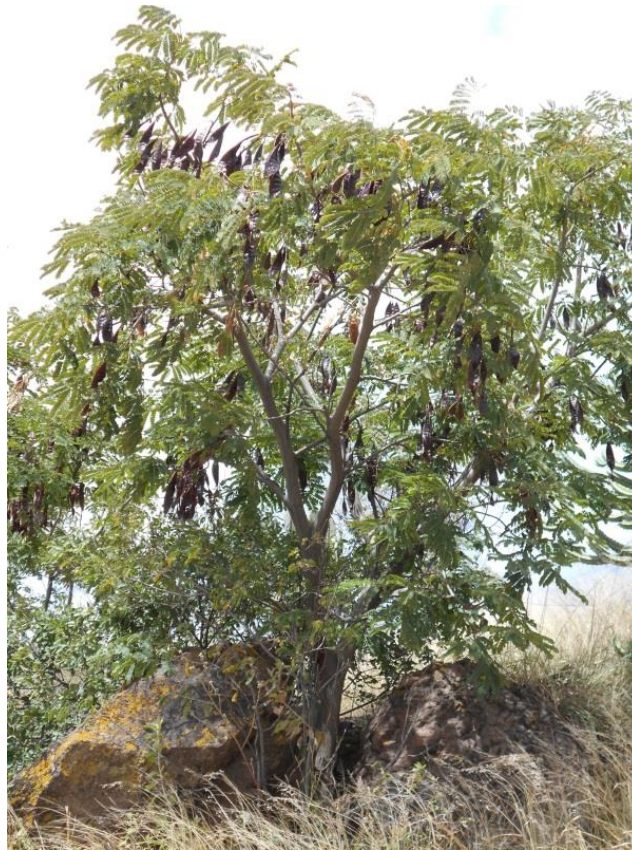
### 9.2.3. Usos

Para postes de cercados (como en potreros), en la construcción rural (horcones) o construcción en general, instrumentos, mangos de herramientas y postes; es resistente (Ramírez-Marcial *et al.*, 2010; Rendón *et al.*, 2021).

### 9.3. Anexo 3

Nombre científico: ***Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose**

Nombres comunes: palo blanco, parotilla, frijolillo, tepehuaje blanco.



**Figura 25.** Árbol de *Albizia plurijuga* (Standl.) Britton & Rose.

#### 9.3.1. Descripción técnica (basada en Andrade *et al.*, 2007; Rico Arce *et al.*, 2008)

Árbol hasta de 20(30) m de alto, caducifolio; tronco con corteza lisa o algo rugosa, gris clara, ramillas cafés, densamente pubérulas en la juventud, glabras, con numerosas lenticelas de coloración clara; hojas obovadas en contorno general, hasta de 45 cm de largo y 25 cm de ancho, estípulas deltoides, a menudo cordadas en la base, de 1 a 2 mm de largo y de ancho, pronto caedizas, peciolo hasta de 13 cm de largo, provisto de una glándula crateriforme, sésil, escasamente prominente, circular a elíptica u oblonga, hasta de 2 mm de largo, por lo general cercana a la base, raquis comúnmente provisto de una glándula circular cerca de la inserción del último par de pinnas, éstas (2)3 a 6 pares, cada una llevando (3)4 a 9(10) pares de folíolos subsésiles, oblongos a elípticos u obovados, de (1)2 a 6 cm de largo, de (0.6)0.8 a 1.5(3) cm de ancho, frecuentemente algo falcados, agudos a truncados y a menudo finamente apiculados en el ápice, oblicuos en la base, densamente cinéreo-pubescentes en la temprana juventud, verdes oscuros y glabros casi desde el principio en el haz, más pálidos y comúnmente pilósulos al menos a lo largo de las nervaduras en el envés; flores todas similares, sésiles, agrupadas en número de



10 a 35 en capítulos esféricos de 2 a 4.5 cm de diámetro, éstos sobre pedúnculos hasta de 5 cm de largo, que nacen solitarios o fascículo 64 dos en ramillas desprovistas de follaje o en las axilas de las hojas que apenas van surgiendo, bractéolas oblongas, de 1 mm de largo, efímeras; cáliz campanulado, de 1 a 3.5 mm de largo, 5-dentado en el ápice, corolino, glabro; corola tubular a angostamente turbinada, de 5 a 10 mm de largo, blanca o blanquecina, glabra, 5-lobada, los lóbulos de 1 a 3 mm de largo; tubo estaminal del largo aproximado de la corola, estambres 50 a 80, filamentos libres, de 5 a 15 mm de largo, anteras de 0.2 mm de diámetro; ovario glabro, estilo un poco más largo que los estambres; fruto por lo general solitario, sobre un pedúnculo de 3 a 4 cm de largo y estípite sólido hasta de 4 cm de largo, el cuerpo linear-oblongo, de (10)20 a 25(30) cm de largo, de 2 a 4.5(5.5) cm de ancho, de 2 a 3 mm de grosor, atenuado hacia ambos extremos, de color por lo general pajizo, a menudo morado antes de la madurez, con márgenes notablemente engrosados, indehiscente o tardíamente dehiscente, glabro; semillas (5)8 a 13, suborbiculares a elípticas, de 0.8 a 1.3 cm de largo, cafés, algo lustrosas.

### 9.3.2. Distribución

En el centro de México (Nayarit a través de Oaxaca) hasta Chiapas, especie aparentemente endémica de México de los bosques tropicales caducifolios. En la actualidad se ha encontrado mayormente en matorrales secundarios, la cantidad de individuos no es grande y la repoblación es escasa. Altitud de 1600-2300 msnm. Se le ha observado en Guanajuato, Querétaro y Michoacán (Rico Arce *et al.*, 2008).

### 9.3.3. Usos:

Según habitantes de la Cuenca del Lago de Cuitzeo la madera de *A. plurijuga* se utiliza de forma local como leña para la cocción de alimentos, poses para delimitar terrenos de cultivo, como árbol de ornato y actualmente se está utilizando ampliamente en la reforestación por su rápido crecimiento.

## 9.4. Anexo 4

Nombre científico: *Erythrina coralloides* DC.

Nombres comunes: chocolín, phorenseni (purhépecha), puregue, purenchecua, parencsuni, quimite, zumpantle.



**Figura 26.** Árbol de *Erythrina coralloides* DC. (García y Linares, 2012).

### 9.4.1. Descripción técnica (basada en García y Linares, 2012)

Árbol espinoso de 6 a 7 m de alto, tronco robusto y sinuoso de hasta 30 a 40 cm de diámetro; la copa es mediana de 8 m de diámetro, poco densa, sobre todo cuando se defolia y se cubre de flores. Corteza de color verde amarillento a grisácea; ramas con algunas espinas. Hojas arregladas en espiral, compuestas de tres folíolos casi triangulares, las terminales son deltoides a suborbiculares, más ancha que larga de 8.5 (11.5) cm de larga. Inflorescencia con flores rojas escarlata brillante, estandarte de 3.2 a 6.8 cm de largo, pétalos quillados más largos que las alas, con pequeños pelillos en su exterior, agrupadas en racimillos (inflorescencias) de forma piramidal. Los frutos son vainas alargadas color café, de 12 a 24 cm de largo y de 1.4 a 2 cm de ancho, semillas rojo brillantes a escarlata, de 13 a 16 mm de largo.

#### 9.4.2. Distribución

Desde Tamaulipas, San Luis Potosí, Nuevo León, Hidalgo, Guanajuato, Michoacán, México, Distrito Federal, Veracruz, Puebla a Oaxaca, y tal vez en Morelos y Guerrero. Se encuentra en casi todos los climas de la cuenca; crece en el bosque tropical subcaducifolio (selvas medianas subcaducifolias), bosques de *Quercus* (encinares) y en asociaciones vegetales derivadas de éstas, también en zonas inundables. Desde el nivel del mar hasta 3000 m de altitud, en zonas húmedas y áridas; tolera todo tipo de suelos, aun los pesados o pobres en nutrientes. Su presencia puede favorecerse en drenaje con suelos muy húmedos. Esta especie es frecuentemente confundida con *E. americana* que crece en partes más bajas (García y Linares, 2012).

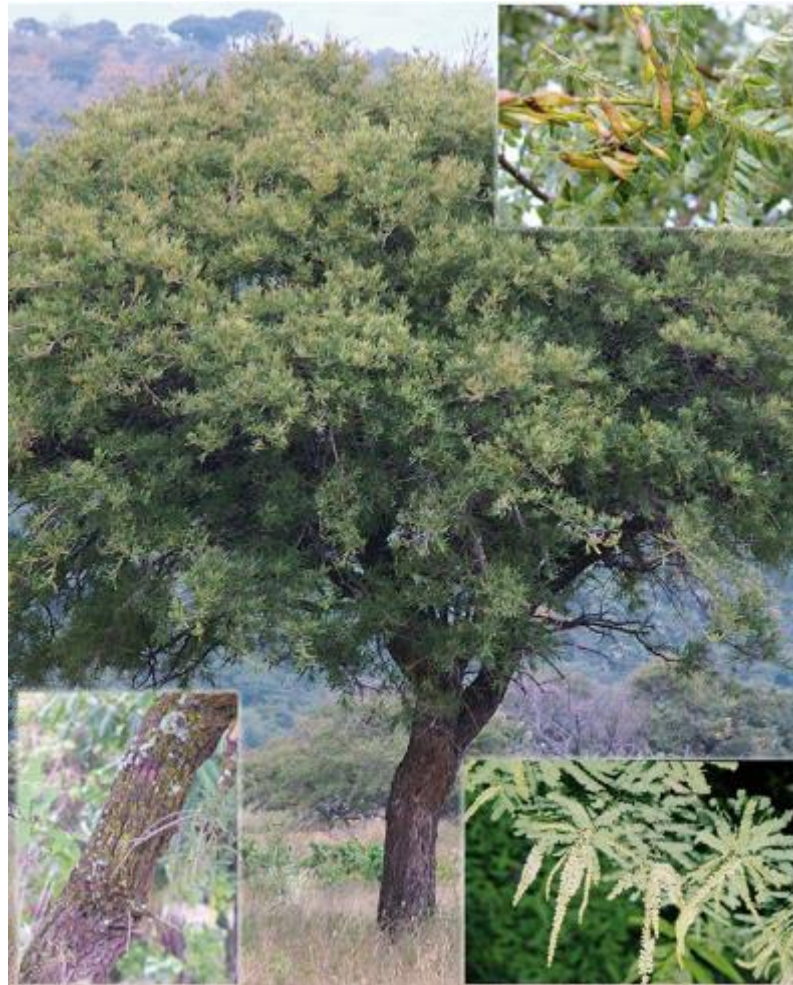
#### 9.4.3. Usos

En otras regiones del país se usa frecuentemente como planta de sombra y ornato, por la belleza de sus flores. En muchos lugares, se establecen estos árboles como “cerca viva” en potreros debido a la propagación vegetativa. Otras personas consumen sus flores inmaduras hervidas, como complemento alimenticio. Las semillas y la corteza tienen propiedades venenosas; las primeras contienen un alcaloide llamado *erithrocoraloidina* que paraliza los nervios de quien la ingiere. La madera, aunque es blanda, puede ser un sustituto del corcho, que actualmente es muy escaso. Esta especie tiene mucho potencial para investigación científica y tecnológica, lo mismo que para fines ornamentales, por la belleza de sus flores y tronco (García y Linares, 2012)

## 9.5. Anexo 5

Nombre científico: *Eysenhardtia polystacya* (Ortega) Sarg.

Nombres comunes: palo dulce, varaduz, cuate, palo cuate, vara dulce, coatl, cohuatli.



**Figura 27.** Árbol de *Eysenhardtia polystacya* (Ortega) Sarg. (García y Linares, 2012.)

### 9.5.1. Descripción técnica (basada en García y Linares, 2012)

Arbusto o árbol bajo hasta de 5 m de altura y tallo de 10 a 15 (20) cm de diámetro; copa de forma irregular un tanto transparente, llega a medir 4 m de diámetro, tronco ramificado desde su base, en algunos casos tiene tronco principal. Corteza externa escamosa o en placas irregulares de color grisáceo o café oscuro. Hojas alternas, imparipinnadas, de 6 a 9 cm de largo incluyendo el pecíolo, compuestas por 13 a 39 folíolos, de 5 a 15 mm de largo y 1.5 a 6 mm de ancho, opuestos o alternos, pecíolo de 1 mm, oblongos u ovales, margen entero, ápice truncado, base redondeada a truncada; verde oscuros en el haz y verde pálidos en el envés, ambas superficies pubescentes al igual que el raquis; la lámina muestra frecuentemente, y de manera conspicua, unos puntos negros finos glandulares. Inflorescencias dispuestas en racimos de 5 a 6 cm de longitud, aromáticas, flores con pétalos

blancos de 5 a 7 mm de longitud. Fruto, sámaras de 10 a 15 mm de largo por 3 a 5 mm de ancho, glabros, con una semilla.

### 9.5.2. Distribución

Porción central del país. De Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Nayarit hasta Oaxaca y Veracruz. Es una especie de amplia distribución en la parte media de la cuenca, principalmente en lugares perturbados, así como en terrenos pedregosos y de suelo somero. Se encuentra en el bosque tropical caducifolio y en el bosque de encino y pino-encino, en altitudes de 800 a 1 900 msnm. Se ha registrado en localidades de al menos 10 municipios de la cuenca, que se ubican en esa franja altimétrica (García y Linares, 2012).

### 9.5.3. Usos

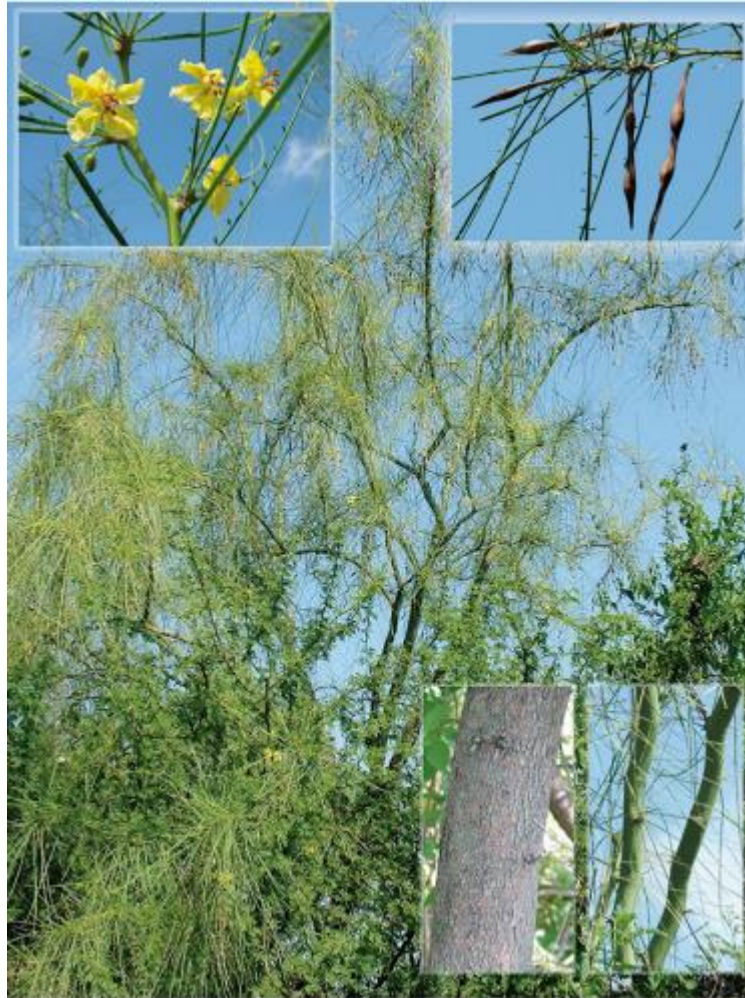
Por su porte, por su rusticidad y por la belleza de sus flores, puede ser una especie muy útil para ambientes urbanos, donde los espacios son reducidos. Es posible que este árbol, en ambiente de cultivo, donde tenga condiciones de humedad del suelo más estable, reduzca significativamente su periodo de defoliación. En cuanto a su uso tradicional y potencial. Estas plantas son muy apreciadas por los campesinos. Rara vez los talan o los queman; son valiosos como postes de cerco o para elaborar puertas de golpe, ya que su madera es durable a la intemperie. También las flores son excelentes productoras de miel. Farmacológicamente se usa como diurético, cura enfermedades renales y de la vesícula. La madera puede ser muy útil en artesanías, y como planta ornamental tiene un futuro promisorio en espacios pequeños (García y Linares, 2012).

Transformación: por su dureza es difícil de trabajar con herramientas de mano y maquinaria, es de buen cepillado y permite buen acabado, un alto brillo natural, excelente comportamiento al escopleado y moldurado, bueno para el barrenado, algo difícil de encolar, para el clavado y atornillado requiere perforación previa, por su alta densidad y bloqueo de los vasos, se espera que el tiempo de secado al aire libre sea lento, es flexible, debido a su buena estabilidad dimensional no se esperan grandes defectos de secado. Usos actuales: es dura y algo flexible, se emplea para elaborar muebles regionales (equipales), en la elaboración de artesanías, postes, mangos para herramientas, copas y vasijas, con las ramas se hacen huacales. Usos potenciales: por su bella apariencia podría ser usada para las caras de vista de madera terciada, cocinas integrales, fabricación de chapas para los centros de madera terciada, chapas decorativas rebanadas, cajas, embalajes, mobiliario, decoración de interiores, palillos, cajas para instrumentos científicos, puertas, ventanas, parquet, marcos, en ebanistería y carpintería en general, de acuerdo a las características de las fibras se recomienda para la preparación de pasta de papel de buena calidad o productos celulósico (Rendón *et al.*, 2021).

## 9.6. Anexo 6

Nombre científico: *Pakinsonia aculeate* L.

Nombres comunes: palo verde, retama, junco.



**Figura 28.** Árbol de *Pakinsonia aculeate* L. (García y Linares, 2012).

### 9.6.1. Descripción técnica (basada en García y Linares, 2012)

Árbol o arbusto hasta de 10 m de altura y tallo de 15 a 20 cm de diámetro; copa muy irregular poco densa, con un diámetro de 5 m. Corteza externa lisa de color verde en árboles jóvenes, y escamosa de color café oscuro en árboles adultos. Hojas constituidas por dos pares de pinnas, subsésiles; las pinnas poseen de 25 a 50 pares de folíolos dispuestos en forma alterna, pero generalmente estos últimos caen, por lo que los raquis ensanchados, de 20 a 30 cm de largo, efectúan la fotosíntesis; se presentan 3 espinas en la axila de cada una de las ramillas. Inflorescencias en racimos hasta de 20 cm de largo, flores vistosas de pétalos amarillos. Fruto, vaina de 5 a 15 cm de largo, constrictas entre las semillas, son de 3 a 7.

### 9.6.2. Distribución

El sur de Estados Unidos de América; en México, en ambas vertientes, desde Baja California, y Sonora a Oaxaca en la del Pacífico, y de Tamaulipas y San Luis Potosí a Veracruz, en la del Golfo; Centroamérica y las Antillas. Se observa constituido como maleza en la orilla de los caminos, lugares húmedos, regiones salinas. Es un componente importante del bosque tropical espinoso. Se le encuentra en forma abundante en la parte más cálida y seca de la cuenca, en los municipios de La Huacana y Apatzingán, Buenavista, Parácuaro y Múgica, Michoacán, en altitudes de 300 a 1000 msnm (García y Linares, 2012).

### 9.6.3. Usos

Pocas veces se ha empleado en ámbitos urbanos, pero por su porte y lo colorido de su follaje (aun defoliado) es una planta con buenos atributos paisajísticos, que se puede emplear en lugares reducidos, desde banquetas anchas, camellones de 3 m de ancho, pero sobre todo en lugares con poco acceso al agua. Uso tradicional y potencial. En el medio rural presenta varios usos: como ornamental, en patios de casa; como combustible; como poste, en construcciones rústicas. Puede utilizarse para la fabricación de pulpa para papel. El principal uso recomendado es como planta de ornato en medios urbanos y rurales, en proyectos de restauración de zonas degradadas por el sobrepastoreo y la pérdida de fertilidad, ya que incorpora nitrógeno al suelo, fácil de trabajar, con buen acabado (García y Linares, 2012: Rendón *et al.*, 2021).

## 9.7. Anexo 7

Nombre científico: *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) Jonhst.

Nombres comunes: mezquite, chúcata, tziritzecua (purhépecha), algarrobo.



**Figura 29.** Árbol de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl.) Jonhst.

### 9.7.1. Descripción técnica (basada en García y Linares, 2012)

Árbol de 5 a 10 m de alto y diámetro de hasta 50 cm, pero generalmente menor, con el tronco recto y corto; copa dispersa semidensa, irregular, que puede alcanzar hasta 9 m de diámetro. Tronco con espinas, en su etapa juvenil, y las pierde al madurar el árbol. Corteza café negruzca con fisuras longitudinales y a veces muy lignificada, interna de color crema amarillo, cambiando a pardo, fibrosa, grosor de la corteza de 5 a 18 mm. Hojas alternas, aglomeradas encima de cada par de espinas, bipinadas, de 4 a 12 cm de largo, incluyendo el pecíolo; pinnas compuestas por 1 a 2 pares de folíolos primarios opuestos, consistentes de 18 a 30 pares de folíolos secundarios sésiles, de 5 a 10 mm de largo y 1 a 1.2 mm de ancho, lineares, el último a veces asimétrico, con el margen entero, ápice y base redondeados, verde pálidos y glabros en ambas superficies; entre cada par de folíolos primarios se observa generalmente una glándula protuberante aplanada. Ramas jóvenes ligeramente fisuradas, verdes a pardo verdosas o morenas, glabras, con espinas rectas hasta de 3.5 cm de largo, robustas y agudas. Inflorescencias dispuestas en racimos densos axilares, de 3 a 10 cm de largo, glabros o pubescentes, con numerosas flores perfumadas, actinomorfas. Frutos, vainas de 15 a 20 cm de largo, comprimidos cuando jóvenes, casi cilíndricos en la madurez, terminada en una punta aguda, pardo amarillentas, glabras, de olor y sabor dulces, con 10 a 20 semillas ovoides, comprimidas.



### 9.7.2. Distribución

Se distribuye en todo el norte del país, desde Texas hasta la depresión del Balsas, aunque generalmente no forma masas compactas y suelen encontrarse individuos aislados. El rango altitudinal varía de 300 a 2300 msnm. Es frecuente en el bosque tropical espinoso, en áreas perturbadas y en terrenos con suelos aluviales profundos (García y Linares, 2012).

### 9.7.3. Usos

Ofrece características muy deseables para ser empleado en ámbitos urbanos; presenta una fronda amplia que permite su presencia en espacios abiertos con bajo consumo de agua. Uso tradicional y potencial. En el campo es una planta muy apreciada como árbol de sombra y como forraje para el ganado. Sus vainas son complemento alimenticio del hombre desde hace muchos siglos, (concentra 13% de proteína). Su floración proporciona miel de abeja de excelente calidad. La madera es muy útil no sólo como leña y carbón, sino como materia prima para ebanistería y construcciones rústicas. La goma que exuda su tronco tiene diversos usos industriales y farmacológicos, lo mismo que sus hojas, que tienen propiedades curativas en la inflamación de los ojos. Es valiosa esta especie no sólo en plantaciones urbanas, sino en reforestaciones para restauración ecológica; como leguminosa tiene la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico en sus raíces (García y Linares, 2012).

Es dura, perdurable, de grano cerrado y toma un brillo muy fino al pulirla, aunque es quebradiza y poco flexible, pero al someterla al fuego cambia su estructura lo que le permite adquirir mayor flexibilidad y resistencia. Usos actuales: en construcciones rústicas, utensilios en hogares rurales, madera aserrada, acabado de interiores y artículos torneados, vagones, es de gran calidad y se extraen brazuelos, tablas, tablones y durmientes, por su dureza y durabilidad se usa para muebles, duela, parquet, mangos de herramientas, postes, hormas para zapatos en escala industrial, dado que es pesada y durable se utiliza en la construcción y ebanistería, también se emplea para postes de cercas, y es fuente de fibra para la producción de papel, es muy durable por su dureza y consistencia. Usos potenciales: es de buena calidad para ser utilizada en la industria mueblera, ya que posee mayor dureza y capacidad de flexibilidad que otras especies (Rendón *et al.*, 2021).