

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL  
ELABORADO EN HORNO TIPO FOSA CON SUBPRODUCTOS  
FORESTALES DE *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. Y *Lonchocarpus  
castilloi* Standl. EN CAMPECHE**

POR

ING. SERGIO AMILCAR CANUL TUN

Como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Linares, Nuevo León

Marzo, 2013

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**


**RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL  
ELABORADO EN HORNO TIPO FOSA CON SUBPRODUCTOS  
FORESTALES DE *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. Y *Lonchocarpus  
castilloi* Standl. EN CAMPECHE**

TESIS DE MAESTRÍA

Para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

Presentada por:  
ING. SERGIO AMILCAR CANUL TUN

COMITÉ DE TESIS



---

Dr. Artemio Carrillo Parra  
Director




---

Dr. Humberto González Rodríguez  
Asesor



---

Dr. Horacio Villalón Mendoza  
Asesor



---

M.C. Célestino Flores López  
Asesor externo

Linares, Nuevo León

Marzo, 2013

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León a través de la Facultad de Ciencias Forestales, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. Artemio Carrillo Parra, por sus consejos y orientación en la realización de este trabajo de investigación

Al Dr. Humberto Gonzales Rodríguez, por sus aportaciones y correcciones importantes en la realización de esta tesis.

Al Dr. Horacio Villalón Mendoza, por su valiosa ayuda en correcciones de la tesis.

Al M.C. Celestino Flores López, por su disponibilidad, sus observaciones y correcciones que fueron de suma importancia en la realización de la tesis.

Agradezco el apoyo recibido de la Familia de mí amigo José Luis Guzmán Peralta del estado de Campeche, por su cooperación en la obtención de muestras.

## **DEDICATORIA**

A mis hijos:

Naybi Abisai Canul Cob y Ramón Amilcar Canul Cob, por ser mi mayor motivación e inspiración para ser mejor persona y prepararme cada día más.

A mi esposa:

Leydi Abigail Cob Chan, por cuidar de mis hijos en los momentos que permanecí lejos de ellos.

A

Adriana Concepción Canul Tun, por creer en mí y por darme su apoyo incondicional en la realización este trabajo.

A mis padres:

Ramón Cruz Canul Vásquez y Lucila Tun Cahuich, les agradezco los apoyos brindados en el transcurso de mi vida profesional y por ser unos padres responsables.

A mis hermanos

Adriana Concepción, Raúl, Claudio Ezequiel y María Esther, por formar parte de mi familia, extrañable.

A mis amigos

Que compartieron grandes momentos, Juan Carlos Ontiveros Chacón, Javier Hernández Salas, Bernardo López, Gustavo Domínguez Gómez, Manuel López Hernández, José Isabel Morales, Héctor Morales, Mane Salinas Rodríguez, Ramiro Velázquez, Josué Estrada, Claudia Doria Treviño, María del Socorro Alvarado y a todos los de mi generación.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	3
2. ANTECEDENTES.....	7
2.1. Biocombustibles .....	7
2.2 Dendroenergía .....	8
2.3 Tipos de Hornos .....	9
2.3.1. Método de parva o montículo .....	9
2.3.2. Horno tipo fosa .....	10
2.3.3. Horno tipo colmena brasileño.....	11
2.4. Factores que influyen en la producción y calidad del carbón vegetal.....	12
2.4.1 Contenido de humedad .....	12
2.4.2 Densidad .....	13
2.4.3 Rendimientos .....	13
2.5 Producción y comercialización del carbón vegetal .....	13
3. OBJETIVOS .....	15
3.1 Objetivo general .....	15
3.2 Objetivos específicos.....	15
4. HIPÓTESIS.....	16
5. JUSTIFICACIÓN .....	17
6. MATERIALES Y MÉTODOS .....	18
6.1 Origen de los subproductos forestales y ubicación del horno .....	18
6.2 Descripción de las especies .....	19
6.2.1 <i>Piscidia piscipula</i> .....	19
6.2.2 <i>Lonchocarpus castilloi</i> .....	19
6.3 Descripción del horno .....	20
6.4 Colecta de material.....	21
6.4.1 Presecado .....	22
6.5. Elaboración de carbón vegetal .....	25

6.6 Rendimiento .....	26
6.7. Calidad del carbón vegetal .....	27
6.7.1 Preparación de las muestras para análisis físico-químicos .....	27
6.7.2 Propiedad física.....	27
6.7.3 Propiedades químicas .....	28
6.7.4. Análisis elemental.....	29
6.7.5 Análisis estadísticos.....	29
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	31
7.1 Pruebas de normalidad .....	31
7.2 Propiedades físicas .....	31
7.2.1 Densidad.....	31
7.2.2 Contenido de humedad .....	32
7.3. Rendimientos del carbón vegetal .....	32
7.4. Análisis inmediatos .....	35
7.4.1. Humedad.....	35
7.4.2. Volátiles.....	37
7.4.3. Cenizas.....	38
7.4.4. Carbón fijo.....	40
7.4.5. Poder calorífico.....	41
7.5 Relación densidad y análisis inmediatos.....	43
7.6. Análisis elementales .....	45
8. CONCLUSIONES .....	48
9. RECOMENDACIONES .....	49
10. LITERATURA CITADA .....	51
11. ANEXOS .....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Horno tipo parva o montículo. Foto tomada de García (2008).....	10
Figura 2. Horno tipo fosa, con tapa metálica. (Foto: Sergio Amilcar Canul Tun).....	11
Figura 3. Horno tipo colmena. (Foto: Mario Hernández Ortega). ....	12
Figura 4. Ubicación del horno tipo fosa en el Ejido Justicia Social municipio de Escárcega, Campeche.....	18
Figura 5. Árboles de <i>P. piscipula</i> (a) y <i>L. castilloi</i> (b). ....	20
Figura 6. Horno tipo fosa con tapa metálica. ....	21
Figura 7. Subproductos forestales, después del aprovechamiento forestal. ....	22
Figura 8. Presecado de los subproductos forestales maderables.....	22
Figura 9. Determinación del contenido de humedad con un xilohigrómetro marca Delmhorst J-2000 sección A) y sección B) de la muestra. ....	23
Figura 10. Rodaja de la especie <i>L. castilloi</i> marcada con clavos y alambre galvanizado para facilitar su posterior identificación.....	24
Figura 11. Acomodo y distribución de las muestras dentro del horno tipo fosa, sección A en la entrada del horno y la Sección B a la salida de humo. ....	25
Figura 12. Proceso de elaboración de carbón vegetal en el horno tipo fosa. ....	26
Figura 13. Probetas de madera de 2x2x2 cm, para determinar densidad, según la Norma DIN EN 52 182. ....	28
Figura 14. Densidad básica, anhidra y verde de la madera de las especies <i>P. piscipula</i> y <i>L. castilloi</i> .....	32
Figura 15. Rendimiento de carbón vegetal elaborado con las especies <i>P. piscipula</i> y <i>L. castilloi</i> .....	34
Figura 16. Rendimiento de subproductos forestales de las especies de <i>P. piscipula</i> y <i>L. castillo</i> en las tres quemas realizadas para producir una tonelada de carbón vegetal. ....	35
Figura 17. Contenido de humedad (%) del carbón vegetal de la especie de <i>P. piscipula</i> y <i>L. castilloi</i> en las tres quemas realizadas. ....	36
Figura 18. Contenido de humedad (%), cenizas (%), volátiles (%) y carbón fijo (%) del carbón vegetal elaborado en hornos tipo fosa de las especies de <i>P. piscipula</i> y <i>L. castilloi</i> .....	37
Figura 19. Porcentaje de material volátil presente en el carbón vegetal de las especies de <i>P. piscipula</i> y <i>L. castillo</i> , elaborado en horno tipo fosa. Posición: C1 (entrada de aire), Posición: C2 (salida de humo). ....	38
Figura 20. Porcentaje de ceniza presente en el carbón vegetal de las especies de <i>P. piscipula</i> y <i>L. castilloi</i> . ....	39
Figura 21. Porcentaje de carbón fijo del carbón vegetal de la especie de <i>P. piscipula</i> y <i>L. castilloi</i> . Posición: C1 (entrada de aire), Posición: C2 (salida de humo).....	40

Figura 22. Poder calorífico de carbón vegetal de la especie de <i>P. piscipula</i> y <i>L. castilloi</i> . .....	42
Figura 23. Poder calorífico del carbón elaborado a partir de las especies <i>P. piscipula</i> y <i>L. castilloi</i> en hornos tipo fosa. ....	42
Figura 24. Gráficas de la relación entre la densidad básica con contenido de humedad (%), volátiles (%), ceniza (%) y carbón fijo (%) del carbón vegetal de la especie <i>P. piscipula</i> .....	44
Figura 25. Gráficas de la relación entre la densidad básica con contenido de humedad (%), volátiles (%), ceniza (%) y carbón fijo (%) del carbón vegetal de la especie <i>L. castilloi</i> .....	45
Figura 26 Porcentaje de elementos presentes en el carbón elaborado a partir de subproductos forestales de <i>P. piscipula</i> y <i>L. castilloi</i> en horno tipo fosa. ....	46



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resultados de la prueba de normalidad realizada según Kolmogorv-Smirnov .....	31
Cuadro 2. Rendimiento de carbón vegetal obtenido de subproductos forestales de <i>P. piscipula</i> y <i>L. castilloi</i> .....	33

TABLA DE ANEXOS

ANEXO 1. Muestra los datos de densidad básica, densidad verde y densidad anhidra de la madera de *P. piscipula* y *L. castilloi*.....56

ANEXO 2. Muestra los resultados obtenidos del peso de la madera (kg), del carbón vegetal (kg) y rendimiento en  $m^3 t^{-1}$  de *P. piscipula* y *L. castilloi* .....56

ANEXO 3 Muestra el contenido de los resultados de la química del carbón *P. piscipula* y *L. castilloi* .....56

ANEXO 4. Se presenta las diferencias significativas del rendimiento entre especies y quemadas.....57

ANEXO 5. Análisis de la varianza del contenido de humedad del carbón vegetal de *P. piscipula* y *L. casitlloi*. .....57

ANEXO 6 Análisis de la varianza del porcentaje de volátiles en el carbón vegetal obtenido de los subproductos forestales, de *P. piscipula* y *L. castilloi*. .....58

ANEXO 7 Análisis de la varianza del porcentaje de cenizas en el carbón vegetal obtenido de leña, de *P. piscipula* y *L. castilloi*. .....58

ANEXO 8. Análisis de la varianza del porcentaje de carbón fijo en el carbón vegetal obtenido de leña, de *P. piscipula* y *L. castilloi*. .....59

ANEXO 9. Análisis de la varianza de la cantidad de poder calorífico en el carbón vegetal obtenido del subproducto forestal, de *P. piscipula* y *L. castilloi*. .....59

ANEXO 10 Valores de  $R^2$  ajustada y  $p$ , de densidad básica de la madera de *P. piscipula*, contra el (%) del CH, volátiles, cenizas y poder calorífico del carbón vegetal.....60

ANEXO 11. Valores de  $R^2$  ajustada y  $p$ , de densidad básica de la madera de *L. castilloi*, contra el (%) del CH, volátiles, cenizas y poder calorífico del carbón vegetal .....60

ANEXO 12 Promedio y desviación estándar de los elementos de *P. piscipula* y *L. castilloi*. .....61

## RESUMEN

Se evaluó el rendimiento, calidad del carbón vegetal y el análisis elemental a partir de subproductos forestales de las especies tropicales *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. (Javín) y *Lonchocarpus castilloi* Standl. (Machiche) en hornos de fosa, en Escárcega, Campeche, con base a normas internacionales de calidad. El carbón vegetal de ambas especies se obtuvo del resultado de tres quemas, el horno tipo fosa se dividió en dos secciones. Los resultados se analizaron mediante un arreglo factorial 2\*2\*3. La especie *P. piscipula* requirió en promedio de  $3.2 \pm 0.69 \text{ m}^3$  de subproducto forestal para producir una tonelada de carbón vegetal, mientras que para *L. castilloi* requirió en promedio  $2.9 \pm 0.56 \text{ m}^3$ . El contenido de humedad del carbón vegetal presentó diferencias estadísticas altamente significativas entre especies y entre quemas ( $p < 0.001$ ). El contenido de volátiles (%) no presentó diferencias estadísticas significativas entre especies, pero entre quemas presentó diferencias altamente significativas ( $p < 0.001$ ). El contenido de cenizas (%) del carbón vegetal de *P. piscipula* y *L. castilloi* presentó diferencias altamente significativas entre especies ( $p < 0.001$ ) y diferencias estadísticas entre quemas ( $p < 0.05$ ). El contenido de carbón fijo (%) del carbón vegetal de *P. piscipula* y *L. castilloi* presentó diferencias altamente significativas entre especies y entre quemas ( $p < 0.001$ ). El poder calorífico del carbón vegetal de *P. piscipula* y *L. castilloi* presentó diferencias altamente significativas entre especies y entre quemas ( $p < 0.001$ ). La especie que presentó mayor rendimiento, mayor carbón fijo y mayor poder calorífico fue *L. castilloi* por lo que se considera que la especie de *L. castilloi* es de mejor calidad que *P. piscipula* para la elaboración de carbón vegetal. En relación al análisis elemental de la ceniza *P. piscipula* presentó un porcentaje de calcio de 85 % y 12 % de potasio, mientras que *L. castilloi* presentó 82 % de calcio y un 8 % de potasio, siendo a si el contenido de calcio y potasio similar en las dos especies.

Palabras claves: carbón vegetal, *P. piscipula*, *L. castilloi*, rendimiento, carbón fijo y poder calorífico.

## ABSTRACT

Charcoal yields, quality and elemental analysis from residues of the tropical species *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. (Javin) and *Lonchocarpus castilloi* Standl. (Machiche) was evaluated according to international standards. The charcoal was elaborated in pit ovens build in Escárcega, Campeche. The data from the both species, two different sections form the oven and three burns were analyzed using a factorial 2 \* 2 \* 3 arrangement. The species *P. piscipula* required  $3.2 \pm 0.69$  m<sup>3</sup> of firewood to produce one ton of charcoal, while for *L. castilloi* required  $2.9 \pm 0.56$  m<sup>3</sup>. The moisture content (%) of charcoal showed highly significant differences between species and burns (p <0.001). The material volatile (%) showed no statistically significant differences between species, but between burns showed highly significant differences (p <0.001). The ash content (%) of *P. piscipula* and *L. castilloi* charcoal showed highly significant differences between species (p <0.001) and statistical differences between burns (p <0.05). The fixed carbon content (%) *P. piscipula* and *L. castilloi* charcoal showed highly significant differences between species and burning (p <0.001). The calorific value *P. piscipula* and *L. castilloi* charcoal showed highly significant differences between species and burns (p <0.001). With respect to elemental content of ash, *P. piscipula* showed 85% and 12% of calcium and potassium respectively, whereas *L. castilloi* showed 82% and 8%. The species that showed higher values of fixed carbon and calorific value was higher *L. castilloi* therefore, this species is considered with better quality than *P. piscipula* for charcoal making.

Keywords: Charcoal, *P. piscipula*, *L. castilloi*, performance, fixed carbon and calorific

## 1. INTRODUCCIÓN

En respuesta a la amenaza del calentamiento global ha crecido notablemente el interés entre los científicos, políticos y gobiernos de diversos países en incrementar la captura de carbono en los bosques y considerar el aprovechamiento de otras fuentes de energía como el viento, el sol, las olas, geotermia y biomasa forestal (Camps y Marcos, 2008). Lo anterior tiene la finalidad de substituir el uso de combustibles fósiles y minimizar el incremento en las concentraciones de carbono atmosférico (Patiño y Smith, 2008). La ventaja de los biocombustibles con respecto a otras fuentes de energía radica en que son renovables y por ello son considerados como la fuente de energía destinada a suplir las carencias futuras de combustibles fósiles.

La bioenergía puede ser obtenida a partir de biocombustibles sólidos como leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, residuos forestales, pélets y briquetas; además de los biocombustibles líquidos pueden ser bioetanol y biodiesel; y los biocombustibles gaseosos como el biogás (González, 2009; Trossero, 2002). Los combustibles de origen biológico además de substituir parte del consumo de los combustibles fósiles tradicionales; tienen la ventaja de presentar un bajo impacto en el deterioro ambiental (Banco Interamericano de Desarrollo, 2008).

La leña y el carbón vegetal son los combustibles utilizados en el hogar que generan mayor empleo por unidad de energía consumida. Por el contrario, los combustibles derivados del petróleo son los que generan menos empleo (Trossero, 2002). En este sentido, se tiene que el volumen de trabajo humano necesario para producir recursos de biomasa es casi cinco veces mayor que el que debe aplicarse para la producción de combustibles fósiles (Domac, 2002).

El carbón vegetal es un combustible sólido de color negro con poder calorífico que fluctúa entre 29000 y 35000 KJ kg<sup>-1</sup>, valor superior al presentado por la madera que oscila entre 12000 y 21000 KJ kg<sup>-1</sup> (Mäsera *et al.*, 2005; FAO, 1993). Además, la combustión limpia resultado del bajo porcentaje de materiales volátiles y bajo contenido

de azufre, lo hacen un recurso importante para emplearse en las centrales termoeléctricas, situación que es también muy apreciable desde el punto de vista ambiental (Luxán y Jiménez, 2003; Maserá *et al.*, 2005). Por otro lado los residuos de la madera como las cenizas disminuyen el grado de acidez y elevan el nivel de algunos nutrientes del suelo que son limitantes para la producción vegetal (Solla *et al.*, 2001).

El carbón vegetal es inerte, difícilmente alterable bajo condiciones atmosféricas normales y no es afectado por agentes biológicos (hongos e insectos xilófagos) que atacan la madera (Martín, 1989). Otras características importantes del carbón vegetal es la producción de poco humo y alto poder calorífico. En los países desarrollados se incrementó la demanda del carbón vegetal como combustible para barbacoas o parrillas asadoras, también grandes cantidades son destinadas a la producción de cobre y zinc, así como en la industria de los metales preciosos (Stassen, 2002; Camps y Marcos, 2008).

El carbón vegetal es un producto sólido, frágil y poroso con un alto contenido de carbono. El proceso de elaboración es llamado carbonización o pirólisis y se realiza bajo condiciones controladas en espacios cerrados para tener una combustión parcial de la madera a temperaturas que van de 400°C a 700°C. La ausencia de aire es de suma importancia para evitar que la madera se quemara totalmente y se convirtiera en cenizas como sucede durante el fuego convencional (FAO, 1983; Wolf y Vogel, 1985; Camps y Marcos, 2008).

Se estima que el sesenta por ciento de toda la madera extraída anualmente en el mundo (aproximadamente 1,600 millones de metros cúbicos), se quema como combustible, ya sea en forma directa, o transformada en carbón vegetal u otro producto. EL volumen de leña utilizado para la fabricación de carbón vegetal, se considera que es alrededor de 400 millones de metros cúbicos por año (FAO, 1983).

En el 2007 la producción forestal maderable en México fue de 7.0 millones de metros cúbicos rollo ( $m^3r$ ). Los principales Estados productores en 2007 fueron: Durango

(25.4%), Chihuahua (22.4%), Michoacán (9.9%), Jalisco (8.5%) y Oaxaca (7.7%) que contribuyeron con el 74.0% de la producción total, equivalente a 5.2 millones de m<sup>3</sup>r. El 66.8% de la producción de 2007 se destinó a madera para aserrío (4.7 millones de m<sup>3</sup>r), el 12.6% a productos celulósicos (882 mil m<sup>3</sup>r) y el restante 20.6% (1.4 millones de m<sup>3</sup>r) a tableros, postes, pilotes y morillos y combustibles (leña y carbón), el 362,844 m<sup>3</sup>r pertenecen a la producción de leña y 326,826 m<sup>3</sup>r a la producción de carbón vegetal (SEMARNAT, 2007).

De lo anterior se deriva que en México la leña y el carbón ocupan el tercer lugar en volumen de extracción con el 9.9%. Estos productos se obtienen principalmente de las zonas de la península de Yucatán y Baja California, así como la meseta central (SEMARNAT, 2007). La madera denominada tradicionalmente como “tropical”, se produce principalmente en los estados de Veracruz, Tamaulipas y Campeche, y representan un 62.1% de la producción total de este tipo de madera dura. El estado de Campeche rico en flora y fauna, tiene una superficie forestal de 57,924.35 km<sup>2</sup> y es un abastecedor importante de carbón vegetal a nivel nacional. Las especies forestales más importantes en términos comerciales son *Piscidia piscipula* (jabín), *Lonchocarpus castilloi* (machiche) y *Bucida buceras* (pucté). En el estado de Campeche se utiliza un volumen de 13,035 m<sup>3</sup>r para elaborar carbón vegetal, el valor comercial de ésta producción es de \$6,517,500 (SEMARNAT, 2007).

La tecnología para la producción de carbón vegetal es muy variada, desde el horno tipo parva, de fosa, hornos colmena brasileño hasta los hornos metálicos y los hornos de mampostería. El horno tipo fosa es uno de los más antiguos, sin embargo aun es ampliamente utilizado (Argueta, 2006). El uso de cada tipo depende de las condiciones socioeconómicas del sitio. Sin embargo, el tipo de horno seleccionado afecta de manera importante la calidad del carbón y rendimiento del mismo. Existen investigaciones que determinan la calidad y rendimiento de los diferentes tipos de hornos utilizando diferente material combustible como leña de mezquite, encino, residuos de aprovechamientos forestales, así también como de aserraderos, madera de acahuales proveniente de cambio de uso del suelo, madera de podas y raleos en plantaciones

forestales comerciales, residuos de madera que dejan los incendios forestales y los huracanes.

En muchas áreas a nivel mundial así como en México la calidad del carbón vegetal no está aún regulada, pero en caso de exportación para otros países, hay que cumplir con el requerimiento de sus normas, en Alemania está regulado por la Norma DIN 51749, en Francia por la Norma AFNOR NF B 55101, Bélgica por la Norma NBN M 11-001, en Suecia por la Norma GOST 7657-84, en Rusia por la GOST 7657-84 y en Serbia por la JUS.D.B9.020 (Petrović y Glavonjić, 2011).

Por lo anteriormente expuesto se considera importante evaluar la calidad del carbón vegetal elaborado a partir de especies tropicales en hornos tipo fosa. Por lo tanto, el presente trabajo evalúa el rendimiento y la calidad de carbón elaborado a partir de las especies *P. piscipula* y *L. castilloi* en hornos tipo fosa, con el uso de normas internacionales de calidad.



## 2. ANTECEDENTES

El hombre primitivo desde los inicios de la civilización hizo fuego al utilizar paja y leña, posteriormente obtuvo carbón vegetal por combustión incompleta de la madera. La preparación industrial del carbón vegetal por combustión en hornos superficiales de tierra y en fosas, es tan antigua como el uso de los metales, gracias al uso de leña, carbón vegetal y carbón mineral la revolución industrial pudo desarrollarse (FAO, 1983; Romahn, 1992; Camps y Marcos, 2008).

### 2.1. Biocombustibles

Los biocombustibles son la energía solar que es almacenada por los seres vivos en forma de combustible, por lo tanto se entiende que es toda materia que mezclada con el oxígeno produce una reacción de combustión que desprende energía calorífica (Camps y Marcos, 2008). La madera al igual que los combustibles fósiles pueden ser utilizados para producir diferentes tipos de combustible (sólido, líquido y gaseoso) y generar diferentes tipos de energía (electricidad, calor y potencia) para ser utilizada en los sectores industrial, comercial, familiar y del transporte (Trossero, 2002). La Unión Europea prevé que el sector de la bioenergía generará en Europa centenares de miles de empleos de tiempo completo para 2020, gran parte de ellos en las actividades de producción y utilización de combustible de madera (Domac, 2002).

El carbón vegetal como combustible sólido presenta mayor poder calorífico frente a la biomasa del cual fue obtenido, no obstante que durante la pirólisis se pierde una importante cantidad de energía contenida en la biomasa que fue utilizada durante el proceso (Maserá *et al.*, 2005).

La ventaja más importante de los biocombustibles frente a los denominados combustibles fósiles es que son renovables y son considerados como la fuente de energía destinada a suplir las carencias futuras de los combustibles fósiles. Los biocombustibles se clasifican de acuerdo a su origen y su apariencia física (Camps y Marcos, 2008). De acuerdo a su origen se tienen como biocombustible los cultivos energéticos, restos de cultivos agrícolas, restos de tratamientos silvícolas, restos de industrias forestales, restos

agro-alimentarios, restos de explotaciones ganaderas y restos de actividades humanas. Además los residuos como las cenizas se emplean en suelos forestales con la finalidad de devolver al sistema buena parte de los nutrientes extraídos durante el aprovechamiento forestal, con un efecto positivo sobre la acidez y el nivel de diferentes nutrientes del suelo, aumentando las concentraciones de Ca y Mg (Solla *et al.*, 2001).

En cuanto a su aspecto físico los biocombustibles se clasifican en sólidos, líquidos y gases. Desde el año 1992 al 1999 la producción de biocombustibles ha experimentado un espectacular crecimiento en Europa, especialmente en Francia y España, en ocho años ésta se multiplicó por 8.5, pasando de 55,000 toneladas a 470,000 (Camps y Marcos, 2008).

El potencial bioenergético de México se estima entre 2,635 y 3,771 petajoules al año, aunque la producción actual es 10 veces menor, el potencial estimado indica que 40% provendrá de combustibles de madera, 26% de agrocombustibles y 0.6% de subproductos de origen municipal, sin embargo el país tiene adicionalmente un potencial de 73 millones de toneladas de residuos agrícola-forestales que pudieran ser aprovechados. Los residuos sólidos municipales de las 10 principales ciudades pueden aprovecharse en la generación de electricidad. Si se considera la transformación térmica de este material, se podría instalar una planta con capacidad de 803 MW y generar 4,507 MWh año<sup>-1</sup> (González, 2009).

## 2.2 Dendroenergía

La dendroenergía es de gran importancia en los nuevos mercados de energía de los países industrializados como una fuente de energía limpia y disponible localmente. Los combustibles a base de madera siguen siendo la fuente predominante de energía para más de 2,000 millones de personas que viven en países en desarrollo (Trossero, 2002).

Alrededor del 60% de la madera extraída de los bosques y los árboles fuera del bosque a escala mundial se utiliza con fines energéticos. En otras palabras, el combustible a base de madera es uno de los principales productos bioenergéticos. En tanto que sólo el 30%

de la madera producida en los países desarrollados se destina a usos energéticos (33% en Europa y 29% en América del Norte), los países en desarrollo utilizan el 80%. En África, Asia y América Latina los combustibles de madera representan el 89%, 81% y el 66% respectivamente (Trossero, 2002).

Los combustibles a base de madera representan aproximadamente el 7 % del suministro mundial de energía primaria. La mayor parte del consumo de combustible de madera (76%) tiene lugar en los países en desarrollo, en los que vive en torno al 77 % de la población mundial. El 44 % del consumo de este combustible corresponde a los países asiáticos (Trossero, 2002).

### 2.3 Tipos de Hornos

En el transcurso de la historia el hombre ha utilizado diferentes tecnologías para la elaboración del carbón vegetal, iniciando por la más antigua como el método de parva o montículo, seguida del método de fosa y más tarde el horno construido mediante tabiques o tipo colmena brasileño, sin embargo en el estado de Campeche se usa el horno de tierra o bolón, el de fosa y colmena brasileño, siendo el más utilizado el horno tipo fosa. De la misma manera en el estado de Tamaulipas el tipo de horno más utilizado es el de bolón o sistema tradicional; seguido del horno de fosa (Argueta, 2006). La elaboración del carbón vegetal por combustión en hornos de fosa es una de las prácticas más antiguas (Argueta, 2006; FAO, 1983). La característica común de todos los hornos es la de proteger la carga de madera contra la entrada directa de aire (Wolf y Vogel, 1985).

#### 2.3.1. Método de parva o montículo

Para la construcción del horno de parva Cano *et al.*, (2003) recomiendan que la superficie sea sensiblemente plana y compacta, con ausencia de humedad en el suelo y libre de material combustible. También recomiendan que se debería de construir con una capacidad no mayor a una tonelada de leña, ya que cantidades mayores a ésta puede complicar su manejo y con ello la producción. En los hornos de parva o también llamados de volcán la madera se estiva sobre el suelo y se cubre con tierra; la finalidad es que la madera a carbonizar quede encerrada en una cámara hecha con el suelo y aislada del aire con tierra. Las dimensiones más utilizadas son de aproximadamente 4 m

de diámetro en la base y de 1.0 a 1.5 m de altura (FAO, 1983). La ventaja de este tipo de horno es que se puede construir cerca de la materia prima y en las áreas donde los subproductos forestales se encuentran de una manera dispersa (Figura 1).

Los hornos de tierra aun cuando se hacen funcionar con eficiencia, queman y enfrían en forma lenta, además contaminan el carbón vegetal con tierra. La principal ventaja es la baja inversión durante su construcción cuando el capital es limitado o no existe (FAO, 1983).



Figura 1. Horno tipo parva o montículo. Foto tomada de García (2008).

### 2.3.2. Horno tipo fosa

Este tipo de horno consiste en utilizar tierra para aislar la leña del oxígeno, se excava un pozo donde se coloca la leña y se cubre con suelo. En la actualidad los hornos tipo fosa presentan algunas modificaciones consistentes en colocar una tapa metálica en la parte alta de la fosa. Los pozos excavados en el suelo, se diseñan con una entrada y salida de aire en cada extremo (Figura 2). Después de apilar la leña, se tapa con piezas metálicas en la parte superior quedando la leña completamente aislada del oxígeno y finalmente se enciende el fuego en la entrada del aire o en una esquina del horno (FAO, 1983; Stassen, 2002).



Figura 2. Horno tipo fosa, con tapa metálica. (Foto: Sergio Amilcar Canul Tun).

### 7.3.3. Horno tipo colmena brasileño

Este horno es uno de los que presentan mayor producción, presenta un buen rendimiento y buena calidad de carbón vegetal. Si este tipo de horno es operado correctamente, es uno de los métodos más efectivos para la producción de carbón vegetal. La inversión para la construcción de este tipo de hornos es moderada, se requiere poca mano de obra y en función del tamaño se pueden obtener en cada quema de 9 a 10 toneladas de carbón vegetal. Según FAO (1983) la calidad del carbón obtenido por este método cumple con las especificaciones para todo uso industrial y doméstico. Flores y Quinteros (2008) recomiendan que la construcción debe ser sencilla para que las tensiones térmicas al calentarse y enfriarse no lo afecten, además debe ser lo suficientemente robusto para aguantar las tensiones mecánicas de la carga y descarga. La vida útil de éste tipo de hornos fue estimada por estos autores de seis a diez años. La Figura 3 muestra un horno tipo colmena brasileño.



Figura 3. Horno tipo colmena. (Foto: Mario Hernández Ortega).

## 2.4. Factores que influyen en la producción y calidad del carbón vegetal

### 2.4.1 Contenido de humedad

En el proceso de carbonización se eleva la temperatura de la leña hasta valores de 450°C u 800°C con la finalidad de modificar la estructura de la madera y mejorar sus propiedades combustibles, cuando el contenido de humedad de la leña va de 50 a 100% se utiliza mayor cantidad de leña para quemarse dentro del horno para evaporar el exceso de agua antes que se inicie la carbonización, por lo que los rendimientos son considerados bajos (FAO, 1983). Cano *et al.*, (2003) mencionan que la humedad de la leña para ser utilizada en la elaboración del carbón vegetal puede presentar contenidos de humedad de 25 a 30%; éstos mismos autores catalogan a la leña con un contenido de humedad de 70 a 80% como verde, también recomienda que la leña debe de cortarse en longitudes de 50 cm, con diámetros de 5 a 20 cm, para favorecer una completa carbonización. Por otra parte en los bosques tropicales, es necesario carbonizar la madera con un mayor contenido inicial de humedad, evitando que la madera se deteriore, por lo que sólo se deja secar durante pocas semanas antes de la carbonización (FAO, 1983).

#### 2.4.2 Densidad

La densidad de la madera es la propiedad física más importante, está relacionada con la mayoría de las propiedades físicas, mecánicas y energéticas de la madera. La densidad en la producción del carbón está relacionada con el rendimiento leña-carbón, carbono fijo, contenido de volátil, cenizas y poder calorífico. Pérez y Compean (1989) y Romahn (1992) mencionan que la densidad del carbón vegetal es directamente proporcional a la densidad en seco de la madera, la madera con mayor densidad requieren mayor temperatura de carbonización y mientras mayor sea la temperatura durante la carbonización será mejor la calidad del carbón vegetal.

#### 2.4.3 Rendimientos

Romahn (1992) menciona que los rendimientos de la carbonización son variados debido a diversos factores, entre los que destacan los equipos y procesos utilizados, como también la densidad de las especies, contenido de celulosa y lignina, el tamaño de la leña y contenido de resinas. El rendimiento será mejor si la madera contiene menos del 50 % de contenido de húmeda antes del inicio de la carbonización (FAO, 1983).

#### 2.5 Producción y comercialización del carbón vegetal

La producción mundial de carbón vegetal se estimó en 47 millones de toneladas en 2009 con un aumento creciente de 9% desde 2004. África aporta el 63% de la producción mundial, seguido de América Latina y el Caribe con un 19 %, Asia con un 16%, Norte América con un 2% y Europa con 1%, en el caso de África desde el 2004 al 2009, mostró un aumento en la producción por casi un 30% y América Latina y el Caribe mostró una disminución del casi el 30% del 2004 al 2009. En África, acerca del 30% de su producción maderable es usada para la producción de carbón vegetal, por tal motivo desde 1965 África es claramente la región con una mayor producción de carbón vegetal en el mundo. La producción de carbón en América Latina y el Caribe es fuertemente influenciado por Brasil, ya que es el país con mayor producción de carbón vegetal en el mundo lo cual representa una producción del 11%, seguido de Nigeria 8% y Ethiopia con un 8% del total de producción del año 2009. Las exportaciones en el 2009 fueron de

2 millones de toneladas de carbón vegetal, lo que representó un 4% de la producción global mundial. Los principales países exportadores fueron Paraguay, India, Indonesia, Argentina y Somalia, estos cinco países representaron la mitad de las exportaciones totales del 2009. Los cinco primeros países importadores de carbón vegetal son Alemania, China, Malasia, Japón y la República de Corea, con un total de 38% de la producción mundial (FAO, 2011).

El carbón vegetal es uno de los productos que aportan un superávit al país con una producción de 7.0 millones de m<sup>3</sup>r. Para el año 2007 el Producto Interno Bruto (PIB) del sector forestal fue de \$ 29,365 millones de pesos, en ese año la participación del sector forestal en la economía nacional fue del 0.4% del valor del PIB nacional. La balanza comercial forestal en exportaciones de carbón vegetal presentó un valor de \$ 7,801 mil dólares (SEMARNAT, 2007).



### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo general

Estimar el rendimiento y calidad del carbón vegetal producido en horno tipo fosa con los subproductos de las especies de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. (jabín) y *Lonchocarpus castilloi* Standl. (machiche).

#### 3.2 Objetivos específicos

Estimar el rendimiento de los subproductos forestales en la producción de carbón vegetal de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. (jabín) y *Lonchocarpus castilloi* Standl. (machiche) elaborado en hornos tipo fosa.

Determinar la calidad del carbón vegetal de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. (jabín) y *Lonchocarpus castilloi* Standl. (machiche) elaborado en hornos tipo fosa.

## **4. HIPÓTESIS**

### **Hipótesis nula**

El rendimiento y la calidad del carbón vegetal obtenido de las especies de *P. piscipula* y *L. castilloi* producido en hornos tipo fosa se encuentra en función de la especie y posición en el horno.

### **Hipótesis alternativa**

El rendimiento y calidad del carbón vegetal obtenido de las especies de *P. piscipula* y *L. castilloi* producido en hornos tipo fosa no están en función de la especie y posición en el horno.

## 5. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años la demanda de biocombustibles se ha incrementado considerablemente por la necesidad de mitigar el impacto negativo de los combustibles fósiles. Por otra parte durante los aprovechamientos forestales donde el producto principal es la madera, se pueden generar residuos forestales llamados también subproductos forestales. Los subproductos forestales deben ser triturados y esparcidos en el área, sin embargo en la mayoría de los casos son abandonados sin ser utilizados adecuadamente, por lo que pueden incrementar la incidencia de incendios en épocas de sequías intensas. Lo anterior propicia la necesidad de extraer el material combustible excedente de las áreas bajo aprovechamiento y utilizarlo en diferentes formas. La producción de carbón vegetal es una de las opciones más adecuadas, ya que se minimiza la acumulación de combustible bajo la selva, con lo que se impide que el fuego afecte negativamente al suelo por la intensidad de calor producido y la acumulación excesiva de combustibles en el suelo.

Por otra parte según datos de la SEMARNAT (2007), se ha incrementado la producción de carbón de especies nativas de áreas tropicales como *P. piscipula* y *L. Castilloi*. Sin embargo hasta el momento no existe información disponible que establezca la calidad del carbón elaborado de ambas especies, que sirva para buscar la factibilidad de su venta en mercados internacionales. La determinación de la calidad del carbón vegetal elaborado a partir de subproductos forestales de ambas especies, tiene como finalidad buscar la competencia con mercados internacionales y exigir un mejor precio, con lo que se favorecerá la economía de los productores.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 Origen de los subproductos forestales y ubicación del horno

La materia prima de las especies *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. (javín) y *Lonchocarpus castilloi* Standl. (machiche) utilizadas para la elaboración del carbón vegetal proviene de subproductos forestales obtenidos de aprovechamientos forestales, árboles derribados por incendios y el viento. El aprovechamiento forestal se realizó del área de uso común del Ejido Justicia Social ubicado en el municipio de Escárcega, Campeche, en las coordenadas 18° 38' 19.59" N y 90° 22' 34.82" O.

El horno tipo fosa se encuentra en el área de uso común del Ejido Justicia Social ubicado en el municipio de Escárcega, Campeche en las coordenadas 18° 38' 18.40" N y 90° 22' 40.46" O (Figura 4).

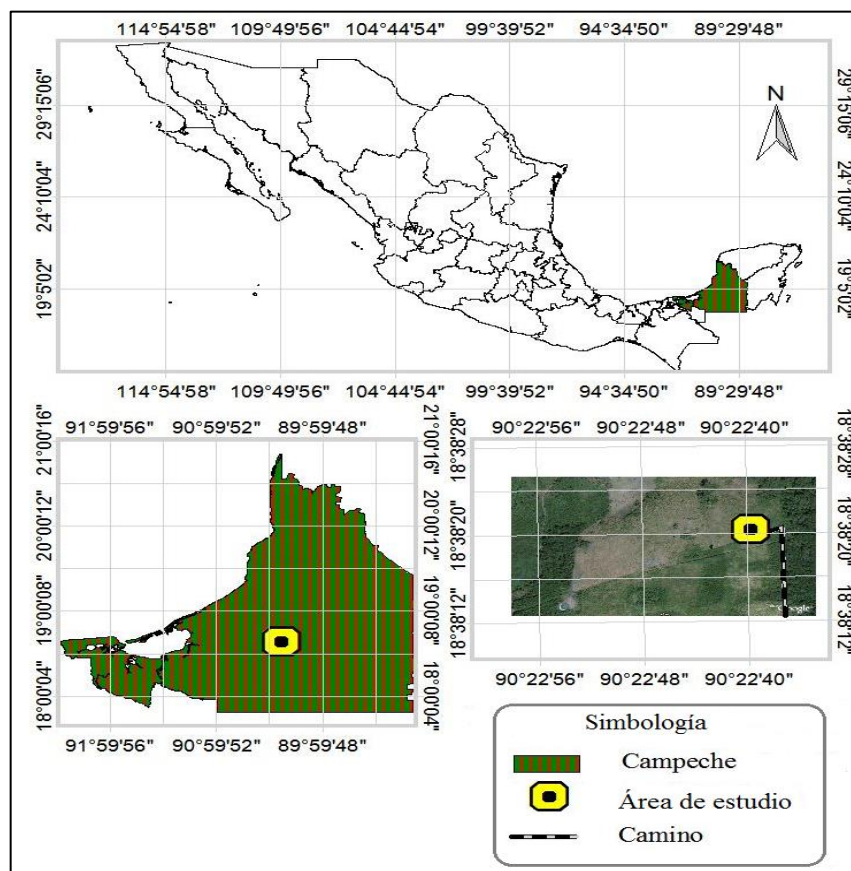


Figura 4. Ubicación del horno tipo fosa en el Ejido Justicia Social municipio de Escárcega, Campeche.

## 6.2 Descripción de las especies

### 6.2.1 *Piscidia piscipula*

*Piscidia piscipula* (L.) Sarg. con sinonimia *P. communis* (Blake) I M Johnst. Es una especie muy abundante en la vegetación primaria y secundaria de selvas medias subperenifolia y subcaducifolia, se distribuye en la vertiente del golfo de México desde el centro de Tamaulipas y San Luis Potosí. También se encuentra en Veracruz, Tabasco, Chiapas, Campeche y Yucatán, se le conoce como Jabin, habin, habí. La altura va desde los 20 m, diámetro a la altura de pecho (DAP) de hasta 0.50 m, fuste recto, ramas escasas ascendentes, copa densa, corteza fisurada de color pardo grisácea de 10 a 20 mm de grosor. La madera es de color crema amarillenta, está clasificada como madera dura y se utiliza para la fabricación de duelas, parquet y lambrin, así como para durmientes, construcción de casas y armazones de barcos (Pennington y Sarukhan, 2005). La Figura 5 a muestra una imagen del árbol en una área natural de desarrollo.

### 6.2.2 *Lonchocarpus castilloi*

*Lonchocarpus castilloi* Standl. (machiche), es uno de los árboles más dominantes de la selva media subperennifolia se asocia con las especies *Bucida buceras*, *Vietex gaumeri*, *Brosimums alicastrum* y *Piscidia piscipula*, se distribuye en Chiapas, Campeche, Quintana Roo y Yucatán se le conoce a esta especie como machiche ó machich. El árbol alcanza alturas hasta 30 m y hasta 0.40 m (DAP). Tiene fuste recto, copa redondeada, densa, con las ramas ascendentes; corteza escamosa en piezas papiráceas con un grosor de 9 a 15 mm. La madera es de color amarillento, es clasificada como madera dura y se utiliza para la construcción de embarcaciones, elaboración de parquet y duela (Pennington y Sarukhan, 2005). El árbol se muestra en la Figura 5 b.



Figura 5. Árboles de *P. piscipula* (a) y *L. castilloi* (b).

### 6.3 Descripción del horno

El horno que se utilizó para determinar el rendimiento y la calidad del carbón vegetal es de tipo fosa. Mide 3.18 m x 1.58 m x 1.67 m en sus direcciones largo ancho y profundidad respectivamente, el volumen total es de 8.369 m<sup>3</sup>. La tapa utilizada para impedir la entrada de aire y conservar la temperatura, esta formada por dos láminas de 3.50 m de largo, 0.92 m de ancho y de 0.0035 m de grosor, que se sobreponen unas con otras sobre un cargador (varilla de 0.0254 m de diámetro). El horno cuenta con una entrada y salida de aire de 0.25 m de diámetro, con estas entradas se controla el proceso de carbonización. En el estado de Campeche durante la temporada de lluvias se pueden inundar los terrenos planos, el riesgo de inundaciones se incrementa en el caso de huracanes, por tal razón el horno se ubicó en una pequeña loma, para evitar que el horno ya encendido se inunde y apague a consecuencia de la entrada de agua. Finalmente se excluye el horno con un cercado para evitar el acceso a personas ajenas al área y evitar accidentes (Figura 6).

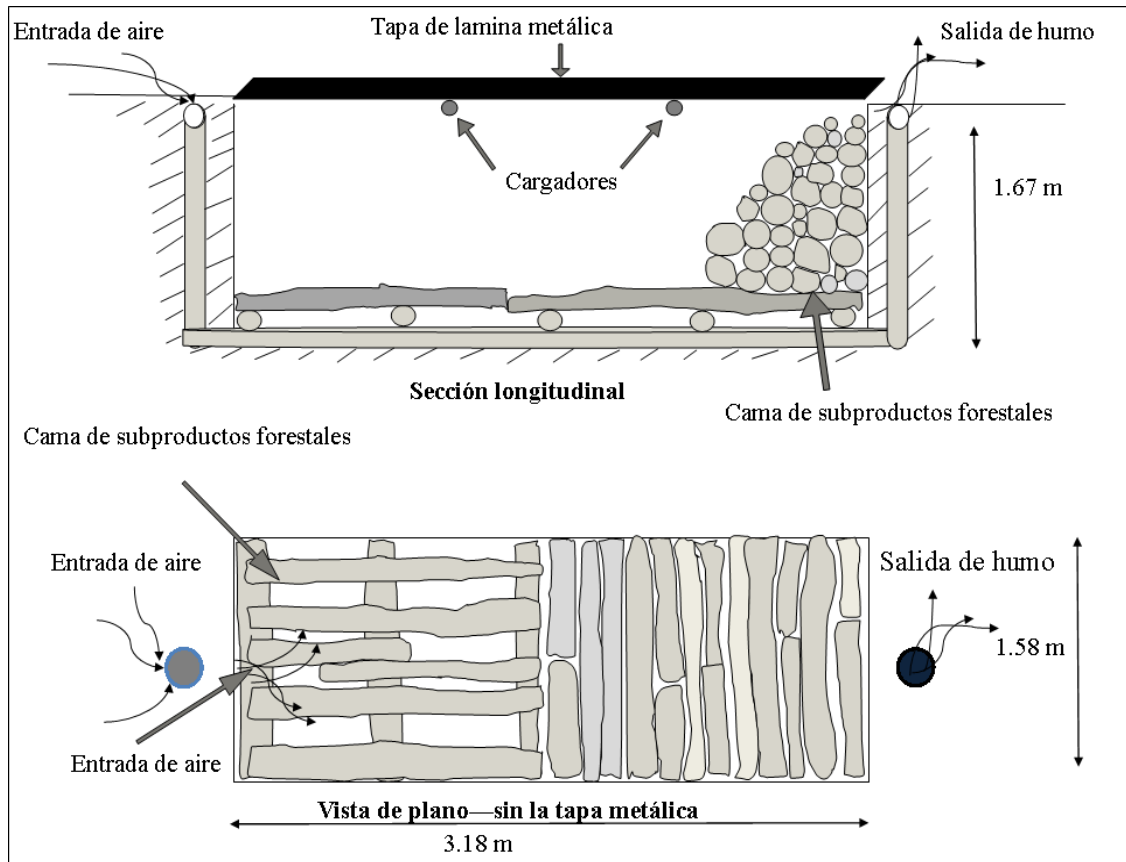


Figura 6. Horno tipo fosa con tapa metálica.

#### 6.4 Colecta de material.

El subproducto que se utilizó consistió en ramas de las especies de *P. piscipula* y *L. castilloi* resultado de los aprovechamiento forestales. Las ramas seleccionadas presentaron una longitud y diámetro medio de 0.75 m y 0.17 m respectivamente, el peso medio fue de 18 kg. Las dimensiones son las que se utilizan en forma tradicional en esta región ya que esto facilita la extracción de los subproductos forestales de la selva, al igual que el manejo y acomodo dentro del horno. Los subproductos del aprovechamiento fueron colectados después de dos semanas de realizado el aprovechamiento (Figura 7).



Figura 7. Subproductos forestales, después del aprovechamiento forestal.

#### 6.4.1 Presecado

Los subproductos fueron colocados a un lado de la fosa, con la intención de exponerla a la incidencia solar durante 25 días para reducir el contenido de humedad (Figura 8).



Figura 8. Presecado de los subproductos forestales maderables.



#### 6.4.2 Selección de la muestra

Se seleccionaron al azar diez trozas de la madera, cinco correspondiente a la especie *P. piscipula* y cinco a la especie *L. castilloi*. Tres rodajas se obtuvieron a partir de cada troza (A, B y C) con espesor aproximado de 0.20 m.

#### 6.4.3 Determinación del contenido de humedad

Se seleccionó al azar 20 muestras por cada una de las dos repeticiones. Posteriormente, se determinó el contenido de humedad a cada muestra con un xilohigrómetro marca Delmhorst J-2000, en la medula, duramen y albura de las secciones A y B de cada muestra (Figura 9).



Figura 9. Determinación del contenido de humedad con un xilohigrómetro marca Delmhorst J-2000 sección A) y sección B) de la muestra.

#### 6.4.4 Distribución de las rodajas en el horno

Las rodajas A y B de cada troza se sometieron al proceso de carbonización. La rodaja A se colocó en la entrada de aire del horno y la sección B se colocó a la salida de humo. A cada rodaja se le colocó clavos y alambre galvanizado para facilitar su identificación después del proceso. Las marcas consistieron en colocar un tipo de clavo a cada especie. La especie de *P. piscipula* se marcó con clavos para madera y las rodajas de la especie de *L. castilloi* se marcaron con clavos para concreto. Para identificar cuales rodajas

correspondían a la entrada y cuales a la salida, se les colocó un clavo a las rodajas que fueron ubicadas a la entrada de aire del horno y dos clavos a las que se colocaron a la salida del humo. La identificación del número de rodaja (5 en cada sección por especie) se realizó al colocar diferente número de rondanas a cada clavo. De esta manera a la repetición uno se le colocó una rondana y así sucesivamente hasta llegar a la repetición cinco, a la cual se le colocaron cinco rondanas. Para evitar que la rodaja se rompiera durante el proceso de carbonización, extracción del horno o durante el traslado, se amarró cada una de ellas con alambre galvanizado, esto también sirvió para identificar la muestra dentro del horno (Figura 10). La Figura 11 muestra el acomodo de las rodajas dentro del horno. Este procedimiento se realizó por tres ocasiones (tres quemas). La rodaja C de cada especie se llevó al laboratorio para realizar las pruebas físicas de la madera.



Figura 10. Rodaja de la especie *L. castilloi* marcada con clavos y alambre galvanizado para facilitar su posterior identificación.



Figura 11. Acomodo y distribución de las muestras dentro del horno tipo fosa, sección A en la entrada del horno y la Sección B a la salida de humo.

#### 6.5. Elaboración de carbón vegetal

El proceso de producción del carbón vegetal inició con la colecta de subproductos forestales en el área de aprovechamiento forestal, posteriormente se prosiguió con el transporte de los subproductos forestales hasta el lugar en donde se ubica el horno tipo fosa, posteriormente se continuó con el apilado de los subproductos en el interior del horno; una vez apilados los subproductos en el interior del horno, se prosiguió con el encendido del horno cerca de la entrada de aire, con el fin de que la ignición inicie lo más rápido posible; posteriormente se acomodaron las láminas sobre el horno, se apoyaron sobre las paredes del horno y sobre de dos cargadores de acero. Una vez encendido el horno, el proceso de carbonización se llevó a cabo en cuatro días, lo cual concluyó cuando se observaron emisiones de humos con tonalidad azulosa. Para suspender el proceso, la entrada y salida de aire del horno se cerraron, se dejó enfriar por cuatro días hasta que la temperatura del mismo sea tolerable al contacto con la mano. Al enfriarse el horno se levantaron las tapas metálicas, para proseguir con la extracción y envasado del carbón vegetal (Figura 12). Una vez que el horno se enfrió, se extrajo el carbón junto con las muestras en forma manual de cada nivel del horno y fueron llevadas

al laboratorio de Tecnología de la madera de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, para analizar las pruebas de calidad.



Figura 12. Proceso de elaboración de carbón vegetal en el horno tipo fosa.

### 6.6 Rendimiento

El rendimiento subproducto forestal-carbón se determinó mediante la relación del volumen total ( $m^3$ ) del subproducto forestal que se utilizó en el proceso de producción con el peso del carbón obtenido (toneladas). El volumen total de subproducto forestal apilado en forma de estiva y colocada dentro del horno tipo fosa se determinó calculando el volumen total de la pila aplicando un factor 0.6 como coeficiente de apilamiento. El volumen se divide entre el peso (t) del carbón total obtenido al término del proceso de carbonización (García, 2010).

Otro procedimiento utilizado que sirvió para corroborar la información, fue el de determinar el volumen de las rodajas antes de introducirlas al horno para su

carbonización y pesando las mismas al termino del proceso. El rendimiento se determinó al dividir el volumen de la rodaja antes de la carbonización, entre el peso obtenido de la rodaja carbonizada.

## 6.7. Calidad del carbón vegetal

### 6.7.1 Preparación de las muestras para análisis físico-químicos

La densidad se determinó mediante probetas de madera o cubos 2x2x2 cm obtenidos del duramen. Las propiedades químicas se determinaron a partir de las rodajas de la sección A y B carbonizadas que fueron fraccionadas para obtener 100 g de carbón vegetal. La sección del duramen se utilizó para realizar éste análisis por ser el más abundante para ambas especies. Muestras de 100 g de carbón se colectaron en bolsas de papel, se llevaron al laboratorio de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde se molieron, tamizaron y prepararon para determinar el contenido de humedad, elementos volátiles, cenizas y carbón fijo, según lo establecido en la Norma Internacional ASTM D 1762-84.

### 6.7.2 Propiedad física

#### 6.7.2.1 Densidad

La densidad de la madera se determinó del duramen de probetas obtenidas de las rodajas de la sección C de cada troza. Las probetas para determinar las propiedades físicas de la madera se elaboraron conforme a lo indicado en la Norma DIN EN 52 182 (Figura 13), la densidad de cada especie se determinó al aplicar la siguiente fórmula (DIN EN 52 182).

$$\rho_N = \frac{m_N}{v_N}$$

Donde:

$\rho_N$  = Densidad (verde, normal, o anhidra), en g cm<sup>-3</sup>

$m_N$  = Masa bajo la condición seleccionada en g.

$v_N$  = Volumen bajo la condición seleccionada en  $\text{cm}^3$

(Para determinar la densidad básica, basta con poner en la fórmula la masa en condición anhidra (g), entre el volumen verde o saturado ( $\text{cm}^{-3}$ ).



Figura 13. Probetas de madera de 2x2x2 cm, para determinar densidad, según la Norma DIN EN 52 182.

### 6.7.3 Propiedades químicas

La caracterización química del carbón vegetal producido por ambas especies en hornos tipo fosa se realizó con base en la Norma Internacional ASTM D 1762-84. Las pruebas de laboratorio para determinar el porcentaje de contenido de humedad, volátiles, ceniza y carbón fijo se desarrollaron con 30 muestras de 50 g de carbón de cada una de las especies ensayadas. Éstas se colocaron en bolsas de plástico para evitar la absorción de humedad.

El poder calorífico del carbón producido de ambas especies se determinó al aplicar la fórmula descrita por Cordero *et al.*, (2001).

$$\text{HHV} = 354.3\text{FC} + 170.8 \text{VM}$$

Donde:

HHV= Representa el poder calorífico en (kj/kg)

FC= Carbón fijo

VM = Contenido de volátiles

Cordero *et al.*, (2001) obtuvo esta ecuación a partir de análisis de regresión lineal múltiple de los datos usando el programa de mínimos cuadrados

#### 6.7.4. Análisis elemental

El análisis cualitativo y cuantitativo de los elementos inorgánicos que conforman la madera, se determinó con un espectrómetro de dispersión de rayos X (Bruker). Se acopla a un microscopio electrónico de barrido (JEOLJSM-6400). Esta técnica utiliza la energía que dispersa cada elemento contenido en la ceniza de la madera para identificar y determinar la cantidad de cada elemento. Rutiaga *et al* (2000) en un estudio similar empleó un espectrómetro de energía dispersiva de Rayos X (Kevex 4000) acoplado a un microscopio electrónico de barrido (Leitz AMR 1200 B).

#### 6.7.5 Análisis estadísticos

Los resultados obtenidos de los ensayos para determinar las propiedades físicas de la madera de las especies estudiadas se analizaron con un diseño completamente al azar. La información obtenida de los análisis inmediatos se trabajaron estadísticamente con un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 2\*2\*3, siendo los factores las especies (2) *P. piscipula* y *L. castilloi*, posición de la rodaja dentro del horno (2) entrada y salida del aire y el número de quemas realizadas (3). Antes de hacer análisis de varianzas, se realizaron pruebas normalidad a los datos recabados en cada una de las pruebas con el paquete STATISTIC 7. Los datos que resultaron no presentaron distribución normal por lo que se transformaron con el arcosen de la raíz cuadrada de x ( $\arcsen\sqrt{x}$ ) con la finalidad de normalizarlos (Castillo, 2003). Una vez normalizados se le aplicó nuevamente la prueba de normalidad según el procedimiento de Kolmogorv-Smirnov.

Modelo lineal de respuesta utilizado en el análisis de varianza de los datos obtenidos

$$\gamma_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \Upsilon_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

$$i=1, 2; \quad j=1, 2; \quad k=1, 2, 3; \quad l=1, 2, \dots, 60$$

Dónde:  $\gamma_{ijkl}$  son observaciones de las variables;  $ijkl$  son los subíndices;  $\mu$  es la media;  $\tau$  el efecto del factor especie;  $\beta$  efecto del factor posición;  $\gamma_k$  efecto del factor quema;  $\tau\beta$  efecto de la interacción efecto posición;  $\tau\gamma$  efecto de la interacción especie quema;  $\beta\gamma$  efecto de la interacción posición quema;  $\tau\beta\gamma$  efecto de la interacción especie, posición y quema;  $\varepsilon$  es el error experimental (Daniel, 2009).



## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 Pruebas de normalidad

Los resultados de las pruebas de normalidad, según el procedimiento de Kolmogorv-Smirnov, se presentan en el Cuadro 1. Los valores de decisión que determinan la normalidad de los datos se presenta en la columna dos (K-s d) del Cuadro 1. Los resultados indican que todas las variables estudiadas presentaron normalidad al mostrar valores de K-s d mayor a 0.05.

Cuadro 1. Resultados de la prueba de normalidad realizada según Kolmogorv-Smirnov

Variables	K-s d <sup>1</sup>
Rendimientos (m <sup>3</sup> -t)	0.07621
Densidad básica (g cm <sup>-3</sup> )	0.10141
Contenido de humedad del Carbón (%)	0.06624
Volátil (%)	0.14323
Cenizas (%)	0.13666
Carbón Fijo (%)	0.11253
Poder Calorífico (jk/kg)	0.14441

<sup>1</sup> Prueba de normalidad de Kolmogorv-Smirnov (si el valor de K-s d > 0.05, la muestra es normal).

### 7.2 Propiedades físicas

#### 7.2.1 Densidad

La densidad básica promedio para la especie de *P. piscipula* fue de  $0.61 \pm 0.04$  g cm<sup>-3</sup> y para *L. castilloi*  $0.70 \pm 0.04$  g cm<sup>-3</sup> (Figura 14). Según la clasificación de densidad establecida por Vignote y Jiménez, (1996), la madera de ambas especies es considerada como semipesada (FAO, 1983; Romahn, 1992). Al respecto Pérez y Compean, (1989) señalan que la elevada densidad, bajo contenido de humedad, condiciones secas de operación y sitio bien drenado para el horno, son factores fundamentales para obtener buenos rendimientos y mejorar la calidad del carbón.

Los valores de densidad verde y densidad anhidra siguen la misma tendencia que la densidad básica, siendo mayor en la especie de *L. castilloi*. Los valores de densidad básica, anhidra y verde se encuentran en el Anexo 1.

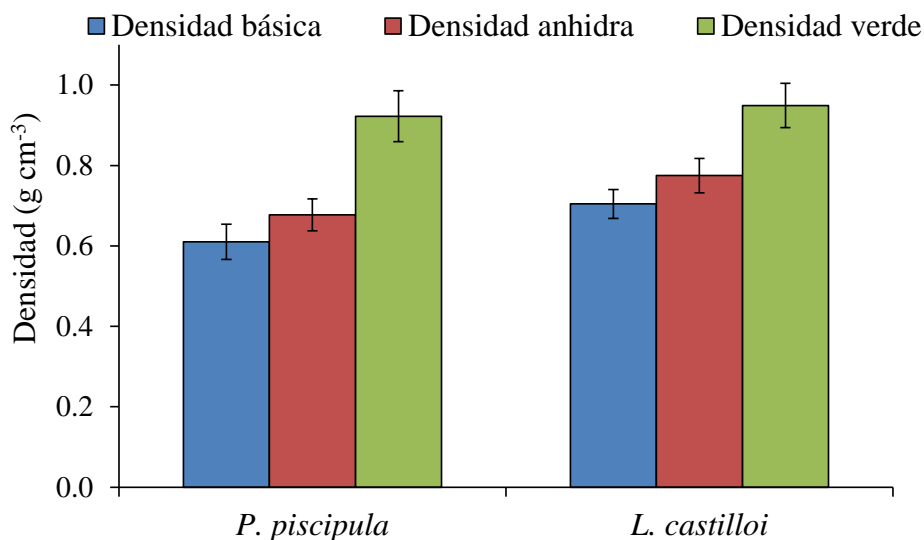


Figura 14. Densidad básica, anhidra y verde de la madera de las especies *P. piscipula* y *L. castilloi*.

### 7.2.2 Contenido de humedad

Los subproductos de la especie de *P. piscipula* al momento de inicio de la carbonización contenía un contenido de humedad promedio de  $95 \pm 18.35\%$ , mientras que la especie de *L. castilloi* contenía  $71 \pm 36.22\%$ ; los valores promedio y desviación estándar se pueden apreciar en el Cuadro 2. Según Cano *et al.*, (2003) la madera con contenido de humedad del 70 al 80% se le considera como verde; por su parte Pérez y Compean (1989) mencionan que mientras más baja sea la humedad de la madera, mejor será el rendimiento del carbón vegetal.

### 7.3. Rendimientos del carbón vegetal

El rendimiento promedio fue de  $3.1 \pm 0.63 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  de los subproductos forestales que fueron necesarios para obtener una tonelada de carbón vegetal para las dos especies. La especie de *P. piscipula* requirió en promedio de  $3.2 \pm 0.69 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  de subproducto forestal

para producir una tonelada de carbón vegetal, mientras que para *L. castilloi* requirió en promedio  $2.9 \pm 0.56 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  los valores promedio y desviación estándar se pueden apreciar en el Cuadro 2. La Figura 15 muestra los rendimientos de los subproductos forestales para producir una tonelada de carbón vegetal de las especies estudiadas. La información con valores medios y desviaciones estándar de los resultados se encuentra en el Anexo 2.

Si tomamos en cuenta el rendimiento obtenido con las rodajas de las secciones A y B, los resultados de rendimiento son mejores a los rendimientos obtenidos con el método de cubicar la madera apilada dentro del horno de fosa. La variación de los rendimientos pueden producirse al momento de determinar el volumen de los subproductos forestales, ya que las rodajas de la sección A y B son sólidas y compactas a diferencia de la leña estivada, que puede contener muchos espacios vacíos que no contemple el factor de cubicación utilizado.

Cuadro 2. Rendimiento de carbón vegetal obtenido de subproductos forestales de *P. piscipula* y *L. castilloi*

Especie	Subproductos forestales	
	Volumen ( $\text{m}^3 \text{Tm}^{-1}$ )	Contenido de humedad (%)
<i>P. piscipula</i>	$3.25 \pm 0.69$	$95.07 \pm 18.35$
<i>L. castilloi</i>	$2.92 \pm 0.56$	$70.97 \pm 36.22$

Los rendimientos calculados a partir de los subproductos forestales apilados dentro del horno tipo fosa mostraron que la madera de *P. piscipula* junto con la madera de *L. castilloi*, nos da un valor de  $5.03 \text{ m}^3$  de subproducto forestal necesario para producir una tonelada de carbón vegetal.

El rendimiento encontrado en este estudio es sumamente elevado si se compara con el reportado por Argueta (2006), que indica un rendimiento en horno de fosa de  $6.5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  de carbón en promedio con las especies de *Phytocellobium ebano* (ébano), *Haematoxylum brasiletto* (brasil) y *Sargentea gregii* (limoncillo).

García *et al.*, (2009) mencionan que los rendimientos varían de acuerdo a la sección del árbol utilizado. Es por ello que se obtiene mejor rendimiento cuando se utiliza madera de las secciones bajas y medias del fuste, en comparación a cuando se emplea las secciones altas del fuste de un árbol. Por su parte García (2010) determinó un rendimiento del carbón de *Quercus spp* en hornos colmena brasileño de  $7.5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  y  $9.1 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  en hornos metálicos, este resultado es mucho más bajo al que se obtuvo en el presente estudio con especies tropicales, en el horno tipo fosa.

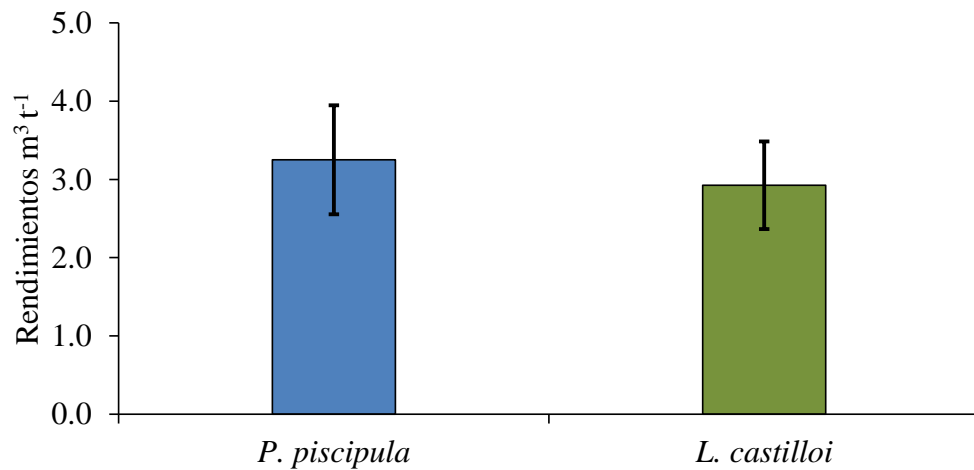


Figura 15. Rendimiento de carbón vegetal elaborado con las especies *P. piscipula* y *L. castilloi*.

Los resultados del análisis de varianza para los rendimientos, indican la existencia de diferencias estadísticas entre especies ( $p < 0.05$ ), mientras que entre quemas se presenta diferencias significativas ( $p < 0.01$ ), ver los resultados del análisis de varianza en el Anexo 4.

La Figura 16 muestra los resultados de rendimiento por especie y número de quema. Los resultados indican que la especie con menor rendimiento fue *P. piscipula* en comparación con *L. castilloi*, en relación a las diferencias en el rendimiento entre quemas, se observa que la quema uno se obtuvo un rendimiento de  $3.3 \pm 0.7 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  y en la quema tres  $3.2 \pm 0.4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ , éstas dos quemas presentaron los menores rendimientos de las especies de *P. piscipula* y *L. castilloi*, respectivamente. En la quema dos para las especies de *P. piscipula* y *L. castilloi* se obtuvo un mejor rendimiento, por lo que sólo se

requirió de  $2.7 \pm 0.6 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ , respectivamente. Lo anterior pudo ser resultado de las condiciones climáticas en que se desarrolló esta quema, aunque no era el objetivo monitorear las condiciones atmosféricas en que se realizaba la quema en el presente trabajo de investigación, si se percató que durante la quema dos se observó presencia de lluvias que no permitieron que el material disminuyera el contenido de humedad. Por otro lo que se puede observar que en la quema uno y tres los rendimientos fueron más bajos, pero el carbón resultado de esas dos quemas fue de mayor calidad a diferencia de la segunda quema en donde los rendimientos fueron mejores.

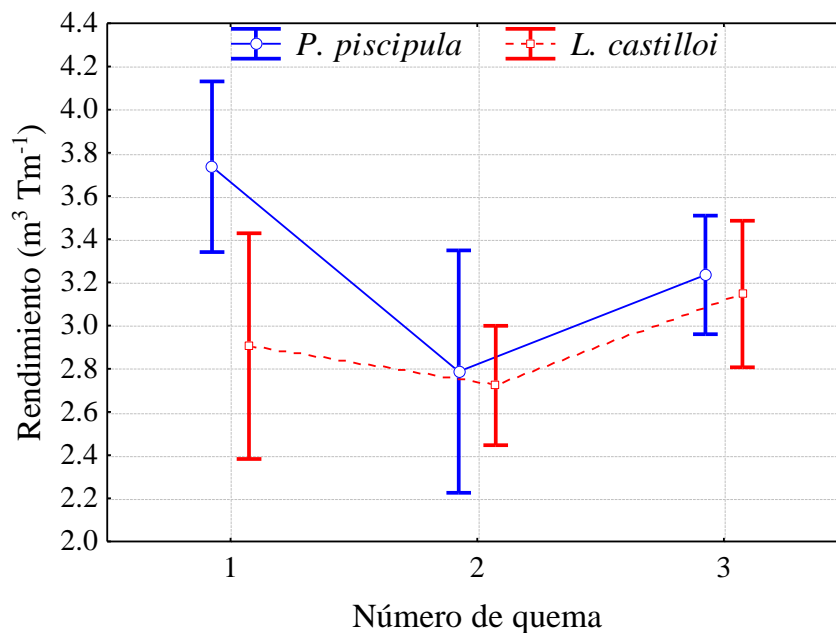


Figura 16. Rendimiento de subproductos forestales de las especies de *P. piscipula* y *L. castilloi* en las tres quemas realizadas para producir una tonelada de carbón vegetal.

#### 7.4. Análisis inmediatos

##### 7.4.1. Humedad

El porcentaje de contenido de humedad (C.H.) del carbón vegetal presentó diferencias estadísticas altamente significativas entre especies y entre quemas ( $p < 0.001$ ), según se muestra en el Anexo 5 de los resultados del análisis de varianza y se esquematiza en la Figura 17. El C.H. para *P. piscipula* fue de  $4.0 \pm 0.97\%$ , en comparación *L. castilloi* presentó un valor de  $3.1 \pm 0.69\%$  (Figura 18, Anexo 3). Por su parte Serrano (2009),

menciona que los principales criterios para la adecuación de los procesos termoquímicos son el C.H. y el contenido en cenizas.

En países como Bélgica y Francia los estándares de calidad del carbón para uso doméstico se regulan a través de las Normas NBN M11-001 y NF No. 846 respectivamente. Éstas normas permiten un C.H. máximo del 7%, en Rusia, el carbón considerado de calidad es aquel que tiene una humedad máxima del 6% según la Norma GOST 7657-84 (Petrović y Glavonjić, 2011).

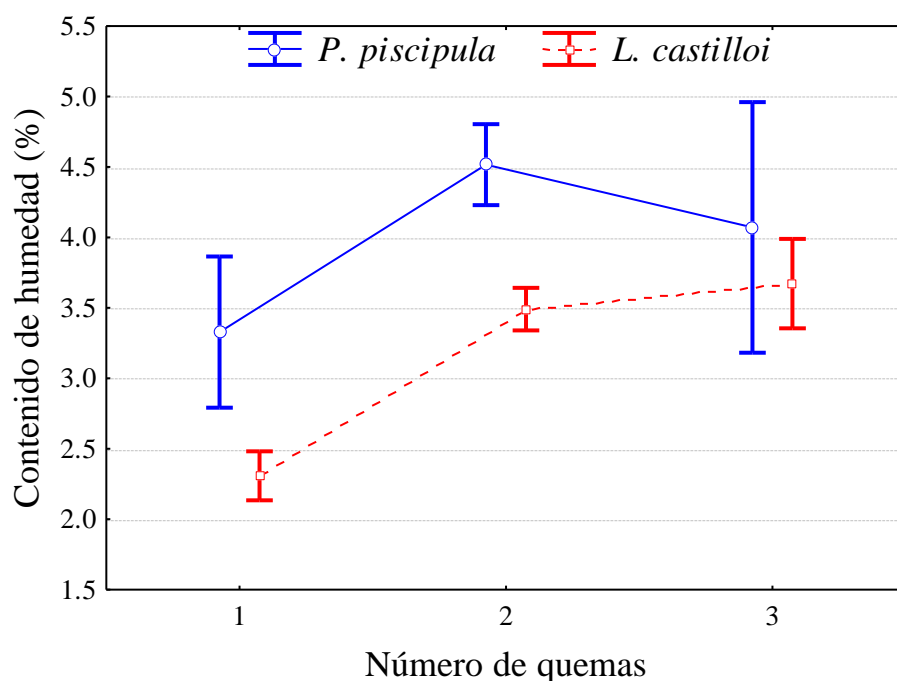


Figura 17. Contenido de humedad (%) del carbón vegetal de la especie de *P. piscipula* y *L. castilloi* en las tres quemas realizadas.

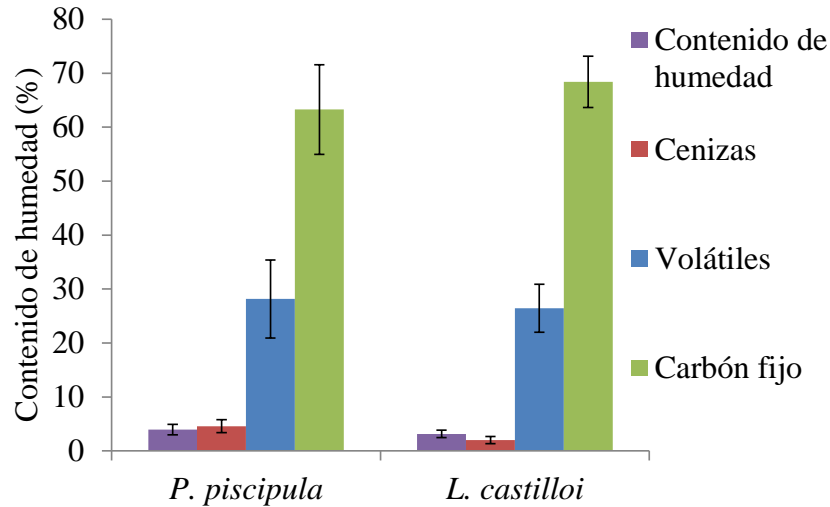


Figura 18. Contenido de humedad (%), cenizas (%), volátiles (%) y carbón fijo (%) del carbón vegetal elaborado en hornos tipo fosa de las especies de *P. piscipula* y *L. castilloi*.

#### 7.4.2. Volátiles

El contenido de volátiles (%) no presentó diferencias estadísticas significativas entre especies, presentó diferencias altamente significativas entre quemas ( $p < 0.001$ ); diferencias estadísticas entre posición ( $p < 0.05$ ) y diferencias significativas en la interacción quema-especie ( $p < 0.01$ ), ver Anexo 6. Los resultados se muestran en la Figura 19.

Los porcentajes promedios de volátiles en el carbón vegetal de la especie de *P. piscipula* fue  $28.2 \pm 7.2$  % y el de *L. castilloi* fue de  $26.4 \pm 4.4$ %. Los valores se muestran en el Anexo 3 y en la Figura 18. Los valores encontrados son superiores a los requeridos por los mercados asiáticos y otros mercados europeos que permiten para uso doméstico un porcentaje de volátiles máximo del 12%. Se considera que con este valor se mantiene en equilibrio la resistencia a la compresión, cohesión, friabilidad y fragilidad del carbón (Ayón, 2003). Según la FAO (1983), al presentar menos del 30% de material volátil, el carbón vegetal de ambas especies es considerado de buena calidad. Sin embargo, si se considera la norma DIN 51749 de Alemania que permite como máximo 16% de material volátil, las dos especies estudiadas, no serían aceptadas en dicho mercado.

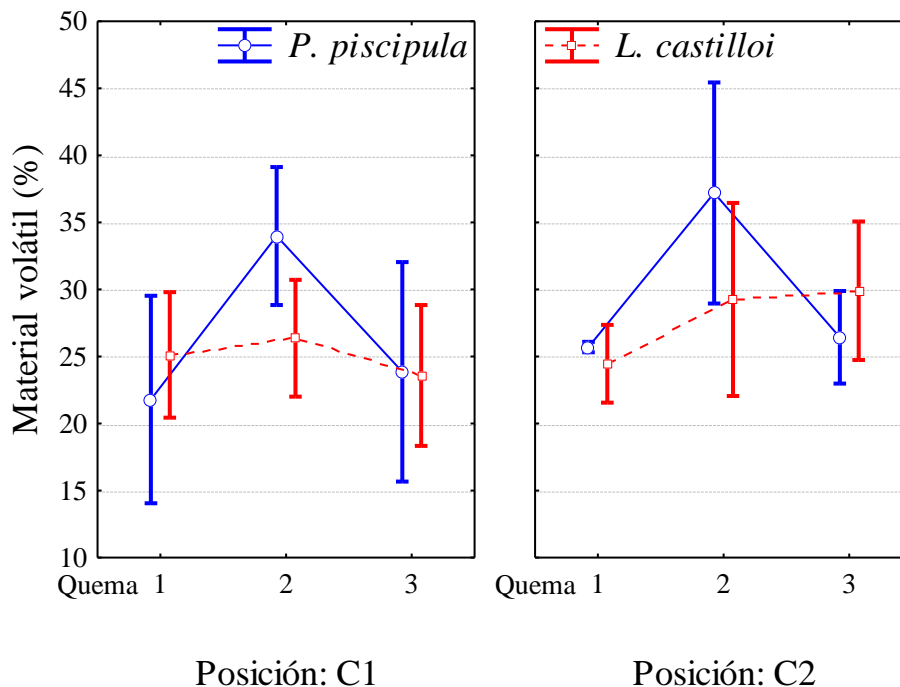


Figura 19. Porcentaje de material volátil presente en el carbón vegetal de las especies de *P. piscipula* y *L. castilloi*, elaborado en horno tipo fosa. Posición: C1 (entrada de aire), Posición: C2 (salida de humo).

#### 7.4.3. Cenizas

El contenido de cenizas (%) del carbón vegetal de *P. piscipula* y *L. castilloi* presentó diferencias altamente significativas entre especies ( $p < 0.001$ ) y diferencias estadísticas entre quemas ( $p < 0.05$ ), sin embargo entre posiciones no presentó diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ), ver Anexo 7. Los resultados del análisis de varianza se muestran en la Figura 20, en donde se observa una clara diferencia entre quemas y entre especies. El porcentaje promedio de ceniza del carbón vegetal de la especie de *P. piscipula* fue  $4.6 \pm 1.2$  % y el de *L. castilloi* fue de  $2.0 \pm 0.7$  % (Anexo 3 y Figura 18).



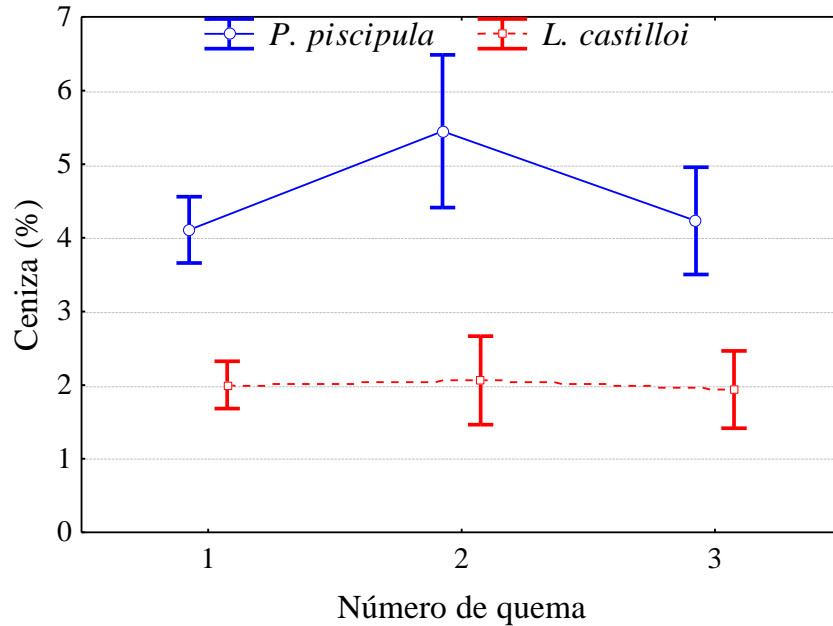


Figura 20. Porcentaje de ceniza presente en el carbón vegetal de las especies de *P. piscipula* y *L. castilloi*.

Márquez *et al.*, (2001) consideran que el poder calorífico, el bajo contenido de cenizas y volátiles, son parámetros para caracterizar la calidad del carbón. Por su parte Ahmaruzzaman (2009) indica que la ceniza producida durante la combustión de carbón vegetal en la producción de energía se considera un contaminante ambiental. Mientras que Serrano (2009) menciona que los altos contenidos de cenizas afectan la utilización del carbón vegetal y los costos globales del proceso, ya que puede reducir el rendimiento y aumentar los costos de operación y mantenimiento para la producción de energía al producir depósitos en las calderas. Sin embargo, las cenizas se pueden utilizar en la producción de fertilizantes y en algunos casos puede ser utilizada en la industria del acero o del cemento.

Los valores de contenido de cenizas del carbón de las especies *P. piscipula* y *L. castilloi*, son menores a los reportados por Guardado *et al.* (2010) en su trabajo obtuvieron valores de 6.3% en carbón de *Albizia caribea* producido en hornos metálicos. En Rusia la Norma GOST 7657-84 permite un contenido de 4.0%, en Serbia, la Norma SRPS D.B9.020 permite un contenido máximo del 5%.

#### 7.4.4. Carbón fijo

El contenido de carbón fijo (%) del carbón vegetal de *P. piscipula* y *L. castilloi* presentó diferencias altamente significativas entre especies y entre quemas ( $p < 0.001$ ), entre posiciones presentó diferencia estadística ( $p < 0.05$ ), ver Anexo 8. Los datos se muestran en la Figura 21, en donde se observa la clara diferencia entre especies, quemas y posición.

El promedio del porcentaje del carbón fijo del carbón vegetal de la especie de *P. piscipula* fue  $63.3 \pm 8.3$  % y el de *L. castilloi*  $68.4 \pm 4.7$  %, los valores se muestran en el Anexo 3 y Figura 18.

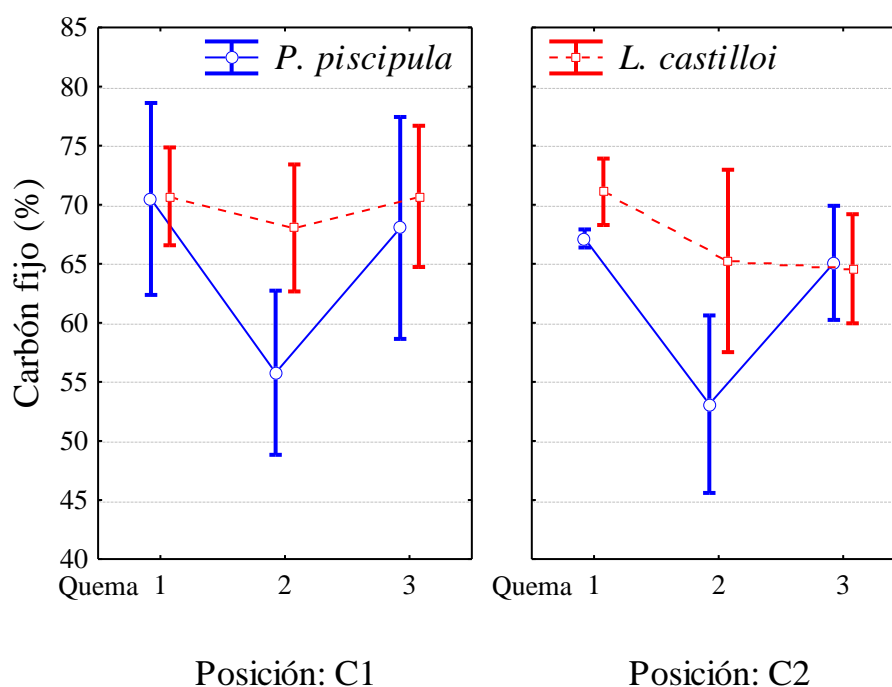


Figura 21. Porcentaje de carbón fijo del carbón vegetal de la especie de *P. piscipula* y *L. castilloi*. Posición: C1 (entrada de aire), Posición: C2 (salida de humo).

Es necesario conocer las propiedades físicas y químicas del carbón vegetal, para conocer la calidad y su uso, ya que la calidad del carbón vegetal, está en función de sus propiedades, interrelacionadas, que se miden y se evalúan por separado (FAO, 1983; Pérez y Compeán, 1989). También la calidad del carbón vegetal está basada en la coloración negro-azulado, brillante, sonido metálico que provoca al golpearse entre sí, y

al no tizar, así como mantener la forma del leño y que al prenderlo no arda ni arroje humo (Cano, *et al.*, 2003).

Por su parte Márquez *et al.*, (2001), reportaron contenidos de carbón fijo para las especies *Pinus caribea* 91.85%, *Pinus tropicalis* 91.12% y *Eucaliptus saligna* 91.55%, el experimento lo realizaron a nivel de laboratorio bajo ambiente controlado de carbonización a 700°C por 2 horas. En condiciones controladas de alta temperatura y velocidad de carbonización se logra una carbonización homogénea con alto contenido de carbón fijo. En otro estudio Ordaz (2003), encontró en el carbón de *Quercus crasifolia* producido en hornos tipo colmena que el mayor contenido de carbón fijo se presentó en la parte superior (83.2%) y media (80.6%); el menor porcentaje se encontró en la parte inferior del horno con 66.2%. El resultado obtenido en el nivel inferior fue mayor al promedio del carbón fijo obtenido con la especie de *P. piscipula*, pero menor al promedio obtenido con el carbón de la especie de *L. castilloi*. García *et al.*, (2009), obtuvieron diferencias en el carbón fijo contenido en el carbón de *Eucaliptus saligna* Smith producido en el laboratorio con valores de 83.37% a 81.948%, el material provenía de diferentes alturas del árbol. La mayor cantidad de carbón fijo se encontró en la parte más baja del árbol, en las secciones altas del árbol (punta) se encontró un menor contenido de carbón fijo, debido a que la cantidad de lignina presente disminuye con la altura del árbol.

En Bélgica se considera que el carbón de calidad para uso doméstico debe contener del 75% al 82% de carbón fijo y en Alemania este valor es a partir de 78%, según las Normas NBN M11-001 y DIN 51749, respectivamente.

#### 7.4.5. Poder calorífico

El poder calorífico del carbón vegetal de *P. piscipula* y *L. castilloi* presentó diferencias altamente significativas entre especies, entre quemas y en la interacción quema-especie ( $p < 0.001$ ), ver Anexo 9. La Figura 22 muestra la diferencia entre especies, quemas y quema-especie.

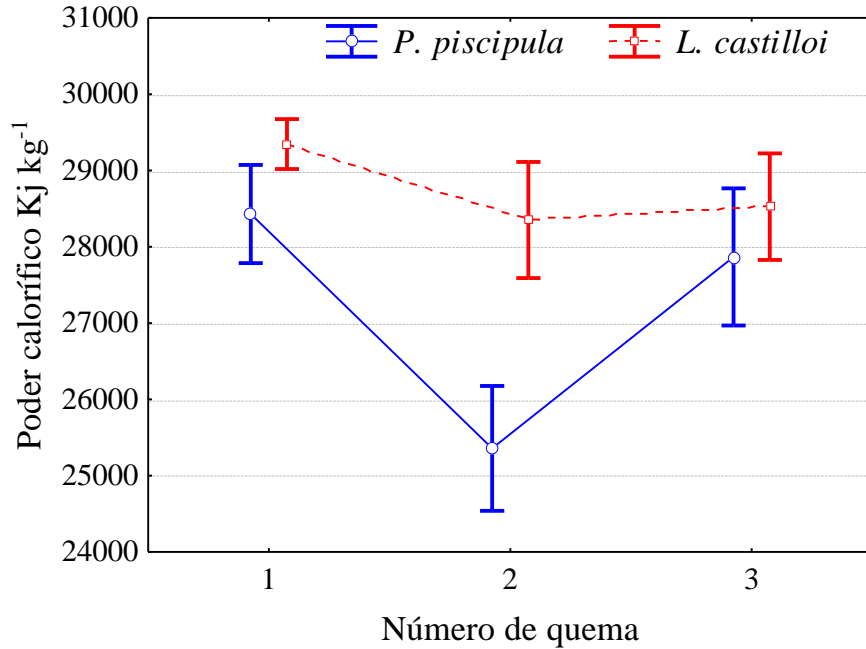


Figura 22. Poder calorífico de carbón vegetal de la especie de *P. piscipula* y *L. castilloi*.

El poder calorífico del carbón vegetal de la especie de *P. piscipula* fue  $27,218 \pm 1,730$   $\text{Kj kg}^{-1}$  y el de *L. castilloi* fue de  $28,741 \pm 952$   $\text{Kj kg}^{-1}$ , lo cual se puede apreciar en la Figura 23.

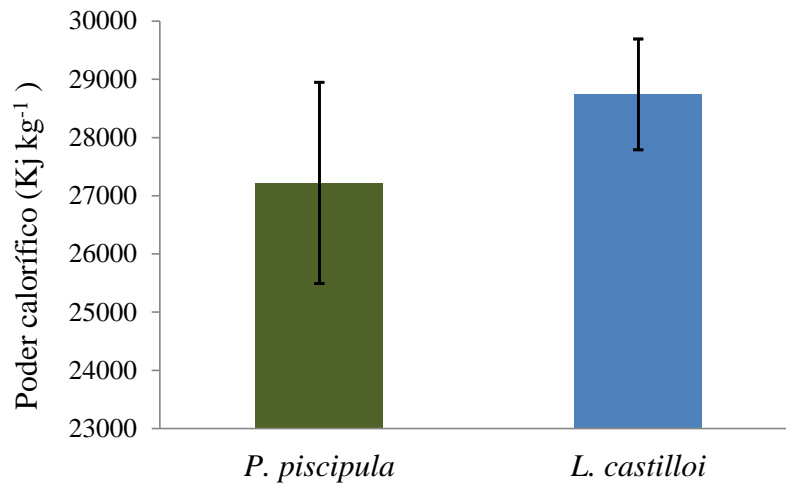


Figura 23. Poder calorífico del carbón elaborado a partir de las especies *P. piscipula* y *L. castilloi* en hornos tipo fosa.

Pérez y Compeán, (1989) mencionan que poder calorífico, es el valor de la concentración energética del carbón como combustible, por esta razón es de suma

importancia que el valor sea lo más elevado posible, estos mismos autores también mencionan que la humedad es un adulterante que disminuye el poder calorífico del carbón vegetal. Lo anterior se puede observar en la Figura 5, específicamente en la quema dos, el contenido de humedad del carbón vegetal en la especie *P. piscipula* fue mayor que en las otras quemas, por lo que el poder calorífico del carbón en esta quema fue menor, lo anterior se muestra en la Figura 24. Los subproductos utilizados en la carbonización fueron ramas, por lo tanto, el poder calorífico fue bajo, si se hubiera utilizado madera con mayor diámetro posiblemente el poder calorífico se hubiera incrementado. Por otro lado Ordaz (2003), considera que un carbón vegetal con poder calorífico mayor a 29,300 Kj kg<sup>-1</sup> es un carbón de buena calidad.

#### 7.5 Relación densidad y análisis inmediatos

La relación entre la densidad de la madera y los valores de los análisis inmediatos se presentan en la Figura 12. Los valores de R<sup>2</sup> ajustada, *p* y las ecuaciones de las regresiones realizadas entre la densidad básica de *P. piscipula* con el contenido de humedad, volátiles, cenizas y carbón fijo, se encuentran en el Anexo 10.

Para la especie *P. piscipula* (Figura 24), se muestra la relación existente entre el porcentaje de material volátil y el porcentaje de carbón fijo del carbón vegetal en la que se muestra que a mayor porcentaje de material volátil, menor porcentaje de carbón fijo. Los resultados de la regresión se encuentran el Anexo 10. La especie *P. piscipula* (Figura 24) muestra que el porcentaje de carbón fijo tiene una baja relación con la densidad básica, pero existe una mayor relación con el contenido de humedad, volátil y cenizas. A mayor densidad básica, contenido de humedad, porcentaje de volátil y porcentaje de cenizas tenemos menor contenido de carbón fijo, debido a que la relación entre los valores de densidad básica de *P. piscipula* y *L. castilloi* con los valores de contenido de humedad (%), contenido de volátil (%), contenido de ceniza (%) y con el contenido de carbón fijo (%) fue mayor con el porcentaje de cenizas. Los datos de la regresión se encuentran el Anexo 10.

Para *L. castilloi* (Figura 25), se muestra que a mayor contenido de humedad y material volátil, obtenemos menor contenido de carbón fijo, los datos de la regresión se encuentran el Anexo 11.

En la Figura 25 se presenta los resultados de las regresiones de la densidad con el porcentaje de contenido de humedad, volátiles, cenizas y carbón fijo, los valores de  $R^2$  ajustada  $p$ , y las ecuaciones se encuentran en el Anexo 11. La densidad básica de la madera presentó mayor relación con el contenido de cenizas, con un valor en la tendencia lineal de  $R^2$  ajustada de 0.1517078,  $b= -0.0228$  y  $p= 0.019102$ .

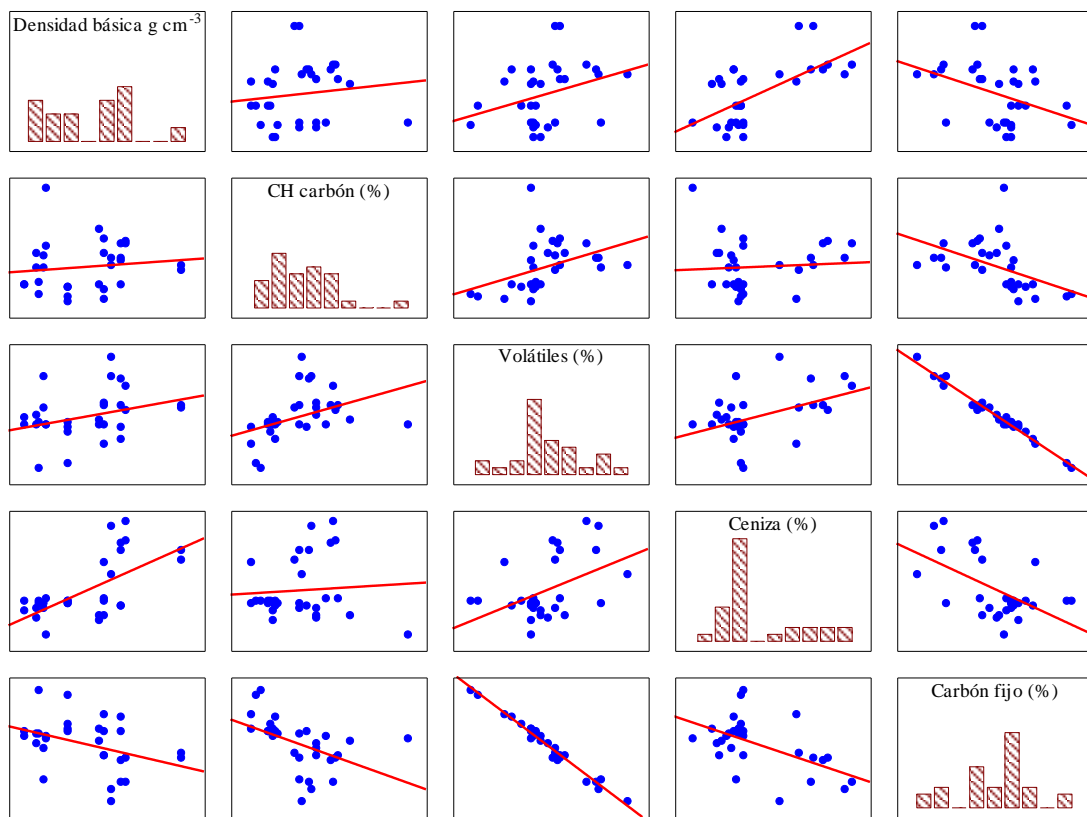


Figura 24. Gráficas de la relación entre la densidad básica con contenido de humedad (%), volátiles (%), ceniza (%) y carbón fijo (%) del carbón vegetal de la especie *P. piscipula*

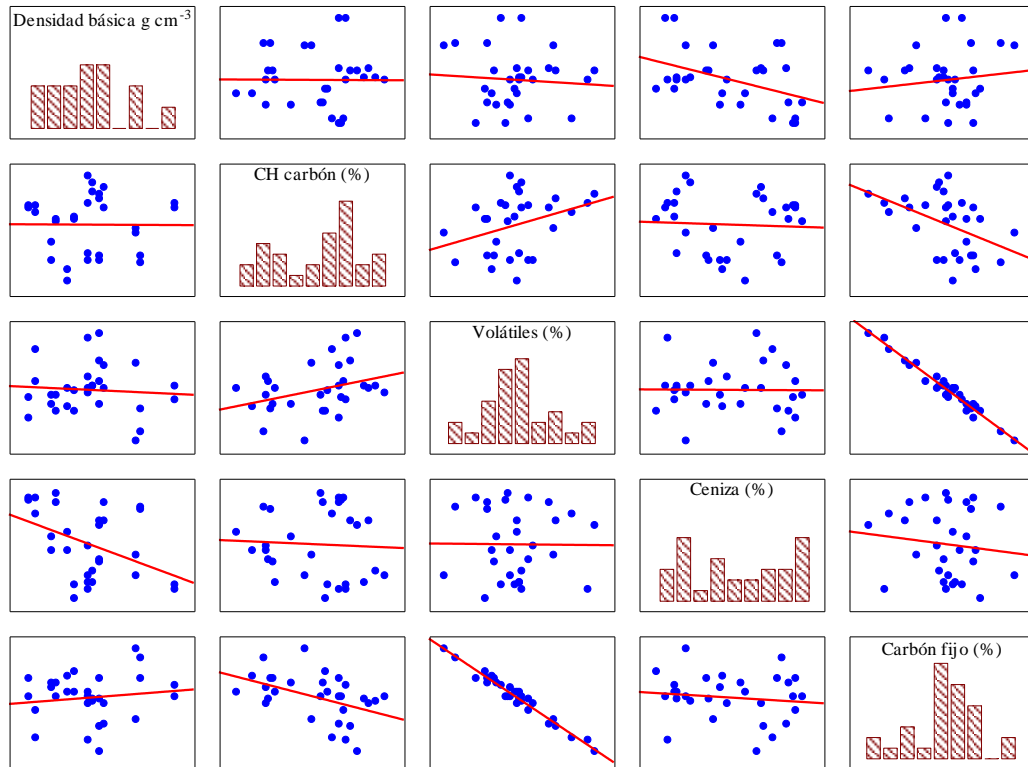


Figura 25. Gráficas de la relación entre la densidad básica con contenido de humedad (%), volátiles (%), ceniza (%) y carbón fijo (%) del carbón vegetal de la especie *L. castilloi*.

#### 7.6. Análisis elementales

El contenido de calcio y potasio fue similar en las dos especies. *P. piscipula* presentó un porcentaje de calcio de 85 % y 12 % de potasio, mientras que *L. castilloi* presentó 82 % de calcio y un 8 % de potasio. El contenido de silicio de *P. piscipula* fue de 0.0011% y *L. castilloi* 4 %. Lo anterior muestra diferencia entre especie, el sodio presente en *P. piscipula* fue de 0.97 % y para *L. castilloi* de 2.47 %. La especie *P. piscipula* presentó también los siguientes elementos: aluminio, azufre, cloro y fósforo lo que en total representan el 0.73 %, por otra parte *L. castilloi* presentó los elementos: aluminio, azufre, cloro y fósforo en un porcentaje total de 1.27 %, ver Anexo 12 y Figura 26.

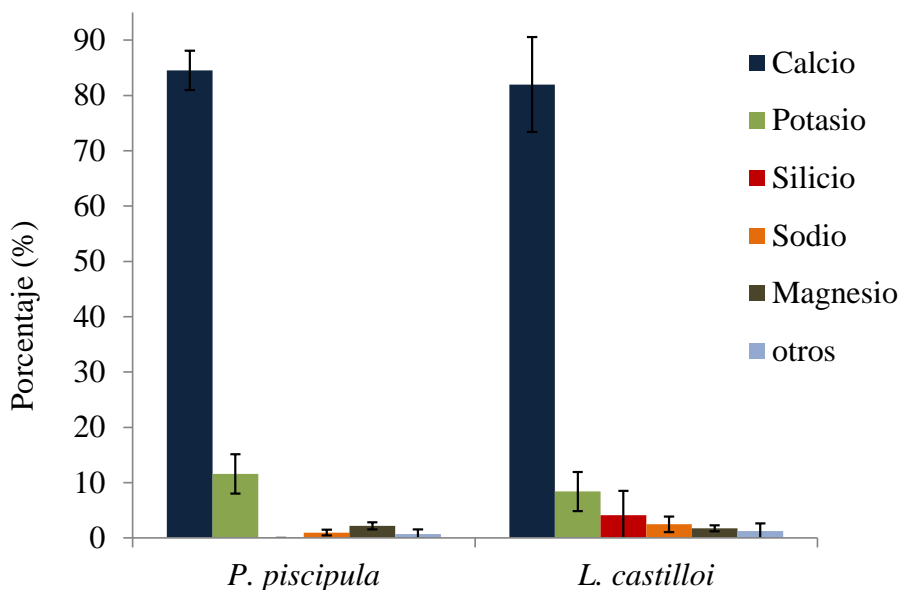


Figura 26 Porcentaje de elementos presentes en el carbón elaborado a partir de subproductos forestales de *P. piscipula* y *L. castilloi* en horno tipo fosa.

Rutiaga *et al.* (2000) realizaron pruebas con la ceniza del duramen de *Quercus candicans* Neé, en la que encontraron elementos como el K, Mg, Ca, P y Z, elementos similares a los encontrados en este estudio con los subproductos de *P. piscipula* y *L. castilloi*.

El contenido de metales alcalinos como Na, K, Mg, P y Ca es especialmente importante para varios procesos termoquímicos. En especial la reacción de estos metales con el Silicio presente en las cenizas que produce una fase líquida y pegajosa que puede provocar obstrucción en los conductos de calderas y otras instalaciones (Serrano, 2009).

Los minerales presentes en las cenizas de la madera son óxidos de diferentes elementos que determinan el grado de alcalinidad de la ceniza. Los metales pueden estar presentes en la deposición de partículas de ceniza, en las superficies de transferencia de calor de las calderas y en la cámara de combustión interna de los gasificadores durante la generación de calor y electricidad. El potasio, sodio y azufre en la ceniza de madera juegan un papel clave en la formación de depósitos y en la formación de óxidos y ácidos (Misra *et al.*, 1993). A temperaturas altas, la disociación de carbonato de potasio y la formación de vapor de óxido de potasio se incrementan por lo que el óxido de potasio



formado puede reaccionar con los elementos de la superficie para formar un enlace químico. La deposición puede ser iniciada por el carbonato de potasio y sulfato que se adhieren a las superficies más frías de los elementos metálicos para proporcionar una capa pegajosa que atrapa otras partículas sólidas como óxidos de calcio y magnesio (Misra *et al.*, 1993). En base a la bibliografía consultada la ceniza del carbón vegetal de *L. castilloi* presenta un menor contenido de potasio, por lo que presentará menor cantidad de deposición de residuos en las cámaras de deposición.

En cuanto al análisis de ceniza se puede observar que la especie *L. castilloi* presentó un menor contenido de potasio y en base a la bibliografía consultada la ceniza del carbón vegetal de *L. castilloi* presentara menor cantidad de residuos en las cámaras de deposición, en comparación con la especie de *P. piscipula*.

Elementos como el sodio, azufre y boro a diferencia de potasio, están presentes en cantidades mucho más pequeñas y su contribución a la deposición en las cámaras de deposición es mínima (Misra *et al.*, 1993).

## 8. CONCLUSIONES

El carbón vegetal de la especie *L. castilloi* presenta mejor calidad que el carbón vegetal producido con subproductos en relación con la especie *P. piscipula*, por presentar menor contenido de humedad, menor cantidad de elementos volátiles, menor contenido de cenizas y por consiguiente un mayor porcentaje de carbón fijo.

Mayor densidad de la madera y menor contenido de humedad por lo que se obtiene un mayor rendimiento y calidad de carbón vegetal; además la especie de *L. castilloi*, presentó en promedio mayor poder calorífico, además de requerir menor volumen de madera para obtener una tonelada de carbón vegetal.

En México, se carece de estándares para determinaren la calidad del carbón vegetal o estándares que puedan clasificar el producto por su calidad. Sin embargo con base a las normas de calidad de otros países, se concluye que el carbón vegetal obtenido de *P. piscipula* es de baja calidad, mientras que *L. castilloi* reúne los mínimos requisitos de aceptación de acuerdo a la Norma GOST 7657-84 de Rusia.

En el contenido elemental de la ceniza de las especies de *L. castilloi*, presenta un menor contenido de potasio, por lo aporta menor cantidad de deposición de residuos en las cámaras de los generadores de energía, lo cual prolongara la vida útil de los generadores de energía, evitando que estos se corroan a consecuencias del exceso de óxidos producidos por las cenizas acumulables en las cámaras de combustión.

## 9. RECOMENDACIONES

Con base a la experiencia obtenida en el presente estudio y con la finalidad de incrementar el rendimiento y la calidad de carbón elaborado en hornos tipo fosa se recomienda lo siguiente:

1. Utilizar madera con bajo contenido de humedad.
2. No realizar el proceso de producción de carbón vegetal en el horno tipo fosa en temporadas de lluvias. Por lo tanto se recomienda esperar a condiciones climáticas favorables, de preferencia que se elabore carbón vegetal en los meses de sequías o en menos lluviosos como en los meses de invierno y primavera. Así como también modificar la técnica de producción y diseño del horno tipo fosa, para mejorar el rendimiento y localización del carbón vegetal
3. Utilizar madera proveniente de secciones bajas de los árboles.

En relación a investigaciones futuras se recomienda:

1. Comparar la calidad del carbón producido en hornos tipo fosa por las especies de *P. piscipula* y *L. castillo* con otros tipos de hornos, como el de colmena brasileño, el horno metálico e incluso con el carbón elaborado en condiciones de laboratorio, para determinar cuáles y en qué condiciones se puede obtener mayor rendimiento y calidad.
2. Realizar más estudios del carbón vegetal producido por otras especies maderables para determinar cuál especie produce menos residuos que puedan afectar las cámaras de combustión.
3. Es recomendable elaborar una norma de calidad para el mercado mexicano.
4. Realizar análisis del mercado del carbón vegetal para conocer las necesidades de calidad de los usuarios del carbón vegetal.

En relación al uso del recurso forestal para producción de carbón se recomienda:

1. Aprovechar las áreas perturbadas por huracanes o incendios forestales para Incrementar la producción del carbón vegetal, a si también como aprovechar tocones, puntas y ramas en áreas con aprovechamiento maderables.
2. Investigar las especies de acahuales o de vegetación secundaria útiles para la elaboración del carbón vegetal, que no son utilizadas en la industria maderera.
3. Procura un buen manejo de la selva tropical de Campeche, mediante el aclareo, saneamiento, podas, entre otras labores culturales de manejo que permitan garantizar la sustentabilidad de los ecosistemas y el cumpliendo al mismo tiempo con la normatividad ecológica ante las instancias correspondiente y al mismo tiempo le permitirá al productor forestal una fuente de ingresos económicos.

## 10. LITERATURA CITADA

- Ahmaruzzaman, M. 2009. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*. 13(3):327-363.
- ASTM. D 1762-84. 2001. Standard method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia ,Pa. U.S.A. 2 p
- Argueta S, C. 2006. Descripción y análisis de dos métodos de producción de carbón vegetal en el Estado de Tamaulipas. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. Tesis. Chapingo, México. 57 p.
- Ayón, A., M. S. 2003. Los procesos de carbonización ascendente y descendente en el horno metálico CEVAG. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, Durango. pp. 14- 19.
- Banco Interamericano de Desarrollo. 2008. Informe diagnóstico Paraguay. Herramientas para mejorar la efectividad del mercado de combustibles de madera en la economía rural. PROYECTO ATN/AU – 10038. RJ. Inter-American Development Bank 1300 New York Avenue, N.W. Washington, D.C. 20577. 143 p.
- Camps, M., M y Marcos, M., F. 2008. Los Biocombustible. 2da Edición. Mundi-Prensa. Madrid, España. 383 p.
- Cano, R., M., Armendáriz O. R. y Juárez T. P. 2003. Carbón de encino. Una alternativa de producción para las zonas forestales. Folleto Científico No 1. Campo Experimental Madera. INIFAP – SAGAR. Chihuahua, México. 13 p.
- Castillo M. L. E., 2003. Introducción a la Estadística Experimental. Segunda edición. Departamento de parasitología. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. 277 pp.

- Cordero T., Márquez F., Rodríguez-Mirasol J. and Rodríguez J. J. 2001. Predicting heating Values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel* 80:1567-1571.
- Daniel, W. W. 2009. Bioestadística: Base para el análisis de la ciencias de la salud: Biostatistics: A foundation for analysis in the health sciences / Wayne W. Daniel. Limusa Wiley, Limusa Wiley .4a. edición. México. 928 p.
- DIN 51749 1989. Testing of solid fuels- Grill charcoal and grill charcoal briquettes: Requirements and test methods.
- DIN EN 52 182. 1977. Testing of wood: determination of density.
- Domac J. 2002. Bioenergía y generación de empleo. *Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. Unasylya* 211. Vol. 53. FAO. Roma, Italia. p. 3.
- FAO. 1983, Métodos simples para fabricar carbón vegetal. FAO MONTES/41. Roma, Italia. 154 p.
- FAO. 1993. El gas de madera como combustible para motores. FAO MONTES/72. Roma, Italia. 178 p.
- FAO. 2011. Lo más destacado de la madera y el carbón vegetal: 2004-2009, del Departamento de Montes de la FAO Fuente de datos: FAOSTAT-Forest STAT. 12:1-3 p.
- Flores F., R. E. y Quinteros S. 2008. Diseño de horno tipo retorta para elaborar carbón vegetal. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Tesis de Ingeniería. Antiguo Cuscatlán, El Salvador, C.A. 65 p.
- García M, J.C. 2008. Carbón de encino: Fuente de calor y energía. CONABIO. *Biodiversitas* 77:7-9
- García M., J. G. 2010. Determinación de rendimientos y calidad de carbón de residuos de *Quercuss* spp, grupo *Erythrobalanus*, en dos tipos de hornos. Tesis de

Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, Dgo. p. 91

García, R., L.; Márquez, M., M.; Aguiar, T., F.; Arauso P., L.; Carballo, A., L.; Orea, I., U.; Zanzi, R. 2009. Rendimiento de los productos de la descomposición térmica de la madera de *Eucalyptus saligna* Smith a diferentes alturas del fuste comercial. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente. 15(2): 147-154.

González, M. E. 2009. Producción de bioenergía en el norte de México: tan lejos y tan cerca. Nota crítica. Frontera Norte. 21(41):177-183.

Guardado, G., M. B.; Rodríguez, R., J. A.; Monge, H., L. E. 2010. Evaluación de la calidad del carbón vegetal producido en hornos de retorta y hornos metálicos portátiles en el Salvador. Tesis Ingeniero mecánico. Antiguo Cuscatlán, El Salvador. 67 p.

Luxán, B. A. y Jiménez, A.M. 2003. Energías e impacto ambiental. Milenium. Equipo Sirius. Madrid, España. Pp 5-143.

Márquez, M., F.; Cordero, A., T.; Rodríguez, J., M.; Rodríguez, J., J. 2001. Estudio del potencial energético de biomasa de *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* y *Pinus tropicalis* Morelet (PT); *Eucalyptus saligna* Smith (Es) y *Eucalyptus citriodora* Hook(Ec) y *Eucalyptus pellita* F. Muell (Ep); de la provincia del Pinar del Río. Revista Chapingo, serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 7(1): 83-89.

Martín, M., F. 1989. El carbón vegetal propiedades y obtención. Agroguías Mundi-prensa. Madrid, España. 117 p.

Masera, O. R., Aguillón, J. y Gamino, B. 2005. Estimación del recurso y prospectiva tecnológica de la biomasa como energético renovable en México. Anexo 2. Universidad Nacional Autónoma de México. 118 p.

- Misra MK, Ragland KW, Baker AJ. 1993. Wood ash composition as a function of furnace temperature. *Biomass and Bioenergy* 4: 103-116.
- Ordaz, H., J. C. 2003. Análisis de la calidad del carbón vegetal de encino producido en horno tipo colmena brasileño en Huayacocotla, Veracruz. Tesis licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 74 p.
- Patiño, D., J. F. y Smith, Q., R. 2008. Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistémico. In: *Revista energética*. No. 39. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. pp. 19-34.
- Pennington, T.D. y Sarukhan, J. 2005. Árboles tropicales de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Fondo de cultura económica. Tercera edición. Ediciones Científicas Universitarias. Editorial Redacta, S.A de C.V. 523 p.
- Pérez M., F.J. y Compeán G., F.J. 1989. Características físico-químicas y de producción en carbón de tres tipos de leñas de Durango. In: *Memorias de primera reunión sobre Dendroenergía*. División de Ciencias Forestales, Chapingo, México. pp. 176-184.
- Petrović, S. y Glavonjić, G. 2011. Standards and certificates for charcoal and charcoal briquettes in the function of harmonization of their quality and market development. Faculty of Forestry University of Belgrade. Kozina, 08-10.06.
- Romahn D., C. F. 1992. Principales productos forestales no maderables de México. Libro. Universidad Autónoma Chapingo. Edo de México. pp 125-161.
- Rutiaga Q, J. G; Windeisen, E; Strobel. C. 2000. Composición química del duramen de la madera de *Quercus candicans* Neé. *Madera y Bosques* 6(2): 73-80.
- SEMARNAT. 2007. Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2007. México. SEMARNAT. 224 p.
- Serrano, A., L. O. 2009. Producción de carbón vegetal mediante carboneras en zonas rurales empobrecidas. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Madrid, España. 153 p.



- Solla, G. F., Merino, A., Rodríguez, S. R. 2001. Evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un suelo ácido mediante un ensayo en laboratorio. *Investigación agraria. Producción y protección vegetales* 16: 379-394.
- Stassen, E., H. 2002. Nuevas tecnologías de producción de carbón vegetal. *Unasylya – No.211. Dendroenergía. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales.* 53(211):34 p.
- Trossero, M. A. 2002. Dendroenergía: perspectivas de futuro. *Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. Unasylya* 211. Vol. 53. FAO. Roma, Italia. p. 12.
- Vignote, S. y Jiménez, F. 1996. *Tecnología de la Madera.* Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. 606 p.
- Wolf F. y Vogel E. 1985. *Manual para la producción de carbón vegetal con métodos simples.* Facultad de Silvicultura y Manejo de Recursos Renovables. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N. L. 23 p.

## 11. ANEXOS

ANEXO 1. Densidad básica, densidad verde y densidad anhidra de la madera de *P. piscipula* y *L. castilloi*.

Especie	Densidad básica	Densidad anhidra	Densidad verde
<i>P. piscipula</i>	0.61±0.044	0.67±0.040	0.923±0.063
<i>L. castilloi</i>	0.70±0.036	0.77±0.043	0.949±0.055

Los valores representan la media ± error estándar.

ANEXO 2. Peso de la madera (kg), carbón vegetal (kg) y rendimiento en m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> de *P. piscipula* y *L. castilloi*.

Especie	Peso de madera (kg)	Peso del carbón (kg)	Rendimiento (m <sup>3</sup> t <sup>-1</sup> )
<i>P. piscipula</i>	5.81±1.437	1.66±0.484	3.25±0.698
<i>L. castilloi</i>	5.69±1.452	1.85±0.596	2.92±0.560

-Los valores representan la media ± error estándar. El peso de la madera y peso del carbón fue obtenido del peso promedio las secciones muestreadas.

ANEXO 3 Análisis inmediatos del carbón *P. piscipula* y *L. castilloi*.

Especie	CH Carbón (%)	Volátil (%)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)
<i>P. piscipula</i>	4.00±0.97	28.16±7.25	4.60±1.21	63.30±8.3
<i>L. castilloi</i>	3.15±0.69	26.45±4.44	2.00±0.67	68.40±4.75

-Los valores representan la media ± error estándar, CH carbón= contenido de humedad del carbón.

ANEXO 4. Análisis de varianza del rendimiento del carbón vegetal entre especies y quemas.

Fuente de variación	SC	Gl	CME	F	<i>p</i>
Intercepto	572.36	1	572.36	1666.45	0
Quema	3.51	2	1.76	5.11	0.0097
Especie	1.61	1	1.61	4.69	0.0353
Posición	1.11	1	1.11	3.23	0.0788
Quema*especie	1.90	2	0.95	2.76	0.0731
Quema*posición	0.14	2	0.07	0.20	0.8176
Especie*posición	0.03	1	0.03	0.09	0.7644
Quema*especie*posición	0.02	2	0.01	0.03	0.9698
Error	16.49	48	0.34		

SC= Sumatoria de cuadrados, Gl= grados de libertad, CME= cuadrado medio del error, F =f calculada y  $p \leq 0.05$ .

ANEXO 5. Análisis de varianza del contenido de humedad del carbón vegetal de *P. piscipula* y *L. castilloi*.

Fuente de variación	SC	Gl	CME	F	<i>p</i>
Intercepto	92.11	1	92.10	12231005	0.0000
Quema	0.00	2	0.00	18	0.0000
Especie	0.00	1	0.00	22	0.0000
Posición	0.00	1	0.00	0	0.9820
Quema*especie	0.00	2	0.00	1	0.2578
Quema*posición	0.00	2	0.00	0	0.8475
Especie*posición	0.00	1	0.00	0	0.8380
Quema*especie*posición	0.00	2	0.00	1	0.3662
Error	0.00	48	0.00		

SC= Sumatoria de cuadrados, Gl= grados de libertad, CME= cuadrado medio del error, F =f calculada y  $p \leq 0.05$ .

ANEXO 6. Análisis de varianza del porcentaje de volátiles en el carbón vegetal obtenido de los subproductos forestales de *P. piscipula* y *L. castilloi*.

Fuente de variación	SC	Gl	CME	F	<i>p</i>
Intercepto	77.57	1	77.57	173895.9	0.0000
Quema	0.013	2	0.00	14.9	0.0000
Especie	0.00	1	0.00	2.4	0.1305
Posición	0.00	1	0.00	6.6	0.0136
Quema*especie	0.00	2	0.00	6.9	0.0023
Quema*posición	0.00	2	0.00	0.5	0.6204
Especie*posición	0.00	1	0.00	0.0	0.8779
Quema*especie*posición	0.00	2	0.00	1.0	0.3764
Error	0.02	48	0.00		

SC= Sumatoria de cuadrados, Gl= grados de libertad, CME= cuadrado medio del error, F =f calculada y  $p \leq 0.05$ .

ANEXO 7. Análisis de varianza del porcentaje de cenizas en el carbón vegetal obtenido de leña, de *P. piscipula* y *L. castilloi*.

Fuente de variación	SC	Gl	CME	F	<i>p</i>
Intercepto	92.26	1	92.26	6134538	0.0000
Quema	0.00	2	0.00	3	0.0400
Especie	0.00	1	0.00	109	0.0000
Posición	0.00	1	0.00	0	0.5949
Quema*especie	0.00	2	0.00	3	0.0827
Quema*posición	0.00	2	0.00	0	0.9418
Especie*posición	0.00	1	0.00	0	0.5324
Quema*especie*posición	0.00	2	0.00	0	0.9799
Error	0.00	48	0.00		

SC= Sumatoria de cuadrados, Gl= grados de libertad, CME= cuadrado medio del error, F =f calculada y  $p \leq 0.05$ .

ANEXO 8. Análisis de varianza del porcentaje de carbón fijo en el carbón vegetal obtenido de leña, de *P. piscipula* y *L. castilloi*.

Fuente de variación	SC	Gl	CME	F	<i>p</i>
Intercepto	50.75	1	50.75	37462.76	0.0000
Quema	0.04	2	0.02	16.03	0.0000
Especie	0.02	1	0.02	13.12	0.0007
Posición	0.01	1	0.01	5.50	0.0232
Quema*Especie	0.01	2	0.01	6.00	0.0047
Quema*Posición	0.00	2	0.00	0.53	0.5908
Especie*Posición	0.00	1	0.00	0.01	0.9201
Quema*Especie*Posición	0.00	2	0.00	0.69	0.5070
Error	0.06	48	0.00		

SC= Sumatoria de cuadrados, Gl= grados de libertad, CME= cuadrado medio del error, F =f calculada y  $p \leq 0.05$ .

ANEXO 9. Análisis de varianza de la cantidad de poder calorífico en el carbón vegetal obtenido del subproducto forestal, de *P. piscipula* y *L. castilloi*.

Fuente de variación	SC	Gl	CME	F	<i>p</i>
Intercepto	4.70E+10	1	4.70E+10	46664.32	0.0000
Quema	4.28E+07	2	2.14E+07	21.25	0.0000
Especie	3.48E+07	1	3.48E+07	34.55	0.0000
Posición	3.96E+06	1	3.96E+06	3.94	0.0530
Quema*especie	1.64E+07	2	8.19E+06	8.14	0.0009
Quema*posición	9.49E+05	2	4.75E+05	0.47	0.6270
Especie*posición	8.28E+02	1	8.28E+02	0.00	0.9772
Quema*especie*posición	6.73E+05	2	3.37E+05	0.33	0.7174
Error	4.83E+07	48	1.01E+06		

SC= Sumatoria de cuadrados, Gl= grados de libertad, CME= cuadrado medio del error, F =f calculada y  $p \leq 0.05$ .

ANEXO 10. Valores de  $R^2$  ajustada y  $p$ , de densidad básica de la madera de *P. piscipula*, contra el (%) del CH, volátiles, cenizas y poder calorífico del carbón vegetal.

Variables	CH carbón (%)	Volátil (%)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)
Densidad_b_R <sup>2</sup>	-0.02024214	0.06749372	0.37396375	0.11368946
Densidad_b_p	0.519952 y = 2.7366x +	0.089262	0.000197	0.038435 y = -72.671x +
Ec_regresión	2.3015	y = 52.53x - 3.905	y = 17.404x - 6.029	107.63
CH_carbón R <sup>2</sup>		0.1216757	-0.0305354	0.2270647
CH_carbón_p		0.0332140 y = 2.9961x +	0.7104010 y = 0.0878x +	0.0045430
Ec-regresión		16.261	4.2463	y = -4.084x + 79.492
Volátil R <sup>2</sup>			0.18128242	0.95341580
Volátil_p			0.01097800 y = 0.0759x +	0.00000000
Ec_regresión			2.4587	y = -1.1302x + 95.1
Cenizas R <sup>2</sup>				0.239781
Cenizas_p				0.003533 y = -3.7584x +
Ec_regresión				80.541

CH carbón= contenido de humedad del carbón vegetal, Densidad b= densidad básica de la madera, Ec\_regresión= ecuación de regresión,  $R^2$ =  $R^2$  ajustada,  $p \leq 0.05$ .

ANEXO 11. Valores de  $R^2$  ajustada y  $p$ , de densidad básica de la madera de *L. castilloi*, contra el (%) del CH, volátiles, cenizas y poder calorífico del carbón vegetal.

Variables	CH_carbón (%)	Volátil (%)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)
Densidad_b_R <sup>2</sup>	-0.03566599	-0.03029987	0.15170787	-0.01318557
Densidad_b_p	0.971433 y = -0.1307x +	0.704176 y = -9.3385x +	0.019102 y = -0.0228x +	0.436715 y = 17.392x +
Ec_regresión	3.2492	33.026	0.7501	56.142
CH_carbón_R <sup>2</sup>		0.0822117	-0.0329172	0.1756300
CH_carbón_p		0.0682190 y = 2.1801x +	0.7850630 y = -0.0511x +	0.0122150 y = -3.1291x +
Ec_regresión		19.565	2.1628	78.272
Volatil_R <sup>2</sup>			-0.03564437	0.95385842
Volátil			0.96563000 y = -0.0014x +	0.00000000 y = -1.0507x +
Ec_regresión			2.0389	96.183
Cenizas R <sup>2</sup>				-0.020011
Cenizas_p				0.516822 y = -0.885x +
Ec_regresión				70.165

CH carbón= contenido de humedad del carbón vegetal, Densidad b= densidad básica de la madera, Ec\_regresión= ecuación de regresión,  $R^2$ =  $R^2$  ajustada,  $p \leq 0.05$ .

ANEXO 12. Promedio y desviación estándar de los elementos presentes en el carbón vegetal de *P. piscipula* y *L. castilloi*.

Especies	Calcio	Potasio	Silicio	Sodio	Magnesio	Otros
<i>P. piscipula</i>	84.52±3.546	11.58±3.54	0±.00	0.97±0.5325	2.18±0.632	0.73±0.832
<i>L. castilloi</i>	81.98±8.58	8.39±3.530	4.13±4.400	2.47±1.416	1.75±0.548	1.27±1.374

Los valores representan la media ± error estándar.