

## EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL ELABORADO A PARTIR DE MADERA DE ENCINO EN HORNO DE LADRILLO<sup>1</sup>

### [EVALUATION OF THE CHARCOAL QUALITY ELABORATED FROM OAK WOOD IN BRICK KILN]

Ulises Bautista Vargas, Faustino Ruiz Aquino<sup>§</sup>, Wenceslao Santiago García, Waldo Santiago Juárez

Universidad de la Sierra Juárez, UNSIJ, Av. Universidad s/n, Ixtlán de Juárez 68725, Oaxaca, México. baulich9@gmail.com, wsantiago@unsij.edu.mx, santiagow@unsij.edu.mx. <sup>§</sup>Autor para correspondencia: (ruiz.aquino@unsij.edu.mx).

#### RESUMEN

En Ixtlán, Oaxaca no se cuenta con estudios o antecedentes que proporcionen información sobre las características dendroenergéticas del carbón vegetal que se produce de manera artesanal. El objetivo fue evaluar el rendimiento y la calidad del carbón vegetal de *Quercus* sp. producido en hornos de ladrillo en tres alturas diferentes dentro del horno. Los análisis realizados durante 2016 al carbón vegetal para determinar la calidad se refirieron al contenido de humedad, material volátil, cenizas, carbono fijo y poder calorífico. Los datos se analizaron con un diseño experimental de bloques completamente al azar. Se determinó un rendimiento de  $4.4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ , contenido de humedad 3.14 %; material volátil 21.93 %; contenido de cenizas 3.16 %; carbón fijo 74.91% y poder calorífico  $30.70 \text{ MJ kg}^{-1}$ . El rendimiento fue bajo debido al alto contenido de humedad que presentaba la madera antes del proceso de carbonización. En cuanto a la calidad del carbón vegetal se encontraron indicadores mejores en el carbón de la parte superior del horno: menor contenido de humedad, menores porcentajes de volátiles y cenizas, y mayor porcentaje de carbono fijo. En su totalidad el carbón producido en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, cumple con las normas internacionales en materia de contenido de humedad y cenizas.

**Palabras clave:** Carbono fijo, dendroenergía, energía renovable.

#### ABSTRACT

In Ixtlán, Oaxaca there are no studies or antecedents that provide information about the dendroenergy characteristics of charcoal that is produced in an artisanal way. Therefore, the yield and quality of charcoal *Quercus* sp. produced in brick kiln in three different heights inside the kiln were evaluated. The analyses carried out 2016 on charcoal to determine the quality were referred to the moisture content, volatile material, ash, fixed carbon and calorific value. The results obtained were analyzed with a completely randomized experimental block design. A yield of  $4.4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  was determined, moisture content 3.14%; volatile material 21.93%; ash content 3.16%; fixed carbon 74.91% and calorific value  $30.70 \text{ MJ kg}^{-1}$ . The yield was low due to the high moisture content that the wood had before the carbonization process. In respect to the quality of the charcoal, better indicators were found in the charcoal from the upper part of the kiln: lower moisture content, lower percentages of volatiles and ash, and a higher percentage of fixed carbon. In its entirety, the

---

<sup>1</sup> Recibido: 31 de octubre de 2017.

Aceptado: 11 de diciembre de 2017

charcoal produced in Ixtlán de Juárez, Oaxaca, complies with international standards on moisture content and ash.

**Index words:** Fixed carbon, dendroenergy, renewable energy.

## INTRODUCCIÓN

El uso de leña y carbón vegetal como bioenergía comenzó hace miles de años, desde que el hombre aprendió a manejar el fuego, el carbón vegetal es considerado como una buena fuente de energía, porque es fácil de producir y manejar (Olajire *et al.*, 2012). En la actualidad la demanda de energía ha incrementado significativamente, lo que ha desencadenado un incremento en el uso de los combustibles fósiles, éstos se relacionan con los problemas ambientales como el cambio climático, altos niveles de partículas suspendidas y contaminación ambiental (Sánchez *et al.*, 2015).

La importancia del carbón vegetal radica en que es una energía renovable, capaz de desplazar el uso de combustibles fósiles, su fabricación de manera sostenible es una buena fuente de trabajo e ingresos (Fernández, 2012).

Una alternativa para contrarrestar el cambio climático es el uso de biocombustibles, cuya ventaja radica en que son energías renovables y su fabricación de manera sostenible es una buena fuente de ingresos para los productores (Fernández, 2012). Con el desarrollo de los nuevos modelos energéticos y políticas de energía, ambientales y forestales, se tiene como objetivo sustituir el uso de los combustibles fósiles con la finalidad de minimizar el incremento de emisiones de CO<sub>2</sub> que tienen como consecuencia el calentamiento global (Huang *et al.*, 2013). Una forma moderna y limpia de generar energía es la utilización de la madera y los productos de madera como el carbón vegetal, pellets, briquetas, etanol y madera torrefactada (Heya *et al.*, 2014). El uso óptimo de la madera como biocombustible debe tomar en cuenta el crecimiento y desarrollo de las especies, así como sus propiedades energéticas (Hidalgo *et al.*, 2017).

Los biocombustibles podrían abastecer hasta un 16% del consumo de energía en México para el año 2030 y de esta forma reducir 110 Mt de CO<sub>2</sub> de emisiones a la atmósfera o 23% de la mitigación total estimada para ese año (Bustamante-García *et al.*, 2014).

La biomasa forestal es la opción más viable de energía renovable, sin embargo, se requieren de estudios para la selección de especies forestales que produzcan combustibles de calidad. En el caso del carbón vegetal, la calidad está en función de la especie, sección del árbol, dimensiones de la leña, propiedades fisicoquímicas, tipo de horno, proceso de carbonización y de las condiciones ambientales durante el proceso de elaboración. La importancia de determinar la calidad radica en el cumplimiento de estándares internacionales (Ngangyo-Heya *et al.*, 2016), por ejemplo, el poder calorífico es de los factores más importantes que indican la cantidad de energía térmica que produce un combustible al quemarse (FAO, 1991) y se ve influenciado por la composición química de la madera (Jara, 1989). El contenido de humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo indican en términos porcentuales la calidad del carbón vegetal (Kretschmann *et al.*, 2007).

En México, la calidad del carbón se determina a partir de conocimientos empíricos relacionados, principalmente, con el gusto del consumidor, y al uso final que se le pueda dar (Carrillo-Parra *et al.*, 2013).

La producción de carbón vegetal ofrece la posibilidad de aprovechar grandes cantidades de madera, incluidos los residuos que se generan durante el aprovechamiento forestal y la industrialización (aserraderos, fábricas de tableros de partículas, carpinterías, etc.), las cuales tienen características heterogéneas que actualmente no tiene uso comercial (Ngangyo-Heya *et al.*, 2016).

En México, entre los años 2013 y 2014 se reporta un aumento en la producción de combustibles en forma de leña y carbón de 6.4% y 5.5%, respectivamente, lo que representa el 12.4% del volumen nacional de la producción forestal maderable (SEMARNAT, 2014).

En la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, el 29% (448,377 m<sup>3</sup>.r.) de las existencias maderables del bosque bajo manejo forestal corresponden a madera de encino (STF, 2015). El mayor porcentaje de este volumen maderable se destina como combustible en forma de leña y en forma de carbón, además, se utiliza para postes de cercas y construcciones rústicas, el aprovechamiento del encino es una fuente importante de ingresos para los silvicultores. En esta comunidad se produce carbón de encino en hornos de ladrillo con una producción aproximada de 140,000 kg por mes (Ruiz-Ángel, 2017). Sin embargo, la información sobre la calidad del carbón vegetal que se produce es nula.

El objetivo del presente estudio fue determinar el rendimiento y la calidad del carbón vegetal de *Quercus* sp. elaborado en horno de ladrillo similar al horno argentino tipo media naranja y evaluar si la posición de la madera en tres alturas diferentes dentro del horno (parte baja, media y alta) tiene efectos sobre la calidad del carbón vegetal.

## MATERIALES Y MÉTODOS

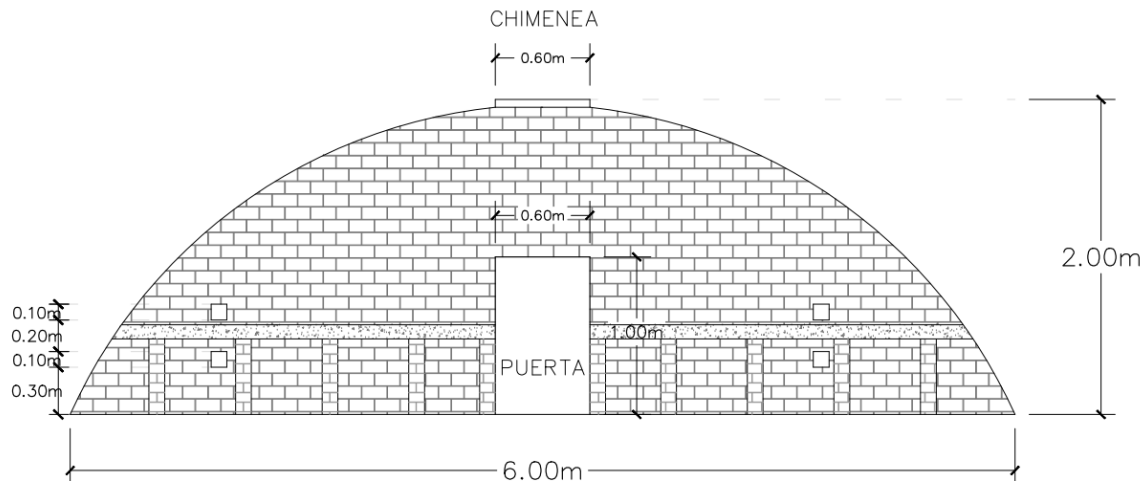
### Área de estudio

El estudio se realizó en la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, que se localiza entre las coordenadas geográficas: 17°18'16" y 17°30'00" LN; 96°31'38" y 96°22'00" LO (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2010). Según la clasificación de Köppen modificado por García (1987) el clima del bosque de pino-encino es C (m) (w'')b(i'')g, templado húmedo con lluvias en verano. La temperatura promedio anual es de 20 °C y la precipitación pluvial varía de 800 mm a 1200 mm al año (Aquino-Vásquez *et al.*, 2012).

### Características del horno, la leña y proceso de carbonización

El horno que se utilizó para la elaboración del carbón vegetal es similar al horno tipo media naranja argentino, está construido totalmente con ladrillos. La forma es semiesférica, con altura total de 2 m y diámetro en la base de 6 m, tiene una puerta orientada perpendicularmente a la dirección de los vientos predominantes con una altura de 1 m. En la parte superior tiene un agujero llamado chimenea de un diámetro de 0.60 m, la cual permite la salida del aire. El horno tiene 10 pares de ventilas cuadradas en la base de 0.10 m por lado, distribuidas alrededor del horno, las cuales permiten la circulación del aire (Figura 1).

La leña para la carbonización proviene de la zona de aprovechamiento de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, se utilizó una mezcla de *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. y *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl., especies de amplia distribución en el predio comunal de Ixtlán de Juárez (Castellanos Bolaños *et al.*, 2008; STF, 2015) y madera de alta densidad básica (Ruiz-Aquino *et al.*, 2016).



**Figura 1.** Prototipo de horno de ladrillo utilizado para la elaboración de carbón.

Antes del proceso de carbonización se seleccionaron al azar nueve trozas de dimensiones uniformes de cada encino, con estas trozas se tienen las muestras necesarias para las repeticiones (Bustamante-García *et al.*, 2013). Se determinó el contenido de humedad de la leña (Ecuación 1) (ASTM, 2007b) y la densidad básica (Ecuación 2) (ASTM, 2007a). Se realizaron cinco quemas, el horno se dividió en tres niveles de altura: parte baja desde el nivel del suelo hasta 0.7 m, parte media de 0.7 a 1.4 m y la parte alta de 1.4 a 2 m. En cada nivel altitudinal se tomaron muestras de carbón para el análisis energético, en total se analizaron 45 muestras, 15 por cada nivel de altura dentro del horno.

$$CHM\% = \frac{A - B}{B} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$Db = \frac{Po}{Vv} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde: CHM% = contenido porcentual de humedad de la madera, A = peso verde (g), B = peso anhidro al horno (g), Db = densidad básica, Po = peso de la muestra (kg), Vv = volumen verde (m<sup>3</sup>) determinado por el método de inmersión en agua.

### Rendimiento y caracterización energética del carbón vegetal

El rendimiento se determinó con el cociente del peso (kg) una vez carbonizada y el volumen (m<sup>3</sup>) de cada muestra antes del proceso de carbonización.

La calidad del carbón se determinó con base en el contenido de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo. Para estas determinaciones se utilizó carbón molido con tamaño de partícula 0.250 mm.

Para determinar el contenido de humedad del carbón se introdujo un crisol de porcelana en una mufla eléctrica a 750°C y se registró su peso inicial. Se colocó en el crisol 1 g de madera molida acondicionada, y se puso en un horno a 105°C ± 2°C por 3 h, se registró el peso después de sacar la muestra y enfriarla. El contenido de humedad del carbón está en relación con el peso inicial de

la madera de acuerdo con ASTM D 1762-84 (ASTM, 2007c)), Para calcular el contenido de humedad del carbón se utilizó la ecuación 3.

$$CHC\% = \frac{P_i - P_o}{P_i} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde: CHC = contenido de humedad del carbón (%),  $P_i$  = peso inicial de la madera (g),  $P_o$  = peso de la madera en estado anhidro (g).

El contenido de volátiles se determinó en relación con el peso anhidro mediante la ecuación 4 (ASTM, 2007c).

$$CV = \frac{P_o - P_{sv}}{P_o} \times 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde: CV = contenido de volátiles (%),  $P_o$  = peso de la madera en estado anhidro (g),  $P_{sv}$  = peso de la madera sin volátiles (g).

Para determinar el contenido de cenizas (Ecuación 5), se siguió el método ASTM D 1762-84 (ASTM, 2007c).

$$CC = \frac{P_c}{P_o} \times 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde: CC = contenido de cenizas (%),  $P_c$  = peso anhidro de las cenizas (g),  $P_o$  = peso anhidro de la madera (g).

El carbón fijo (CF) se obtuvo como la diferencia en porcentaje del material volátil (CV) y el contenido de cenizas (CC) mediante la ecuación 6 (Márquez-Montesino *et al.*, 2001).

$$CF(\%) = 100 - (CC + CV) \quad (\text{Ecuación 6})$$

El poder calorífico superior (PCS) se determinó en probetas de carbón de 1.5 cm<sup>3</sup>, se utilizó un calorímetro de chaqueta plana 1341 Parr® con base en la norma ASTM E711 (ASTM, 2000).

## Análisis estadístico

En el análisis, se emplearon tres tratamientos con 15 repeticiones cada uno. Los tratamientos fueron las trozas de *Quercus* sp. en la parte alta, media y baja del horno. Las variables a evaluar fueron el contenido de humedad, materia volátil, cenizas, carbono fijo, poder calorífico superior y poder calorífico inferior. Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar y prueba de comparación múltiple de medias (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ). Los datos se analizaron con el paquete estadístico SAS ® Version 9.0 (SAS Institute Inc., 2002).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización energética del carbón vegetal

La densidad básica promedio para las muestras de encino fue de 661 kg m<sup>-3</sup>, este valor se encuentra dentro del intervalo reportado para dos encinos en la misma zona de estudio (666 a 693 kg m<sup>-3</sup>) (Ruiz-Aquino *et al.*, 2016). También, coincide con los valores reportados por Salazar y

López (2012) 600 a 760 kg m<sup>-3</sup>. La densidad básica se clasifica como Alta de acuerdo con Sotomayor (2005), por tanto, presenta un poder calorífico mayor por unidad volumétrica (Patiño, 1989). 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.

El contenido de humedad promedio de la leña de todas las quemas que se realizaron para las especies de *Quercus* sp. antes del proceso de carbonización fue de 74 %. El rendimiento o coeficiente de transformación de leña a carbón estimado en este tipo de horno fue de 4.4 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup>, este rendimiento está estrechamente relacionado con el contenido de humedad de la madera porque mientras más bajo sea el contenido de humedad de la madera, el rendimiento del carbón será mayor (Pérez y Compean, 1989). Por su parte, Cano *et al.* (2003) mencionan que la madera con contenido de humedad del 70 al 80% se le considera como verde, esta es la razón por la que se obtuvo un rendimiento bajo de la madera en la transformación a carbón.

El rendimiento encontrado en este estudio es menor al reportado por Amílcar (2013), quien indica un rendimiento en horno tipo fosa para *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. de 3.2 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> y para *Lonchocarpus castilloi* Standl. de 2.9 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup>. En tanto que, Carrillo-Parra *et al.* (2013) reportan un rendimiento de 2.3 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> para *Ebenopsis ebano* (Berland.) y 2.8 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> para *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.). Cabe mencionar que estos autores reportan los rendimientos para madera con contenidos de humedad menores al punto de saturación de la fibra. El rendimiento del presente estudio es mayor al reportado por Bustamante-García *et al.* (2013) para el carbón de ramas de *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl. elaborado en horno colmena brasileño (9.2 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup>).

En el contenido de humedad del carbón, resultó estadísticamente diferente la parte alta al resto de los niveles (cuadro 1), estas diferencias pueden estar relacionadas con la condensación y asentamiento de alquitranes que no logran volatilizarse durante el proceso (Rojas, 2014). Sin embargo, con base en el contenido de humedad, el carbón de encino producido cumple con la norma alemana DIN 51749 < 8% (DIN, 1989) y europea EN 1860-2 < 8% (EN, 2005). Menores contenidos de humedad producen una mejor calidad del carbón debido a que la humedad disminuye el poder calorífico (FAO, 1983). En general, son deseables contenidos de humedad menores a 8% para disminuir el consumo de material para evaporar el agua y obtener un carbón menos susceptible al ataque por agentes biológicos (Heya *et al.*, 2014).

En la materia volátil al igual que el contenido de cenizas, los resultados demuestran que la parte alta presenta menor material volátil y bajo contenido de cenizas (Cuadro 1). Se prefieren combustibles con baja emisión de volátiles y bajo contenido de cenizas, los volátiles conducen al deterioro del aire y generación de contaminantes (Querol, 2008). Por el contrario, un alto porcentaje de volátiles incrementan el rendimiento, el poder calorífico, la resistencia a la compresión, la cohesión, la friabilidad y la fragilidad del carbón (Bustamante-García *et al.*, 2013).

En relación con el contenido de cenizas, el carbón producido en Ixtlán de Juárez, Oaxaca (Cuadro 1), se encuentra dentro de los límites reportados para diferentes especies: *Quercus* sp. 2.8 % (Ordaz, 2003); *P. laevigata* 2.8 % y *E. ebano* 3.2 % (Carrillo-Parra *et al.*, 2013); *P. piscipula* 4.6 % y *L. castilloi* 1.2 % (Amílcar, 2013); *Quercus laurina* 3.3 % (González, 2017). Los combustibles con elevada generación de cenizas pueden causar problemas en la utilización en

calderas de biomasa, porque la acumulación ensucia los intercambiadores de calor y obstruye el flujo de gases de combustión (Werkelin *et al.*, 2011). En relación con los estándares internacionales, el carbón del presente estudio cumple con la norma alemana DIN 51749 < 6% (DIN, 1989) y europea EN 1860-2 < 8% (EN 2005).

**Cuadro 1.** Características energéticas del carbón de *Quercus* sp.

| Nivel del horno | CH (%) | MV (%)* | CEN (%)* | CF (%)* | PCS (MJ kg <sup>-1</sup> ) | PCI (MJ kg <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|--------|---------|----------|---------|----------------------------|----------------------------|
| Media           | 3.38 a | 23.09 a | 3.74 a   | 73.17 a | 31.02 a                    | 28.62 a                    |
| Baja            | 3.30 a | 22.67 a | 3.45 a   | 73.88 a | 30.88 a                    | 27.59 a                    |
| Alta            | 2.72 b | 20.03 b | 2.28 b   | 77.69 b | 30.22 a                    | 27.53 a                    |

Se presenta la media de 15 repeticiones por cada nivel. Letras iguales en el sentido de las filas indican igualdad estadística (Tukey,  $p < 0.05$ ). CH = contenido de humedad, MV = materia volátil, CEN = cenizas, CF = carbono fijo, PCS = poder calorífico superior, PCI = poder calorífico inferior. \*Con base en el peso anhidro de las muestras

El carbono fijo resultó estadísticamente superior en la parte alta del horno, con respecto a la parte baja y media, los valores alcanzados en la parte alta (77.69%) cumplen con la norma europea EN 1860-2 < 75% (EN, 2005) y son marginalmente menores a los mínimos requeridos por la norma alemana DIN 51749 < 78% (DIN, 1989). Sin embargo, es posible incrementar el carbono fijo si se controla el proceso de elaboración de carbón *e.g.* elevar y homogeneizar la temperatura de carbonización dentro del horno (Márquez-Montesino *et al.*, 2001; Carrillo-Parra *et al.*, 2013).

Los porcentajes de carbono fijo aquí reportados están en proporción con los de *Quercus sideroxylla* 63.2 a 78.8% (Bustamante-García *et al.*, 2013); cinco especies de Tamaulipas, México 68.26 a 81.34% (Heya *et al.*, 2014); 74.6% para el carbón de duramen de *Q. laurina* y 76.4% para el carbón de albura de *Q. crassifolia* (Ruiz-Aquino *et al.*, 2015).

De acuerdo con la prueba de comparación de medias, los resultados indican que no existe diferencia significativa del poder calorífico superior (PCS) del carbón vegetal de *Quercus* sp. entre los niveles analizados ( $p > 0.05$ ) (Cuadro 1). Sin embargo, en términos absolutos, la parte media presentó el poder calorífico mayor. Los valores promedios del poder calorífico superior obtenido (30.70 MJ kg<sup>-1</sup>) se encuentra dentro de los rangos de diversos estudios sobre latifoliadas: *Quercus* sp. 30.35 MJ kg<sup>-1</sup> (Ordaz, 2003); *Prosopis laevigata* 30.24 MJ kg<sup>-1</sup> y *Ebenopsis ebano* 29.72 MJ kg<sup>-1</sup> (Carrillo-Parra *et al.*, 2013); *Quercus crassifolia* 32.4 MJ kg<sup>-1</sup> y *Quercus laurina* 32.8 MJ kg<sup>-1</sup> (Ruiz-Aquino *et al.*, 2015); (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh 30.49 MJ kg<sup>-1</sup>) (Rojas, 2014).

Con base en la clasificación propuesta por Rivera y Uceda (1987), las especies con PCS menores a 33.49 MJ kg<sup>-1</sup>, pueden ser utilizables como combustibles con buenas cualidades y según Heya *et al.* (2014), valores de PCS entre 29.0 y 35.0 MJ kg<sup>-1</sup> representan fuentes importantes de energía. En relación con el poder calorífico inferior, éste no mostró diferencias en los niveles analizados, los valores más altos corresponden a la parte media (Cuadro 1).

## CONCLUSIONES

La madera de *Q. laurina* y *Q. crassifolia* con base en su densidad básica se clasifica como Alta, sin embargo, presentó un rendimiento bajo en comparación con los valores citados para diferentes

tipos de hornos y especies estudiadas, el rendimiento bajo se atribuye al contenido de humedad alto que presentaba la leña antes del proceso de carbonización. En cuanto a la calidad del carbón vegetal se encontraron indicadores mejores en el carbón de la parte superior del horno: menor contenido de humedad, porcentajes menores de materias volátiles y cenizas y mayor porcentaje de carbono fijo. En su totalidad el carbón producido en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, cumple con las normas internacionales en materia de contenido de humedad y cenizas, y el carbón de la parte superior del horno, además, cumple con los requerimientos de carbono fijo.

### LITERATURA CITADA

- Amílcar, C. T. S. 2013. Evaluación del proceso de producción de carbón vegetal elaborado en horno tipo fosa con subproductos forestales de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. Y *Lonchocarpus castilloi* Standl. Seminarios de Posgrado. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. pp. 91-100.
- Aquino-Vásquez, C., F. Ruiz-Aquino y M. E. Fuente-Carrasco. 2012. Caracterización del patrimonio natural de la comunidad de Ixtlán de Juárez: una aproximación desde el espacio territorial. In: M.E. Fuente-Carrasco, F. Ruiz-Aquino y C. Aquino-Vásquez, eds. Conocimiento indígena contemporáneo y patrimonio biocultural en la Sierra Juárez de Oaxaca: Aportaciones empíricas y analíticas hacia la sustentabilidad. Universidad de la Sierra Juárez, México. pp. 35-59.
- ASTM. 2000. Method E711. Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. Annual Book of ASTM Standards, Volume 11.04. West Conshohocken, PA, 265-271.
- ASTM. 2007a. Method D143-94: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. ASTM International, West Conshohocken, PA, 32 p.
- ASTM. 2007b. Method D4442-07: Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 6 p.
- ASTM. 2007c. Method D 1762-84: Standard test method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2 p.
- Bustamante-García, V., A. Carrillo-Parra, H. González-Rodríguez, R. G. Ramírez-Lozano, J. J. Corral-Rivas and F. Garza-Ocañas. 2013. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. Industrial Crops and Products 42: 169-174.
- Bustamante-García, V., A. Carrillo-Parra, H. González-Rodríguez, F. Garza-Ocañas, J. A. Prieto-Ruiz, J. J. Corral-Rivas y D. J. Vega-Nieva. 2014. Tecnologías para la transformación de la biomasa en carbón vegetal. In: F. Garza-Ocañas F., J. A. Guevara González, H. Villalón-Mendoza y A. Carrillo-Parra, eds. Técnicas en el manejo sustentable de los recursos naturales. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. pp. 142-163.
- Cano, R., M. O. R. Armendáriz y T. P. Juárez. 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.
- Carrillo-Parra, A., R. Foroughbakhch-Pournavab y V. Bustamante-García. 2013. Calidad del carbón de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. Ex Willd.) M.C. Johnst. y *Ebenopsis ébano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes elaborado en horno tipo fosa. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 4(17): 62-71.



- Castellanos-Bolaños, J. F., E. J. Treviño-Garza, O. A. Aguirre- Calderón, J. Jiménez Pérez y A. Velázquez-Martínez. 2010. Diversidad arbórea y estructura espacial de bosques de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(2): 39-52.
- Castellanos-Bolaños, J. F., E. J. Treviño-Garza, O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, M. Musalem-Santiago y R. López-Aguillón, 2008. Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 14(2): 51-63.
- DIN. 1989. DIN 51749. Prüfung fester Brennstoffe-Grill- Holzkohle und Grill Holzkohle Briketts: Anforderungen und Prüfverfahren. Deutsches Institut für Normung. Taschenbuch 31. Berlin, Beuth Verlag. Germany. 4 p.
- EN. 2005. EN 1860-2. Appliances, solid fuels and firelighters for barbecuing - Part 2: Barbecue charcoal and barbecue charcoal briquettes- Requirements and test methods. The British Standards Institution European Norm. London, UK. 27 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Estudio FAO: Montes 41. Roma, Italia. 154 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1991. Conservación de Energía en las Industrias Mecánicas Forestales; FAO: Roma, Italia. 93 p.
- Fernández, A. I. 2012. Impactos de la producción clandestina de carbón vegetal sobre los patrones espaciales de degradación forestal en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, Michoacán. 165 p.
- García, E. 1987. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, UNAM. México. 217 p.
- González, S. M. 2017. Caracterización de materiales biomásicos pirolizados derivados de diferentes condiciones térmicas. Tesis de Licenciatura. Instituto tecnológico superior de Zongolica. Zongolica, Veracruz. 50 p.
- Heya, M. N., F. R. Pournavab, A. Carrillo-Parra and S. Colin-Urieta. 2014. Bioenergy potential of shrub from native species of northeastern Mexico. *International Journal of Agricultural Policy and Research* 2(12): 475-483.
- Hidalgo, F. A., J. A. Salazar y G. C. Hernández. 2017. Caracterización energética de la madera de *Acacia pennatula* Schltdl. & Cham. y *Trema micrantha* (L.) Blume. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 8(39): 71-82.
- Huang, Y., T. Chiueh, H. Kuan and L. Lo. 2013. Pyrolysis kinetics of biomass from product information. *Applied Energy* 110: 1-8.
- Jara, E. R. 1989. O Poder calorífico de Algumas Madeiras que Ocorrem no Brasil; Instituto de Pesquisas Tecnológicas São Paulo, Brasil. 6 p.
- Kretschmann, D., J. Winandy, C. Clausen, M. Wiemann, R. Bergman, R. Rowell, J. Zerbe, J. Beecher, R. White, D. McKeever and J. Howard. 2007. Wood. Kirt-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, NY. USA. 890 p.
- Márquez-Montesino, F., T. Cordero-Alcántara, J. Rodríguez-Mirasol y J. J. Rodríguez-Jiménez. 2001. Estudio del potencial energético de biomasa *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* (Pc) y *Pinus tropicalis* Morelet (Pt); *Eucalyptus saligna* Smith (Es), *Eucalyptus citriodora* Hook (Ec) y *Eucalytus pellita* F. Muell (Ep); de la provincia de Pinar del Río. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(1): 83-89.

- Ngangyo-Heya, M., R. Foroughbahchik-Pournavab, A. Carrillo-Parra, J. Rutiaga-Quñones, G. Zelinski and L. F. and Pintor-Ibarra. 2016. Calorific value and chemical composition of five semi-arid mexican tree species. *Forest* 7(58): 1-12.
- Olajire, A., K. Leung and C. Wai. 2012. Charcoal Production via Multistage Pyrolysis. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 20(3): 455-460.
- Ordaz H., J. C. 2003. Análisis del carbón vegetal de encino producido en horno tipo colmena brasileño en Huayacocotla, Veracruz. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México. 74 p.
- Patiño, V. F. 1989. Utilización del carbón vegetal. In: memorias de la Primera Reunión Nacional sobre Dendroenergía. División de Ciencias Forestales, Chapingo, México. pp. 233-261.
- Pérez, M. F. J. y G. Compean. 1989. Características físico-químicas y de producción en carbón de tres tipos de leñas de Durango. In: Memorias de Primera Reunión Nacional sobre Dendroenergía. División de Ciencias Forestales, Chapingo, México. pp. 176–184.
- Querol, X. 2008. Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Revista Española de Salud Pública* 82(5): 447-454.
- Rivera, I. P. y M. Uceda C. 1987. Características físico-químicas de la madera y carbón de once especies forestales de la Amazonia Peruana. *Revista Forestal del Perú* 14(2): 1-8.
- Rojas, D. E. 2014. Calidad del carbón vegetal de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh producido en horno metálico de tambor tipo japonés mejorado. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México. 71 p.
- Ruiz-Ángel, S. 2017. Caracterización química y propiedades energéticas de cinco especies arbóreas para la producción de dendroenergía. Tesis de Maestría. Universidad de la Sierra Juárez, Oaxaca 117 p.
- Ruiz-Aquino, F., M. M. González-Peña, J. I. Valdez-Hernández y A. Romero-Manzanares. 2016. Estructura anatómica de la madera de dos encinos de Oaxaca. *Madera y bosques* 22(1): 177-189.
- Ruiz-Aquino, F., M. M. González-Peña, J. I. Valdez-Hernández, U. S. Revilla and A. Romero-Manzanares. 2015. Chemical characterization and fuel properties of wood and bark of two oaks from Oaxaca, Mexico. *Industrial Crops and Products* 65: 90-95.
- Salazar, J. A. H. y M. E. F. López. 2012. Propiedades físico-mecánicas de la madera de cinco especies de encino del estado de Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 26(90): 5-28.
- Sánchez, L. M. S., R. R. Serna, R. J. Ocampo, J. C. Ríos-Saucedo, J. A. Sigala-Rodríguez, A. Carrillo, P. Domínguez y M. M. Fernández. 2015. Optimización calorífica en especies vegetales con potencial para la producción de biomasa dendroenergética en Durango. *AGROFAZ* 15(1): 147-154.
- SAS Institute Inc. 2002. SAS/ETS\* 9.0 User's guide. Carry. Carry, NC. SAS Institute Inc. Pp. 1023-1355.
- SEMARNAT (Secretaría de Media Ambiente y Recursos Naturales). 2014. Anuario Estadístico de la Producción Forestal. 227 p.
- STF (Servicios Técnicos Forestales de Ixtlán de Juárez). 2015. Programa de manejo forestal para el aprovechamiento y conservación de los recursos forestales maderables de Ixtlán de Juárez. Ciclo de corta 2015-2024. 432 p.

- Sotomayor, J. R. 2005. Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas. Investigación e Ingeniería de la Madera. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de la Madera 1: 3-24.
- Werkelin, J., D. Lindberg, D. Boström, B. J. Skrifvars and M. Hupa. 2011. Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples. Biomass and Bioenergy 35(1): 725-733.