



ARTÍCULO / ARTICLE

# CALIDAD DEL CARBÓN DE *Prosopis laevis* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes ELABORADO EN HORNO TIPO FOSA

## QUALITY OF CHARCOAL FROM *Prosopis laevis* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. AND *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes PRODUCED IN AN EARTH PIT KILN

Artemio Carrillo-Parra<sup>1</sup>, Rahim Foroughbakhch-Pournavab<sup>2</sup> y Verónica Bustamante-García<sup>3</sup>

### RESUMEN

La biomasa se utiliza para la generación de calor y la preparación de alimentos por aproximadamente dos mil millones de personas en el mundo. En el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León el consumo de carbón vegetal con fines recreativos tiene una demanda de 5 500 t mes<sup>-1</sup>. En México su comercialización se basa en conocimientos empíricos: especie, duración del encendido, producción de chispas y cenizas. Sin embargo, para su exportación se deben cumplir esquemas de calidad. Por lo anterior, en la presente investigación se comparó el rendimiento y calidad del carbón de *Prosopis laevis* y *Ebenopsis ebano* producido en un horno tipo fosa. La calidad se determinó mediante el contenido de humedad, material volátil, cenizas, carbón fijo y poder calorífico, en función de estándares internacionales. Los datos se analizaron con un diseño experimental con arreglo factorial. Se obtuvieron diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) en el rendimiento entre las dos especies, lo mismo que para las cenizas y el poder calorífico ( $p < 0.05$ ). Se determinó un rendimiento de 2.8, 2.3 m<sup>3</sup>t<sup>-1</sup>, contenido de humedad de 3.6, 3.5%; material volátil de 22.8, 24.9%; porcentaje de cenizas de 2.8, 3.2%; carbón fijo de 70.8, 68.6%, y poder calorífico de 30 241, 29 725 kJ kg<sup>-1</sup> para *P. laevis* y *E. ebano*, respectivamente. El rendimiento en los dos casos fue alto, el contenido de humedad y cenizas se estimó dentro de los límites establecidos a nivel mundial. El material volátil y carbón fijo no cumplieron con los porcentajes permitidos en las normas vigentes del comercio exterior.

**Palabras clave:** Carbón fijo, carbón-vegetal, *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes, horno tipo fosa, poder calórico, *Prosopis laevis* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst.

### ABSTRACT

Approximately two billion of people in the world use biomass to produce heat and prepare food. In the metropolitan area of Monterrey, Nuevo León, the demand of vegetable charcoal for recreational use is 5 500t month<sup>-1</sup>. The trade of charcoal is regulated by empirical knowledge in relation to species, burning time, and spark and ash production. However, certain quality standards must be met for export purposes. Therefore, this paper compares the yield and quality of charcoal from *Prosopis laevis* and *Ebenopsis ebano* produced in an earth pit kiln. The quality was determined by moisture content, volatile material, ash, fixed carbon and calorific value, according to international standards. The data were analyzed with a factorial arrangement. The results showed highly significant differences ( $p < 0.01$ ) in yields, as well as in ash production and calorific value ( $p < 0.05$ ), between the two species. Yields of 2.8, 2.3 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup>, moisture content of 3.6, 3.5%; volatile material of 22.8, 24.9%; ashes of 2.8, 3.2%; fixed carbon of 70.8, 68.6%, and calorific value of 30 241, 29 725 kJ kg<sup>-1</sup> were estimated for *P. laevis* and *E. ebano*, respectively. The yields for both species were high, and moisture and ash content were found to be within the international limits. On the other hand, fixed carbon and volatile material did not meet the values allowed by the international standards.

**Key words:** Charcoal, earth pit kiln, *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes, *Prosopis laevis* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst., quality, yield.

Fecha de recepción: / date of receipt: 1 de febrero de 2013. Fecha de aceptación / date of acceptance: 1 de abril 2013.

<sup>1</sup> Departamento de Tecnología de la Madera, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León Correo-e: artemio.carrillopr@uanleu.mx

<sup>2</sup> Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León

<sup>3</sup> Posgrado de la Universidad Juárez del Estado de Durango.

## INTRODUCCIÓN

La leña y el carbón vegetal han sido fuente de energía para el ser humano desde tiempos inmemoriales. El uso de la leña inició hace más de 350 000 años, cuando el hombre encendía fogatas para preparar sus alimentos y protegerse del frío y de las bestias (Antal y Grønli, 2003).

En la actualidad, la leña y otros productos de la madera son ampliamente utilizados a nivel mundial, ya que se consideran una forma moderna y limpia para generar energía (Patiño y Smith, 2008). La biomasa en sus diferentes formas abastece de esta a más de dos mil millones de personas en el mundo (PNUMA, 2010). Según datos proporcionados por Wu *et al.* (2011) 50% de la población del planeta emplea biocombustibles para obtener calor, debido a las políticas ambientales que buscan reducir los contaminantes que produce el uso de combustibles fósiles.

Los combustibles que provienen de la biomasa son leña, *pellets*, briquetas, gas, etanol, madera torrefacta y carbón vegetal. La producción del carbón vegetal es un proceso termo-químico, denominado pirólisis, que consiste en la combustión de la biomasa disponible y restringida de oxígeno, lo cual impide que sea completa. La calidad del carbón es superior a la leña; presenta alta reactividad, baja resistencia mecánica, alto poder calorífico y bajo contenido de cenizas (Romahn, 1992). Además, 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 su proceso de elaboración (Encinso, 2007).

En México, la calidad del carbón se determina a partir de conocimientos empíricos relacionados, principalmente, con el gusto del consumidor, quien la identifica de acuerdo a la presentación: a granel o empaquetado, con o sin marca (Arias *et al.*, 2010). Otros autores, indican que el mejor producto es aquel cuyo tamaño es mayor a 5 cm, su color de tonos azules brillantes, conserva la brasa durante un tiempo prolongado, emite un sonido metálico cuando se fractura o se golpea, genera pocas chispas, y produce escasa ceniza (García, 2010; Camps *et al.*, 2008).

La determinación de algunas propiedades del carbón vegetal permite establecer en qué medida la especie y los procedimientos de producción empleados favorecen el cumplimiento de lo requerido en los estándares internacionales. El método Análisis Inmediatos evalúa la calidad de la biomasa sólida en términos porcentuales de contenido de humedad, material volátil, cenizas y carbón fijo (Kretschmann *et al.*, 2007; FAO, 1983). El mercado europeo, para utilizarlo con fines industriales exige un contenido de humedad inferior a 8%, material volátil menor a 9%, ceniza menor a 8% y carbón fijo superior a 75%.

Dada la transformación térmica de la biomasa, el carbón vegetal es un material con bajo porcentaje de humedad y poca

## INTRODUCTION

Firewood and vegetable charcoal have been a source of energy for human beings from time immemorial. The use of firewood began more than 350 000 years ago, when people first lit bonfires to prepare food and to protect themselves from heat and from the beasts (Antal y Grønli, 2003).

Today, firewood and other wood products are widely used throughout the world, since they are regarded as a modern, clean way to generate energy (Patiño and Smith, 2008). Biomass in its various forms supplies energy for more than two billion people in the world (PNUMA, 2010). According to data provided by Wu *et al.* (2011), 50% of the planet's population uses biofuels to obtain heat, due to environmental policies seeking to reduce the pollutants resulting from the use of fossil fuels.

Biomass-derived fuels are firewood, pellets, briquettes, gas, ethanol, torrefied wood, and vegetable charcoal. Vegetable charcoal production is a thermal-chemical process known as pyrolysis, which consists of burning the available, oxygen-restricted biomass; this process prevents full combustion. The quality of charcoal is superior to that of firewood; it has high reactivity, low mechanical resistance, high calorific value, and low ash content (Rohman, 1992). Besides, it depends on the species, the section of the tree, the size of the firewood, the physical-chemical properties, the type of kiln or furnace, the carbonization process, and the environmental conditions during its manufacture (Encinso, 2007).

In Mexico, the quality of charcoal is determined by empirical knowledge, primarily related to the taste of the consumer, who identifies it according to its presentation: in bulk or in a package, with or without a brand (Arias *et al.*, 2010). Other authors state that the best product is that which is larger than 5 cm, has a deep color with bright blue shades, burns for a long time, rings with a metallic sound when hit or cracked, and produces few sparks and few ashes (García, 2010; Camps *et al.*, 2008).

The determination of certain properties of vegetable charcoal allows to establish the degree in which the species and the production procedures used favor compliance with what is required by the international standards. The quality of the solid biomass is assessed in terms of percentages of the moisture content, volatile matter, ashes and fixed carbon, using the method of Immediate Analyses (Kretschmann *et al.*, 2007; FAO, 1983). For industrial uses the European market demands contents of moisture under 8%, volatile matter under 9%, ashes under 8% and fixed carbon above 75%.

Given the thermal transformation of the biomass, vegetable charcoal is a material with a low percentage of moisture and low hygroscopicity; when the moisture values are above 8%, more material is consumed during combustion for the evaporation of excess water. On the other hand, high levels of volatile matter

higroscopicidad cuando los valores de humedad son mayores a 8% se consumirá mayor material durante la combustión para evaporar el exceso de agua. Por otra parte, niveles elevados de material volátil indican que la carbonización se realizó a bajas temperaturas y en forma heterogénea, lo que evitó la despolimerización y recombinación de los compuestos carbonílicos y aromáticos, fenoles y otras sustancias constituyentes del alquitrán, los cuales serán emitidos durante la combustión del carbón en forma de humo (Siddique, 2008). La ceniza es el residuo de la combustión, está constituida principalmente por elementos inorgánicos. Su generación en cantidades elevadas representa un desafío para la industria química y la producción de energía, debido a los costos y logística para su colecta, transporte, manipulación y almacenamiento (Kargbo *et al.*, 2009).

La disponibilidad de información sobre el rendimiento, la calidad del carbón vegetal producido con especies de maderas nativas del noreste de México con base en normas internacionales es escasa. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar el rendimiento y la calidad del carbón vegetal elaborado con *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. (mezquite) y *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes (ébano) en un horno tipo fosa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Recolecta del material y medición de variables

Se seleccionaron al azar cinco trozas con corteza de un metro de longitud obtenidas de la base de los árboles de *Prosopis laevigata* y *Ebenopsis ebano* en el predio "Las Palmas", municipio Villagrán, Tamaulipas. De cada troza se cortaron tres rodajas (muestras) de 10 cm de longitud y se marcaron como R1, R2 y R3. Posteriormente, se determinó el diámetro, peso verde y contenido de humedad (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valores de las variables registradas en registrada en el proceso de carbonización en hornos tipo fosa.  
Table 1. Values of the variables registered during the carbonization process in earth pit kilns.

Núm. Quema	Núm. Rodajas	Peso verde (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	C.H. (%)	Tiempo (h)	Temperatura (°C)
<i>Ebenopsis ebano</i>							
1	10	5.1±2.0	19.3±4.3	14.8±9.1	22.3±2.7	132	458
2	10	4.0±1.7	18.8±3.8	12.9±1.2	32.2±8.3	144	540
3	10	5.5±1.4	23.4±5.4	11.1±2.6	28.8±3.1	180	520
<i>Prosopis laevigata</i>							
1	10	5.5 ± 1.8	21.0 ± 4.0	14.5 ± 1.2	100.0 ± 0.0	132	458
2	10	3.6 ± 0.6	19.5 ± 2.0	10.2 ± 3.2	100.0 ± 0.0	144	540
3	10	5.1 ± 1.0	23.3 ± 3.7	10.5 ± 1.6	100.0 ± 0.0	180	520

C.H. = Contenido de humedad.  
C.H. = Moisture content.

indicate that carbonization occurred at low temperatures and heterogeneously, which prevented the depolymerization of and recombination of carbonyl and aromatic compounds, phenols, and other substances that are constitutive of tar and which will be released as smoke during combustion (Siddique, 2008). Ash is the waste of combustion and consists primarily of inorganic elements. Its generation in high amounts is a challenge for the chemical industry and for energy production, due to its high cost and to the logistics required to collect, transport, handle, and store it (Kargbo *et al.*, 2009).

Information based on international standards regarding the yield and quality of vegetable charcoal produced from wood species native to northeastern Mexico is scarce. For this reason, the objective of this paper was to determine the yield and quality of vegetable carbon manufactured from *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. (smooth mesquite) and *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes (ebony) in an earth pit kiln.

## MATERIALS AND METHODS

### Collection of materials and measurement of variables

Five 1 m long logs with bark were selected from the base of *Prosopis laevigata* and *Ebenopsis ebano* trees at "Las Palmas", in the municipality of Villagrán, Tamaulipas. Three 10 cm long slices (samples) were cut off from each log and were labeled R1, R2, and R3. Subsequently, the diameter, green weight and moisture content were determined (Table 1).

### Characteristics of the furnace

The charcoal was produced in a 3.6 m long x 1.3 m wide x 1.8 m high earth pit kiln with a metal lid and two orifices -an air inlet and a smoke outlet.

## Características del horno

El carbón se elaboró en un horno tipo fosa con dimensiones de 1.3 m de ancho x 1.8 m de alto x 3.6 m de largo, con una tapa metálica y dos orificios: uno para la entrada de aire y el otro para la salida de humo.

## Proceso de carbonización

El horno se dividió en dos niveles a partir de los orificios de entrada de aire y salida de humo. En cada uno se colocaron cinco muestras por especie (R1 y R2), que se identificaron con clavos de diferente tipo y alambre galvanizado para referenciar y comparar la calidad por nivel del horno. Las rodajas R3 se pusieron en bolsas de plástico, para evitar la pérdida de humedad; durante su traslado al Laboratorio de Tecnología de la Madera, Facultad de Ciencias Forestales, de la Universidad Autónoma de Nuevo León, y se mantuvieron a 4 °C para después determinar la densidad básica y el contenido de humedad. El proceso de carbonización se realizó en tres ocasiones con una duración promedio de 152 h., se registró la temperatura máxima alcanzada en las quemas con un termómetro infrarrojo (Cuadro 1).

## Rendimiento

El rendimiento ( $m^3 t^{-1}$ ), se determinó relacionando el volumen ( $m^3$ ) de cada muestra antes del proceso de carbonización, con su peso (t) una vez carbonizada (Cuadro 2).

Cuadro 2. Ecuaciones utilizadas para determinar el rendimiento, calidad y poder calorífico del carbón vegetal de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes en un horno tipo fosa.

Table 2: Equations used for determining the yield, quality and calorific value of vegetable charcoal from *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. and *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes in an earth pit kiln.

Variable	Fórmula	Observaciones
Rendimiento (R)	$R = \frac{V}{P}$	V= Volumen de la muestra ( $m^3$ ) P= Masa muestra carbonizada (t)
Contenido de humedad (CH)	$CH = \frac{A-B}{A} * 100$	A= Masa inicial de la muestra molida y cribada (g) B= Masa de la muestra después de someterla a 105 °C (g)
Material volátil (MV)	$MV = \frac{B-C}{B} * 100$	C= Masa de la muestra después de someterla a 950 °C (g)
Contenido de cenizas (CC)	$CC = \frac{D}{B} * 100$	D= Masa del residuo (g)
Carbón fijo (CF)	$CF = 100 - CH - MV - CC$	CH= Contenido de humedad (%) MV= Material volátil (%) CC= Contenido de cenizas (%)
Poder calorífico (PC)	$PC = 354.3 CF + 170.8 MV$	CF= Carbón fijo MV= Material volátil

## Carbonization process

The kiln was divided into two levels defined by the air inlet and smoke outlet. Five samples per species (R1 and R2) were placed in each level. The samples were identified with different type nails and galvanized wire for reference and to compare the quality by kiln level. Slices R3 were placed in plastic bags in order to avoid loss of moisture during transportation to the Tecnología de la Madera Laboratory, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, and were kept at a temperature of 4 °C in order to subsequently determine the basic density and moisture content. The carbonization process was carried out three times for an average of 152 h. The maximum temperature reached during the burnings was registered with an infrared thermometer (Table 1).

## Yield

The yield ( $m^3 t^{-1}$ ) was determined by the relationship between the volume ( $m^3$ ) of each sample previous to the carbonization process and its weight (t) after the carbonization (Table 2).

## Physical chemical properties

The material utilized for the analyses of vegetable charcoal, including the immediate ones, was taken from the carbonized slices of ripe wood, and the ASTM D 1762 - 84 (ASTM, 2001) international standard was used. The procedure consisted in

## Propiedades Fisicoquímicas

El material utilizado para los análisis al carbón vegetal, incluso los inmediatos, se tomó de la madera madura de la rodaja carbonizada, y se usó la norma internacional ASTM D 1762 - 84 (ASTM, 2001). El procedimiento consistió en determinar el contenido de humedad (%), material volátil (%), cenizas (%) y carbón fijo (%) (Cuadro 2).

Contenido de humedad. Se calculó a partir de 1.5 g del carbón molido y cribado a un tamaño de partícula de 425  $\mu\text{m}$ . La muestra se colocó en una estufa MAPASA HDO 334 por dos horas a 105 °C (Cuadro 2).

Material volátil. Se colocó la muestra de carbón libre de humedad en una mufla MARSAS AR-340 a 950 °C. Para alcanzar la temperatura final de 950 °C el material pasó por tres etapas y posiciones en la mufla. En la primera se puso en la puerta de la mufla durante dos minutos; en la segunda se movió a la entrada de la mufla por tres minutos; y en la etapa tres se ubicó en el interior de la mufla con la puerta cerrada durante seis minutos. El porcentaje del material volátil se estimó por diferencia de peso entre la masa del carbón anhidro y la masa de la muestra después de exponerla a la temperatura de 950 °C (Cuadro 2).

Contenido de cenizas. La muestra libre de humedad y material volátil se introdujo en la mufla a 750 °C durante siete horas, después, se enfrió y pesó.

Carbón fijo. Se estimó al restar el contenido de humedad, material volátil y cenizas a la masa del carbón molido y tamizado (Cuadro 2) (Márquez-Montesino *et al.*, 2001).

Poder calorífico. Se determinó al aplicar la fórmula descrita por Cordero *et al.* (2001) (Cuadro 2).

## Análisis estadísticos

Los datos porcentuales del contenido de humedad, material volátil, cenizas y carbón fijo se transformaron por medio de la función raíz cuadrada del arcoseno de  $p$ , donde  $p$  = a la proporción de la variable dependiente (Scheffler, 1981). Posteriormente, se realizaron pruebas de normalidad de los datos para cada variable, mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov. A continuación se analizaron estadísticamente con el procedimiento PROC MODEL del sistema estadístico SAS/ETS® (SAS, 2004). La significancia de los resultados se determinó con un diseño experimental y un criterio de clasificación con arreglo factorial (A\*B), en el que A representa a *P. leavigata* y *E. ebano* y B los dos niveles de posición dentro del horno (Steel y Torrie, 1980). Cuando se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0.05$ ), se hicieron pruebas de comparación de medias según Tukey.

determining the moisture content (%), the volatile material (%), ashes (%), and fixed carbon (%) (Table 2).

Moisture content. This was calculated based on 1.5 g of charcoal ground and sifted to 425  $\mu\text{m}$  particles. The sample was placed on a MAPASA HDO 334 stove for two hours at a temperature of 105 °C (Table 2).

Volatile matter. The sample of moisture-free charcoal was placed in a MARSAS AR-340 muffle furnace at a temperature of 950 °C. In order to reach the final temperature of 950 °C, the material went through three stages and positions within the muffle furnace. In the first stage, the sample was placed at the door of the muffle furnace for two minutes; in the second, it was moved to the entrance of the muffle furnace and left there for three minutes, and in the third stage, it was placed inside the muffle furnace, with the door closed, during six minutes. The percentage of volatile matter was estimated by the difference in weight between the mass of anhydrous charcoal and the mass of the sample after it had been exposed to the temperature of 950 °C (Table 2).

Ash content. The moisture-free sample and volatile matter were introduced into the muffle furnace at a temperature of 750 °C during seven hours; it was then cooled and weighed.

Fixed carbon. This was estimated by subtracting the moisture content, volatile material and ashes from the mass of the ground and sifted charcoal (Table 2) (Márquez-Montesino *et al.*, 2001).

Calorific value. This was determined by applying the formula described by Cordero *et al.* (2001) (Table 2).

## Statistical Analyses

The percentages of moisture content, volatile matter, ashes and fixed carbon were transformed by the square root function of the arc cosine of  $p$ , where  $p$  = the proportion of the dependent variable (Scheffler, 1981). Subsequently, the data for each variable were tested for normality using the Kolmogorov-Smirnov test. Next, the data were statistically analyzed with the PROC MODEL procedure of the SAS/ETS® statistical system (SAS, 2004). The significance of the results was determined with an experimental design and a classification criterion with an (A\*B) factorial arrangement, where A stands for *P. leavigata* and *E. ebano*, and B, for the position in the two levels of the kiln (Steel and Torrie, 1980). When significant differences between treatments ( $p < 0.05$ ) were found, Tukey's mean comparison tests were carried out.



## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### Rendimiento

El análisis de varianza del rendimiento mostró diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) entre especies; en cambio, en los niveles dentro del horno y las interacciones (especie\*nivel) no hubo diferencias estadísticas (Cuadro 3). El mejor valor se presentó en la leña de *E. ebano* que necesitó  $2.3 \pm 0.4 \text{ m}^3$  para producir una tonelada de carbón; mientras que *P. laevigata* requirió de  $2.8 \pm 0.7 \text{ m}^3$  (Cuadro 4). La información disponible sobre rendimientos de carbón de *Pithecellobium ebano* (Berland.) C.H. Mull. (ébano), *Haematoxylum brasiletto* H. Karst. (brasil) y *Sargentia greggii* S. Watson (limoncillo) en horno tipo fosa señala  $6.5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  (Argueta, 2006). García (2008) determinó un rendimiento de carbón de *Quercus* spp. en horno colmena brasileño de  $7.5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  y en hornos metálicos de  $9.1 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ . En otro trabajo con los de colmena brasileño se registraron rendimientos de carbón de leña en rajadas de  $5.4 \pm 0.1 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  y con ramas de  $9.2 \pm 0.2 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  (Bustamante-García *et al.*, 2013). El alto rendimiento obtenido en este estudio comparado con lo citado por otros autores se puede atribuir a la metodología empleada para su determinación, a la taxa y a la forma y dimensiones de la leña. Otro factor importante es la clase de horno, el tipo fosa empleado genera carbón con mayor peso, como resultado de tener temperaturas bajas ( $< 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ), en comparación a los de colmena brasileño que alcanzan temperaturas cercanas a los  $1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$  (Bustamante-García *et al.*, 2013).

Cuadro 3. Análisis de varianza del rendimiento ( $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$ ) del carbón de *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes producido en hornos tipo fosa.

Table 3. Analysis of variance of the yield ( $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$ ) of charcoal from *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. and *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes produced in earth pit kilns.

Fuente de variación	g.l. <sup>1</sup>	Cuadrado medio	Valor de F	Valor de p
Especie (E)	1	2.9888	8.94	0.0041
Nivel (N)	1	0.3471	1.04	0.3125
Especie*Nivel (EN)	1	0.0056	0.02	0.8979
Error	56	0.3342		

<sup>1</sup> Grados de libertad.

<sup>1</sup> Degrees of freedom.

### Propiedades fisicoquímicas

Contenido de humedad (CH). El análisis de varianza no presentó diferencias ( $p < 0.05$ ) entre especies, niveles dentro del horno e interacciones (Cuadro 5). Los valores medios del CH de ambos taxa se resumen en el Cuadro 6, así como los máximos permitidos por las normas alemana DIN 51749 (DIN 51749, 1989) y europea EN 1860-2 (EN 1860-2, 2005), y por el

## RESULTS AND DISCUSSIONS

### Yield

The variance analysis of the yield showed highly significant differences ( $p < 0.01$ ) between species; on the other hand, there were no statistical differences between the two levels of the kiln or the (species\*level) interactions (Table 3). The best value was found in firewood from *E. ebano*, of which  $2.3 \pm 0.4 \text{ m}^3$ , vs  $2.8 \pm 0.7 \text{ m}^3$  of *P. laevigata*, were required to produce a ton of charcoal (Table 4). According to the available information, the yield of charcoal from *Pithecellobium ebano* (Berland.) C.H. Mull. (ebony), *Haematoxylum brasiletto* H. Karst. (logwood) and *Sargentia greggii* S. Watson (yellow chapote) produced in an earth pit kiln is  $6.5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  (Argueta, 2006). García (2008) determined the yield of charcoal from *Quercus* spp when produced in a Brazilian beehive kiln as  $7.5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ , and as  $9.1 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  when in a metal furnace. Another paper on Brazilian beehive kilns registered yields of  $5.4 \pm 0.1 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  for charcoal from sliced firewood, and  $9.2 \pm 0.2 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  for charcoal from branches (Bustamante-García *et al.*, 2013). The high yield obtained in this study compared to yields quoted by other authors can be attributed to the methodology utilized to determine it, to the taxa and to the shape and size of the firewood. Another important factor is the type of kiln or furnace used; earth pit kilns produce a heavier charcoal as a result of their lower temperatures ( $< 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ) compared to Brazilian beehive kilns, which reach temperatures almost as high as  $1\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$  (Bustamante-García *et al.*, 2013).

Cuadro 4. Rendimiento ( $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$ ) del carbón de *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes producido en hornos tipo fosa.

Table 4. Yield ( $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$ ) of charcoal from *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. and *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes produced in earth pit kilns.

Propiedad	Especie	
	<i>Prosopis laevigata</i>	<i>Ebenopsis ebano</i>
Rendimiento ( $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$ )	$2.8 \pm 0.7 \text{ a}^1$	$2.3 \pm 0.4 \text{ b}$

Los valores representan la media  $\pm$  error estándar. <sup>1</sup>Medias con diferente letra, son diferentes estadísticamente;  $n=30$ .

Values represent the mean  $\pm$  standard error. <sup>1</sup>Values with different letters are statistically different;  $n=30$ .

### Physical chemical properties

Moisture content (MC). The variance analysis showed no differences ( $p < 0.05$ ) between species, levels within the kiln or interactions (Table 5). MC levels for both taxa are summarized in Table 6, as are the maximum levels allowed by the German standard DIN 51749 (DIN 51749, 1989) and the European standard EN 1860-2 (EN 1860-2, 2005), as well as by the Japanese market. The mean value of the two species is below the maximum value allowed by these standards.

mercado japonés. El valor medio de las dos especies es menor al máximo permitido por dicha normatividad.

Material volátil. El análisis de varianza no evidenció diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre especies, niveles dentro del horno e interacciones (Cuadro 7). El valor medio de *Prosopis laevigata* y *Ebenopsis ebano* es mayor al material volátil máximo permitido por las normas alemana y europea y por el mercado japonés. Según Siddique (2008), cantidades altas de material volátil indican que el proceso de carbonización fue heterogéneo y se realizó con temperaturas bajas; por lo tanto, los alquitranes no se volatilizaron durante el proceso y serán liberados cuando se lleve a cabo la combustión del carbón. Conforme aumenta el porcentaje de material volátil, se 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). Para reducir el material volátil en el proceso de carbonización, en un horno tipo fosa, se requiere elevar la temperatura en su interior, lo que se consigue al aumentar el

Cuadro 6. Propiedades fisicoquímicas del carbón de *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes y los valores máximos permitidos por las normas alemana y europea, y por el mercado japonés.

Table 6. Physical chemical properties of charcoal from *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. and *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes and maximum values allowed by the German and European standards and by the Japanese market.

Propiedades físico-químicas	Especie		Valor requerido por Normas		
	<i>Prosopis laevigata</i>	<i>Ebenopsis ebano</i>	DIN 51749 <sup>2</sup>	EN 1860-2	Mercado Japonés
Contenido humedad (%)	3.6±0.3d	3.5±0.4a	8.0	8.0	7.5
Material Volátil (%)	22.8±4.6a	24.9±4.4b	16	9	12
Contenido de cenizas (%)	2.8±0.7b	3.2±0.7a	6	8	4
Carbón fijo (%)	70.8±4.5a	68.4±4.6a	78	75	76
Poder calorífico (kJ kg <sup>-1</sup> )	30 241±778a	29 725±888b	27 754 <sup>3</sup>	29 115 <sup>4</sup>	30 539 <sup>5</sup>

<sup>1</sup>Especies con igual letra en cada propiedad fisicoquímica indica igualdad estadística ( $p < 0.5$ ). <sup>2</sup>DIN 51749 (1989), EN 1860-2 (2005). <sup>3</sup>*Prosopis glandulosa* Torr., <sup>4</sup>*P. velutina* Wooton, <sup>5</sup>*P. juliflora* auct.non (Sw) DC. (Duarte y Fernandez, 2002).

<sup>1</sup>Species with the same letter for each physical chemical property are indicative of statistical equality ( $p < 0.5$ ). <sup>2</sup>DIN 51749 (1989), EN 1860-2 (2005). <sup>3</sup>*Prosopis glandulosa* Torr., <sup>4</sup>*P. velutina* Wooton, <sup>5</sup>*P. juliflora* auct.non (Sw) DC. (Duarte y Fernandez, 2002).

Cuadro 7. Análisis de varianza del material volátil (%) del carbón de *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes producido en hornos tipo fosa.

Table 7. Variance analysis of the volatile matter (%) of charcoal from *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. and *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes produced in earth pit kilns.

Fuente de variación	g.l. <sup>1</sup>	Cuadrado medio	Valor de F	Valor de p
Especie ( E )	1	31.3104	3.03	0.0870
Nivel (N)	1	9.7239	0.94	0.3359
Especie*Nivel (EN)	1	2.6980	0.26	0.6111
Error	56	10.3195		

<sup>1</sup> Grados de libertad.

<sup>1</sup> Degree of freedom.

Cuadro 5. Análisis de varianza del contenido de humedad (%) del carbón de *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes producido en hornos tipo fosa.

Table 5. Variance analysis of the moisture content (%) of charcoal from *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. and *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes produced in earth pit kilns.

Fuente de variación	g.l. <sup>1</sup>	Cuadrado medio	Valor de F	Valor de p
Especie ( E )	1	0.7070	2.27	0.1379
Nivel (N)	1	0.0255	0.08	0.7759
Especie*Nivel (EN)	1	0.0053	0.17	0.6813
Error	56	0.3121		

<sup>1</sup>Grados de libertad.

<sup>1</sup>Degrees of freedom.

Volatile matter. The variance analysis showed no significant variances ( $p < 0.05$ ) between species, kiln levels or interactions (Table 7). The mean value for *Prosopis laevigata* and *Ebenopsis ebano* is above the maximum volatile material allowed by the German and European standards and by the Japanese market. According to Siddique (2008), high amounts of volatile material indicate a heterogeneous carbonization process at low temperatures; therefore, tars were not volatilized during the process and will be released when the charcoal is burnt. As the percentage of volatile matter increases, so do the yield, calorific value, resistance to compression, cohesion, as well as the friability and fragility of the charcoal (Bustamante-García *et al.*, 2013). In order to reduce the amount of volatile matter during the carbonization process in an earth pit kiln, the temperature within must be raised; this is attained by increasing the passage of air. However, this requires a larger volume of firewood, which reduces the yield.

paso del aire; sin embargo, se consumirá mayor volumen de leña y con ello se reducirá el rendimiento.

Contenido de cenizas. El análisis de varianza mostró diferencias ( $p < 0.05$ ) entre especies; no así, en el caso de los niveles e interacciones (Cuadro 8). Los resultados evidencian que el contenido de cenizas de ambos taxa fue menor al porcentaje máximo permitido por las normas DIN 51749 (DIN 51749, 1989), EN 1860-2 (EN 1860-2, 2005) y por el mercado japonés (Cuadro 6). La importancia de presentar valores bajos de contenido de cenizas, responde a que su acumulación puede causar problemas en los reactores, pues ensucian los intercambiadores de calor y obstruyen el flujo de gases de combustión (Werkelin *et al.*, 2011). Además, la ceniza tiene una reacción alcalina que cuando se mezcla con el agua, el pH de la solución se incrementa e induce la corrosión del metal (Karlton *et al.*, 2008) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Análisis de varianza del contenido de ceniza del carbón de *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes producido en hornos tipo fosa.

Table 8. Variance analysis of the ash content of charcoal from *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. and *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes produced in earth pit kilns.

Fuente de variación	g.l. <sup>1</sup>	Cuadrado medio	Valor de F	Valor de p
Especie ( E )	1	6.1390	4.67	0.0350
Nivel (N)	1	0.3487	0.27	0.6086
Especie*Nivel (EN)	1	0.0472	0.04	0.8504
Error	56	1.3152		

<sup>1</sup>Grados de libertad

<sup>1</sup>Degrees of freedom.

Carbón fijo. Los resultados indican que no hubo diferencias ( $p < 0.05$ ) (Cuadro 9). El porcentaje de carbón fijo es menor al valor mínimo establecido en las normas y mercado usadas como punto de referencia. Un bajo contenido de carbón fijo aumenta la friabilidad y fragilidad; y disminuye la resistencia a la compresión y cohesión (Demirbas, 2003). Para incrementar los valores de carbón fijo se debe llevar la temperatura de carbonización, condición que es complicada de regular en hornos de fosa, ya que se carece de orificios auxiliares "huidos", como los que hay de tipo colmena brasileño.

Poder calorífico. El análisis de varianza mostró diferencias ( $p < 0.05$ ) entre especies; en cambio, no las los niveles dentro del horno y las interacciones (Cuadro 10). Los valores medios resultaron similares a lo registrado por Duarte y Fernández (2002) para seis especies de *Prosopis*.

Ash content. The variance analysis showed differences ( $p < 0.05$ ) between species, but not between the levels or interactions (Table 8). The results show that the ash content of both taxa was lower than the maximum percentage allowed by the DIN 51749 (DIN 51749, 1989) and EN 1860-2 (EN 1860-2, 2005) standards and by the Japanese market (Table 6). The importance of presenting low values of ash content resides in the fact that their accumulation may cause problems in the reactors, since the ashes can clog the heat exchangers and obstruct the flow of combustion gases (Werkelin *et al.*, 2011). Furthermore, ash has an alkaline reaction which, when it is mixed with water, increases the pH of the solution and induces corrosion of the metal (Karlton *et al.*, 2008) (Table 8).

Fixed carbon. The results indicate no differences ( $p < 0.05$ ) (Table 9). The percentage of fixed carbon is lower than the minimal value established in the standards and market utilized as reference points. A low content of fixed carbon increases the friability and fragility, and reduces the resistance to compression and the cohesion (Demirbas, 2003). In order to increase the values of fixed carbon, the carbonization temperature must be raised; however, its regulation is complicated when utilizing earth pit kilns, since these lack auxiliary openings orifices like the "tatus" present in Brazilian beehive kilns.

Cuadro 9. Análisis de varianza del carbón fijo del carbón de *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes producido en hornos tipo fosa.

Table 9. Variance analysis of the fixed carbon of charcoal from *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. and *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes produced in earth pit kilns.

Fuente de variación	g.l. <sup>1</sup>	Cuadrado medio	Valor de F	Valor de p
Especie ( E )	1	31.9225	3.66	0.0608
Nivel (N)	1	9.5017	1.09	0.3010
Especie*Nivel (EN)	1	1.7570	0.2	0.6552
Error	56	8.7189		

Calorific value. The variance analysis showed differences ( $p < 0.05$ ) between the species, but not between the kiln levels or the interactions (Table 10). The mean values were similar to those registered by Duarte and Fernández (2002) for six species of *Prosopis*.

## CONCLUSIONS

Vegetable charcoal made with firewood from *Prosopis laevigata* and *Ebenopsis ebano* had high yields compared to the values quoted for different species and types of kilns or furnaces.



Cuadro 10. Análisis de varianza del poder calorífico del carbón de *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes producido en hornos tipo fosa.

Table 10. Variance analysis of the heat power of charcoal from *P. laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. and *E. ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes produced in earth pit kilns.

Fuente de variación	g.l. <sup>1</sup>	Cuadrado medio	Valor de F	Valor de p
Especie ( E )	1	3991253.599	5.66	0.0207
Nivel (N)	1	856453.414	1.22	0.2750
Especie*Nivel (EN)	1	127804.081	0.18	0.6718
Error	56	704651.27		

<sup>1</sup>Grados de libertad.

<sup>1</sup>Degrees of freedom.

## CONCLUSIONES

El carbón vegetal elaborado con leña de *Prosopis laevigata* y *Ebenopsis ebano* presentó altos rendimientos en comparación con los valores citados para diferentes especies y tipos de horno.

La calidad del carbón, en términos fisicoquímicos, se sitúa dentro de los intervalos establecidos para un carbón vegetal de calidad, en relación con el contenido de humedad y porcentaje de cenizas; sin embargo, los valores del material volátil y carbón fijo de ambas especies no corresponden con las normas internacionales tomadas como referencia.

El poder calorífico del carbón elaborado con *P. laevigata* y *E. ebano* coincide con los valores documentados en la literatura para seis especies de *Prosopis*.

La calidad del carbón de ambas especies puede incrementar, si se consideran aspectos operativos durante el proceso de carbonización como elevar la temperatura para reducir el porcentaje de material volátil y aumentar el carbón fijo; sin embargo, se reduciría el rendimiento. 🍃

## REFERENCIAS

Antal, M. J. and M. Grønli. 2003. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 42 (8): 1619-1640.

Argueta S., C. 2006. Descripción y análisis de dos métodos de producción de carbón vegetal en el estado de Tamaulipas. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. DICIPO. Chapingo, Edo. de Méx. México. 92 p.

American Society for Testing and Materials (ASTM). 2001. Standard methods for chemical analysis of wood charcoal, ASTM D1762-84 reprobada 2001. Philadelphia, PA. USA. 2 p.

The physical chemical quality of the charcoal is within the intervals established for a high-quality vegetable charcoal in terms of moisture content and percentage of ash; however, the values for volatile matter and fixed carbon of the two species fail to meet the international standards utilized as reference.

The calorific values of charcoal from *P. laevigata* and *E. ebano* coincide with those documented in the literature for six species of *Prosopis*.

The quality of the charcoal from both species may be increased, provided that certain operative aspects are considered during the carbonization process, e.g. raising the temperature in order to reduce the percentage of volatile material and increase the fixed carbon levels; however, doing this will reduce the yield. 🍃

End of the English version

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.

Camps, M., M. F. Hernández Á. y F. Marcos M. 2008. Los Biocombustibles. Mundi- Prensa. Madrid, España. 361 p.

Cordero, T., F. Marquez, J. Rodriguez-Mirasol and J. J. Rodriguez. 2001. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel* 80(11):1567-1571.

Demirbas, A. 2003. Sustainable cofiring of biomass with coal. *Energy Conversion and Management*. 44 (9):1465-1479.

Deutsches Institut für Normung (DIN).1989. Prüfung fester Brennstoffe-Grill-Holz Kohle und Grill Holz Kohle Briquets: Anforderungen und Prüfverfahren. Deutsches Institut für Normung. Taschenbuch 31. Berlin, Beuth Verlag Germany. 4 p.

Duarte P., J. C., y P. C. Fernández L. 2002. Comparação da qualidade da madeira de seis espécies de algarobeira para a produção de energia. *Boletim de Pesquisa Florestal*. 45:99-107.

European Norm (EN). 2005. EN 1860-2. 2005. Appliances, solid fuels and firelighters for barbecuing - Part 2: Barbecue charcoal and barbecue charcoal briquettes- Requirements and test methods. The British Standards Institution. London, UK. 27 p.

Encinso E., E. 2007. Guía para el uso y aprovechamiento de la biomasa en el sector forestal. Año 2007, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Montaraz Kik S. L. Madrid, España. 38 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO). 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal. <http://www.fao.org/docrep/X5328S/X5328S00.htm#Contents>. (29 de marzo de 2013).

García M., J. G. 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 *Quercus* spp, grupo *Erythrobalanus*, en dos tipos de hornos. Tesis de Maestría. Maestría, Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, Dgo. México. 78 p.

Kargbo, F. R., J. Xing and Y. Zhang. 2009. Pretreatment for energy use of rice straw: A review. *African Journal of Agricultural Research*. 4(13):1560-1565.

Karlton, E., A. Saarsalmi, M. Ingerslev, M. Mandre, S. Andersson, T. Gaitnieks, R. Ozolinis, and I. Varnagiryte-Kabasinskiene. 2008. Wood Ash Recycling - Possibilities And Risks. Sustainable Use of Forest Biomass for Energy. In: Röser, D., A. Asikainen, K. Raulund-Rasmussen K. and I. Stupak, (eds). Springer Netherlands. pp. 79-108.

- 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 Enciclopedia of Chemical Technology. John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, NY. USA. 890p.
- Márquez-Montesino, F., T. Cordero A., J. Rodríguez-Mirasol y J. J. Rodríguez-Jiménez. 2001. Estudio del potencial energético de biomasa *Pinus caribea* Morelet var. *caribea* (Pc) y *Pinus tropicalis* Morelet (Pt); *Eucalyptus saligna* Smith (Es), *Eucalyptus citrodora* Hook (Ec) y *Eucalyptus pellita* F. Muell (Ep); de la Provincia de Pinar del Río. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 7(1): 83-89.
- Martínez, B. T., O. C. Maserá, T. Ch. Arias, D. Pandey, E. Riegelhaupt and A. Ujlig. 2010. Wood fuel development and climate change mitigation in Mexico. Forests and Climate Change Working Paper. Rome, Italy. 60 p.
- Patiño, D. J. F. y R. Smith Q. 2008. Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistémico. Revista Energética. 39 p.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2010. Avances y progresos científicos en nuestro cambiante medio ambiente, Nairobi, Kenya. [http://www.unep.org/yearbook/2010/PDF/UNEP\\_ES\\_2010\\_lowpdf](http://www.unep.org/yearbook/2010/PDF/UNEP_ES_2010_lowpdf). (29 de marzo de 20013).
- Romahn D. L. V., C. F. 1992. Principales productos forestales No maderables de México. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de Méx. México. 376 p.
- Statistical Analysis System (SAS). 2004. SAS Institute Inc. SAS/STAT User's Guide. Release 9.1. SAS Institute. Raleigh, NC. USA. 5136 p.
- Scheffer, W. C. 1981. Bioestadística. Fondo Educativo Interamericano. México.D.F. México. 267 p.
- Siddique, R. 2008. Wood Ash. Waste Materials and By-Products in Concrete. Springer. Berlin Heidelberg. Germany. 413 p.
- Steel, R. G. D. and H. J. Torrie. 1980. Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach, McGraw-Hill Inc. New York, NY. USA. 633 p.
- 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.
- Wu, M. R., D. L. Schott and G. Lodewijks. 2011. Physical properties of solid biomass. Biomass and Bioenergy. 35(5): 2093-2105.

