

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



**CONTENIDO DE HUMEDAD, CENIZA, INORGÁNICOS Y
GRANULOMETRÍA EN SUBPRODUCTOS DE SEIS ESPECIES
MADERABLES PARA BIOENERGÍA**

TESIS DE DOCTORADO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

**DOCTORADO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

PRESENTA:

M. C. FERMÍN CORREA MÉNDEZ

Linares, Nuevo León, México

Septiembre de 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO

CONTENIDO DE HUMEDAD, CENIZA, INORGÁNICOS Y GRANULOMETRÍA
EN SUBPRODUCTOS DE SEIS ESPECIES MADERABLES PARA BIOENERGÍA

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:
DOCTORADO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES

PRESENTA:

M. C. FERMÍN CORREA MÉNDEZ

COMITÉ DE TESIS



Dr. Artemio Carrillo Parra
Director de tesis



Dr. Humberto González Rodríguez
Asesor



Dr. Enrique Jurado Ybarra
Asesor



Dr. Fortunato Garza Ocañas
Asesor

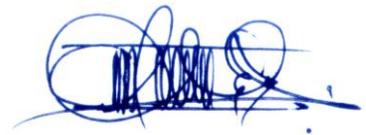


Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones
Asesor externo

Linares, Nuevo León, México

Septiembre de 2013

Manifiesto que la presente investigación es original y fue desarrollada para obtener el grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Manejo de Recursos Naturales. Donde se utiliza información de otros autores se otorgan los créditos correspondientes.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end.

M. C. Fermín Correa Méndez

Septiembre de 2013

DEDICATORIA

A mi esposa Margarita Soria Pérez y a mis hijos César Gael y Miriam Anahí, a todos ellos por su paciencia durante el tiempo que no se pudo estar juntos.

A mis padres José Antonio Correa García y Dominga Méndez González, porque siempre me han animado a trabajar duro y a continuar con entusiasmo en la preparación académica.

A mis hermanos Fidel y Raúl, grandes personas, por sus buenos deseos y porque siento su respaldo en todos los aspectos.

A todas aquellas personas, que siempre me dieron apoyo, confianza, palabras de aliento y su gran amistad.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), especialmente a la Facultad de Ciencias Forestales (FCF), por brindarme la oportunidad de alcanzar mi propósito, por sus excelentes atenciones, facilidades otorgadas y trato fraternal.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para ejercer mis estudios de Doctorado.

A los doctores (Artemio Carrillo Parra, Humberto González Rodríguez, Enrique Jurado Ybarra, Fortunato Garza Ocañas, José Guadalupe Rutiaga Quiñones), integrantes del comité de tesis, por brindarme su tiempo, darme facilidades, hacerme comentarios y sugerencias, guiar la elaboración y revisión de esta tesis y los trabajos que la fueron integrando.

A las autoridades de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP), en especial al Director Técnico Forestal, Ing. Luís Toral Campoverde, con quien se inició y posteriormente, al Ing. Felipe Aguilar, y a su personal de los servicios técnicos forestales, a los encargados de las áreas del patio de almacenamiento, de la descortezadora, del aserradero, de la astilladora, del taller de secundarios interno; por su recibimiento, explicaciones, información y apoyo con el material para estudio.

Se agradece también el apoyo de los propietarios (Hermanos López Soto, Esteban, Martín y Ambrosio) del Taller de secundarios externo “Tarimas López”, por la facilitación del material e información requerida en la presente investigación.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), especialmente a la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera (FITECMA) y al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, por sus facilidades para realizar las pruebas en laboratorio.

A la Universidad de Guadalajara (UDG), porque en su Departamento de Madera Celulosa y Papel, se realizó la distribución granulométrica de las partículas maderables.

Es de agradecer la inclusión de esta tesis en el proyecto No. 166444 del CONACYT, participando profesores y alumnos de la UANL y la UMSNH.

A la Universidad de Pinar del Río, en especial al Dr. Francisco Márquez Montesino, por su recibimiento y apoyo en el Centro de Estudios de Energía y Tecnologías Sostenibles (CEETES), durante la estancia de investigación en Cuba.

A todos mis amigos (as), compañeros y profesores, que por cuestiones de espacio, no se han podido incluir, agradezco su amistad, sus experiencias compartidas y sus acertados consejos.

CONTENIDO

RESUMEN GENERAL.....	IX
GENERAL SUMMARY	X
ESTRUCTURA DE LA TESIS	XI
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos	4
3. HIPÓTESIS GENERAL	5
4. TRABAJOS DE LA INVESTIGACIÓN	6
4.1 Manuscrito uno. Moisture and Ash Elemental Content of Sawmill Industry Byproducts from Three Forest Species and their Evaluation as Feedstock for Densified Biofuels	6
4.2 Manuscrito dos. Contenido de humedad, ceniza y su microanálisis en residuos de astilladora de tres especies de encinos de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México: Su evaluación para biocombustibles densificados	30

4.3 Manuscrito tres. Humedad, Ceniza e Inorgánicos en Corteza Industrial de Tres Pinos para Bioenergía	44
4.4 Manuscrito cuatro. Contenido de Humedad y Sustancias Inorgánicas en Subproductos Maderables de Pino para su Uso en Pelets y Briquetas	63
4.5. Manuscrito cinco. Distribución Granulométrica en Subproductos de Aserrío para su Posible Uso en Pelets y Briquetas	84
5. CONCLUSIONES GENERALES	109
6. PUBLICACIONES PRODUCIDAS Y PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS...	111
Artículo científico.....	111
Manuscritos	111
Participación en congreso y simposio.....	112

RESUMEN GENERAL

Se analizó el aserrín, la corteza y la viruta de *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. y *P. pseudostrobus* Lindl. y la mezcla corteza-aserrín de *Quercus candicans* Née, *Q. laurina* H. et B., y *Q. rugosa* Née. Los subproductos industriales de aserrío de estas especies son los más abundantes en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. Se les determinó el contenido de humedad y cenizas según las normas europeas UNE-EN14774-3 y UNE-EN14775, respectivamente. El microanálisis de elementos inorgánicos se realizó a través de la cuantificación de la energía dispersiva de rayos X en un espectrómetro acoplado a un microscopio electrónico de barrido. La granulometría se determinó conforme a la normas UNE-EN-15149-1 y -2. El contenido de humedad y cenizas fue de 31.91% a 56.3% y de 0.22% a 11.1%, respectivamente. Altos contenidos de Ca se presentaron en los subproductos. Las cortezas mostraron altos contenidos de Si, Al y Fe. El contenido de S puede limitar el uso de los subproductos por estar presente en valores superiores a los parámetros establecidos por los estándares. En cuanto a la granulometría de las partículas, el aserrín y la mezcla de corteza-aserrín, fueron los idóneos para elaborar pelets. Corteza y viruta, son más aptas para producir briquetas.

GENERAL SUMMARY

Bark, sawdust and shavings of *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. and *P. pseudostrobus* Lindl., as well as bark-sawdust mix of *Quercus candicans* Née., *Q. laurina* H. et. B., and *Q. rugosa* Née were analyzed. Sawmill industrial byproducts of these species are the most abundant in Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacan, Mexico. The moisture and ash contents in these byproducts were determined according to European standards EN14774-3-UNE and UNE-EN14775, respectively. The inorganic elements microanalysis was performed through of the quantification of the X-ray energy dispersive spectrometer coupled to a scanning electron microscope. Granulometry was guided using the UNE-EN-15149-1 and -2 standards. Moisture and ash contents were 31.91% to 56.3% and 0.22% to 11.1%, respectively. High contents of Ca were showed in the byproducts. The bark also showed high contents of Si, Al and Fe. The S content could limit the use of byproducts because they have values higher than the standards parameters. Particles granulometry in sawdust and sawdust-bark mix are ideal for production of pellets. Bark and shavings are very adequate for production of briquettes.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

Los resultados generados en esta investigación incluyen cinco manuscritos (uno aceptado para su publicación y tres enviados para su consideración a distintas revistas y uno publicado en memorias de congreso), los cuales se mencionan a continuación: **Manuscrito 1: Moisture and Ash Elemental Content of Sawmill Industry Byproducts from Three Forest Species and their Evaluation as Feedstock for Densified Biofuels.** Enviado al Journal Solid Fuel Chemistry. En este se analizó el aserrín y la corteza de tres especies de *Pinus*, subproductos que fueron obtenidos en el aserradero de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP). Se concluye que debido al menor contenido de ceniza y la influencia de sus elementos inorgánicos identificados, el aserrín mostró buenas propiedades para elaborar pelets de madera de la clase A1 (sector de calefacción residencial) y que la corteza de *P. leiophylla* y *P. montezumae* puede ser usada para producir briquetas. **Manuscrito 2: Contenido de humedad, ceniza y su microanálisis en residuos de astilladora de tres especies de encinos de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México: Su evaluación para biocombustibles densificados.** Presentado en las Memorias del 1er Congreso Sustentabilidad e interculturalidad: paradigmas entre la relación cultura y naturaleza. Este manuscrito trata del estudio realizado a la mezcla corteza-aserrín de tres especies de *Quercus*, subproducto proveniente de la astilladora. Se concluye en que la corteza-aserrín de *Q. candicans* es la que presenta las mejores

propiedades para su uso en briquetas. **Manuscrito 3: Humedad, Ceniza e Inorgánicos en Corteza Industrial de Tres Pinos para Bioenergía.** Aceptado para su publicación en la Revista Forestal Baracoa. Aquí se analizó la corteza de tres especies de *Pinus*, como subproducto de una fuente manual y otro del molino triturador, ambas generadas en talleres de secundarios; concluyéndose en que la corteza de *P. leiophylla* y la de *P. montezumae* obtenidas de la fuente manual son las que presentan las mejores propiedades para su uso en pelets y briquetas.

Manuscrito 4: Contenido de Humedad y Sustancias Inorgánicas en Subproductos Maderables de Pino para su Uso en Pelets y Briquetas. Enviado a la Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Este manuscrito presenta el resultado del estudio de las propiedades del aserrín y viruta de tres especies de *Pinus*, subproductos generados en talleres de secundarios. Se concluye en que el aserrín es el subproducto que presenta las mejores propiedades para su uso en pelets y briquetas, respecto a la viruta.

Manuscrito 5: Distribución Granulométrica en Subproductos de Aserrío para su Posible Uso en Pelets y Briquetas. Enviado a la Revista Mexicana de Ciencias Forestales. En este se realizó la distribución granulométrica al aserrín, corteza y viruta (*Pinus*) de seis especies maderables, subproductos originados en las industrias: aserradero, astilladora y talleres de secundarios; concluyéndose en que los tamaños de partículas de estos subproductos fueron diferentes, mientras que entre especies y a nivel de las industrias que las generan fueron similares. Agregando que la mayor parte de las partículas de aserrín y de corteza-aserrín, se podrían utilizar en la producción de pelets y las de corteza y viruta en briquetas.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los bosques proporcionan múltiples beneficios y servicios ambientales, sociales y económicos, de ahí que contribuyan al desarrollo de la sociedad. En cuanto a superficie boscosa, México ocupa el lugar 12 a nivel mundial al tener 64 millones 802 mil hectáreas. Michoacán es el tercer Estado de la República Mexicana con mayor producción maderable, además, cuenta con uno de los complejos industriales madereros más importantes de nuestro país, en la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP).

La industria maderera de la CINSJP genera un total de 8,093 m³ año⁻¹ de subproductos maderables. De los cuales, el descortezado realizado en el aserradero genera anualmente alrededor de 1,866 m³ de corteza. En términos generales en el procesamiento primario de la madera se generan 1,576 m³ año⁻¹ de aserrín. En la mezcla de corteza-aserrín, subproducto proveniente de la astilladora, se generan aproximadamente 3,621 m³ año⁻¹.

El municipio de Nuevo San Juan Parangaricutiro en conjunto con la CINSJP cuentan con 33 talleres de secundarios registrados. Los talleres de secundarios generan aproximadamente 2,151.5 m³ año⁻¹ de corteza de pino, 9,334.5 m³ año⁻¹ de recortes de madera y 1,232.0 m³ año⁻¹ de aserrín y viruta de pino. La CINSJP genera alrededor de 654.8 m³ año⁻¹ de corteza¹ y 375.0 m³ año⁻¹ de aserrín,

¹Aguilar, F. Director Técnico Forestal. Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro. Comunicación personal. Junio, 2011.

mientras que los 32 talleres externos a la CINSJP generan 1,496.7 m³ año⁻¹ de corteza aproximadamente², 514.3 m³ año⁻¹ de aserrín y 342.8 m³ año⁻¹ de viruta.

El destino final de los subproductos forestales en el municipio de Nuevo San Juan Parangaricutiro, se limita a sustrato en viveros de la localidad, fertilizante en huertas de aguacate, composta, en la caldera y en ladrilleras donde son quemados. Debido a su disponibilidad, bajo uso y los precios relativamente económicos, se propicia la búsqueda de proyectos productivos enfocados a la producción de bioenergía. Sin embargo, para emplearse para tal fin, se requiere considerar aspectos técnicos relacionados con la calidad de los subproductos como biocombustible, regulado por algunas características como: 1) Contenido de humedad (CH), valores altos disminuye el poder calorífico neto del subproducto, la eficiencia en la combustión y la temperatura, lo que implica incremento en gastos por consumo de energía durante el secado, 2) Contenido de cenizas, valores altos de contenidos de cenizas requerirá una limpieza continua en los equipos de combustión y 3) Los elementos inorgánicos de la ceniza, pueden generar un impacto negativo debido a que las partículas pueden dispersarse y adherirse al interior de los intercambiadores de calor y plantas de generación de energía por combustión directa, lo que puede obstruir el canal de gases de combustión e inducir a la corrosión del metal, en hornos, reactores, turbinas y dispositivos de control de emisiones, además de afectar la calidad de los productos derivados de

²Tarimas López. Xochitl Pte. s/n. Col. Lázaro Cárdenas, Nuevo San Juan Parangaricutiro. Comunicación personal. Junio, 2011.

los subproductos, por lo que, es importante conocer las concentraciones de los elementos de formación de la ceniza.

Por otra parte, la clasificación granulométrica de los subproductos forestales permitirá conocer las proporciones y predecir volúmenes del material de interés, Además de separar fracciones con composiciones específicas y buscar heterogeneidad química y estructural en los subproductos, para su uso en bioenergía, específicamente para la producción de pelets y briquetas.

2. OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar el CH inicial, porcentaje de cenizas e identificación y cuantificación de sus elementos inorgánicos, así como la granulometría en los subproductos de seis especies maderables, para su posible uso en pelets y briquetas.

Objetivos específicos

- Determinar el CH en los subproductos de seis especies maderables
- Determinar el porcentaje de cenizas en los mismos subproductos
- Identificar y cuantificar los elementos inorgánicos en la ceniza
- Analizar la distribución granulométrica en las partículas
- Evaluar los subproductos para su posible uso en pelets y briquetas

3. HIPÓTESIS GENERAL

El CH inicial, porcentaje de cenizas y sus elementos inorgánicos, y la granulometría de los subproductos de seis especies maderables, se encuentran dentro de los parámetros requeridos por la industria para ser utilizados en la elaboración de pelets y briquetas.

4. TRABAJOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Manuscrito uno. Moisture and Ash Elemental Content of Sawmill Industry Byproducts from Three Forest Species and their Evaluation as Feedstock for Densified Biofuels

**MOISTURE AND ASH ELEMENTAL CONTENT OF SAWMILL
INDUSTRY BYPRODUCTS FROM THREE FOREST SPECIES AND
THEIR EVALUATION AS FEEDSTOCK FOR DENSIFIED
BIOFUELS³**

**F. Correa¹, A. Carrillo^{1*}, J. G. Rutiaga², H. González¹, E.
Jurado¹, F. Garza¹**

*¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias
Forestales, Carr. Nac., No. 85, km. 145, C.P. 67700, Linares, Nuevo León,
México.*

**e-mail: artemio.carrillopr@uanl.edu.mx*

*²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de
Ingeniería en Tecnología de la Madera, C.P. 58060, Morelia, Michoacán,
México.*

Received

Abstract – Moisture and ash content of sawdust and bark of *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. and *P. pseudostrobus* Lindl., obtained from debarker and main bandsaw machine were determined according to European standards for their potential uses as densified biofuels. Microanalysis of ash was determined by dispersive X-ray energy spectrometer coupled to a scanning electron microscope. A higher percentage of ash was found in *Pinus spp* bark (6.7%)

³ Este manuscrito fue redactado de acuerdo a las instrucciones para autores del Journal Solid Fuel Chemistry (<http://www.springer.com/chemistry/physical+chemistry/journal/11985>).

than sawdust (0.3%). These byproducts showed the highest contents of Ca and Mg (followed by K), which could increase the melting point of ash, reducing the formation of deposits and slag in the combustion equipment. Silicon, Fe and Al showed the highest values in bark, even more for the aggregates, which could affect the cutting equipment. These findings may be due, in part, to volcanic ash deposition. Sawdust showed acceptable characteristics for use as class A1 wood pellets, with *P. pseudostrobus* was better.

Keywords: Moisture content, Ash content, Inorganic elements, Bark, Sawdust, Densified biofuel

INTRODUCTION

The sawmill industry of the Indigenous Community of Nuevo San Juan Parangaricutiro county, in Michoacan state, Mexico, generates about 3,442 m³ year⁻¹ of forest byproducts. Primary sawmill process yields 1,866 m³ year⁻¹ of bark and 1,576 m³ year⁻¹ of sawdust. Sawmill industry has a long tradition of using byproducts [1, 2]. The main uses of bark are for gardening nurseries and as a biofertilizer in avocado orchards. Sawdust is used in smaller quantities to boiler, red brick production, and as a raw material for particleboards (Aguilar, F., Forestry Technical Director, Nuevo San Juan Parangaricutiro county, Personal communication, June, 2011). Sawdust is readily available for local users due to low costs [3]. Based on the availability and the little use of bark and sawdust from sawmill industry, new bioenergy alternatives for productive projects in the area could be developed.

Application of byproducts as bioenergy sources should consider moisture content (MC) and ash content of woody biomass. High values decrease net calorific value, combustion efficiency and temperature [4, 5]. Under certain

conditions, biomass is burned for a wide range of applications on heat and power in plants of small, medium or large furnaces [6]. Obernberger and Thek [5], reported wood ash content between 0.4 and 0.8% for softwoods. Typical ash content values for bark varies from 2.0 to 5.0% [4]. The major elements in ash are Ca, K, Mg, Si, Al, Fe, Na, Mn, P and S. The trace elements found in ash are As, Ba, B, Cd, Cu, Cr, Ag, Mo, Hg, Ni, V and Zn [6]. All plants including trees contain heavy metals, although in trace quantities compared to cellulose and lignin content [6, 7]. During the energy conversion processes, inorganic constituents may have a negative impact on the combustion equipment, and affect the quality of byproducts derived from biomass [8]. In addition to heavy metals content, biomass problems could be increased when it is contaminated prior to combustion [6]. Such problems often lead to unplanned outages and costly repairs; therefore, it is essential to know the contents of elements forming ash [1].

Technical constraints explained earlier should be considered, as it may substantially increase energy expenditure during drying of byproducts, downtime and labor costs by sharpening the cutting tools and cleaning ash from the combustion equipment, as well as potential effect of inorganic elements.

The purpose of this study was to determine the initial moisture content, percentage of ash and identification and quantification of inorganic elements in sawdust and bark generated from primary wood processing of three *Pinus* species, and the possible use of these byproducts on densified biofuels are also discussed.

EXPERIMENTAL

Species and byproducts origin

The sawdust and bark byproducts from *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *Pinus montezumae* Lamb., *Pinus pseudostrobus* Lindl., were analyzed. These woody species represent the main sawmill industry in Nuevo San Juan Parangaricutiro county, state of Michoacan, Mexico.

The byproducts were obtained from the main bandsaw machine and debarker machine. The volume of each byproduct for analysis was approximately 0.02 m³. After the identification of log species and production conditions, a randomized sample of bark from debarker was obtained. The sawdust of the three pine species was obtained from the main bandsaw machine (12.7 cm in saw wide, 17 gauge, 60 HP engine, and cutting speed of 34 m s⁻¹). All samples were properly identified, placed in bags and carried to laboratory for further testing.

Moisture content

Initial moisture content (%) was determined following the standard UNE-EN14774-3 [9]. This procedure consists of placing in a drying oven 2.0 g of byproducts at 105±2 °C. The procedure was repeated until the difference between values of two consecutive measurements was less than 0.2%.

Ash content

Ash content (%) obtained from sawdust and bark was determined according to the standard UNE-EN14775 [10]. This procedure consists in screening 2.0 g of byproduct and transfers it to nickel crucibles, which were placed on heating plates

to prevent smoke emission within the furnace (Lindberg). Thereafter, the sample was incinerated at 550 °C. This determination was performed in duplicate.

Ash microanalysis

Ash microanalysis in proportion or relative percent was performed through dispersive energy by means of using an X-ray spectrometer (Bruker AXS) coupled to a scanning electron microscope (JEOL JSM-6400). The conditions for analysis were 15 kV and 30 s [11-13].

Statistical analysis

Moisture, ash percentage, elements content in ash and aggregates of ash from wooden byproducts (sawdust and bark) were statistically analyzed. Data were analyzed according to the following procedures: since moisture and ash content data for the *Pinus spp* byproducts did not follow the assumptions of normal distribution and equal variances, data were analyzed using the two factors nonparametric analysis with the extension of the Kruskal Wallis test (H) named Scheirer-Ray-Hare, following the procedure suggested by Dytham [14]. The percentage of inorganic elements such as K, P and S, in the *Pinus spp* were analyzed using a two way (species and byproducts) ANOVA; for Fe and Na were unbalanced. The percentages of Ca, Mg, Si and Al, were analyzed according to the Scheirer-Ray-Hare test [14]. Because Ti was detected only in bark ash, this element was analyzed through the Kruskal-Wallis test (H) [15]. The aggregates data of inorganic elements in *Pinus* ash were analyzed with one way unbalanced ANOVA [14], except for Fe and Ti, which were analyzed using the Kruskal-Wallis test (H) [15]. The z values for Kruskal-Wallis test (H) multiple comparisons [15]

were applied. For normality tests, the Shapiro-Wilk statistic was performed [16]. These last two tests were performed in StatSoft, STATISTICA Inc., 2005, version 7.1. All others statistical analyzes were carried out using Minitab Inc. package 2010, version 16.2.1. The Tukey's HSD test was used for multiple mean comparisons [17].

RESULTS AND DISCUSSION

Moisture content

The *MC* percentage for *Pinus spp* showed significant differences between sawdust and bark (Scheirer–Ray–Hare test: cumulative $X^2=0.996$, $df=1$, $p=0.004$). In contrast, *MC* did not show significant differences among *Pinus spp* (cumulative $X^2=0.603$, $df=2$, $p=0.397$). In addition, the species-byproduct interaction did not show significant differences (cumulative $X^2=0.265$, $df=2$, $p=0.735$). Moisture content of *Pinus spp* ranged from 35.2-56.3% (Figure 1a).

High moisture content values found in this study imply that more energy will be required to meet a condition of 8-12%; an ideal range for most biofuels applications [18]. On pellets and briquettes production process, when *MC* is below of this range, frictional forces on compression channel are so large that densification is impossible. In contrast, greater values point out that densified products are not dimensionally stable. Moisture content on wood pellets should be lower than 10% [4]. Moisture content for briquettes produced from bark must be less than 18% [19]. Bark of *P. pseudostrobus* exhibited the lowest *MC* (35%). However, this value is still high and this condition could affects the balance of

energy [18]. Lower *MC* for these byproducts is required for low energy expenditure during the production of densified biofuels with higher quality.

Ash content

Ash content from *Pinus spp* showed significant differences between sawdust and bark (Scheirer–Ray–Hare test: cumulative $X^2=0.996$, $df=1$, $p=0.004$), (Figure 1(b)). Unlike, ash content among *Pinus spp* did not show significant differences (cumulative $X^2=0.164$, $df=2$, $p=0.836$). Also, the species-byproduct interaction did not show significant differences (cumulative $X^2=0.410$, $df=2$, $p=0.590$). Ash content of *Pinus spp* ranged from 0.25-11.10% (Figure 1b).

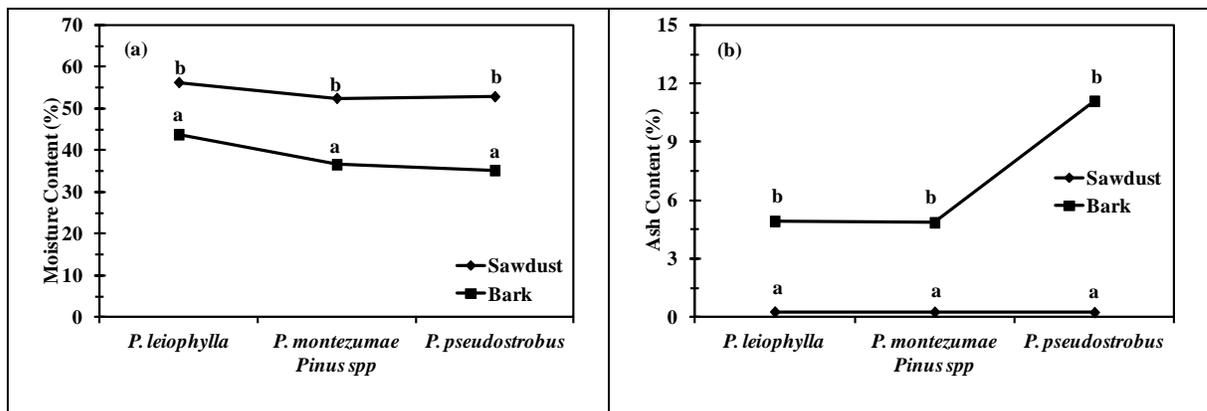


Fig. 1. Moisture content (a) and ash content (b) in bark and sawdust from *Pinus spp*. Plotted values are means \pm standard errors ($n=2$). For a given byproduct, means within each graph with different letters differ at $p=0.05$. See materials and methods for mean comparison details

Sawdust ash values were lower than those reported by Obernberger and Thek [5] for softwoods. Fengel and Wegener [20] and Pettersen [21], documented values ranging from 0.1 to 1.0% in ash content of temperate species. In this study, sawdust of *P. pseudostrobus* showed an ash content of 0.25%. Rutiaga [22] found similar values in sapwood (0.16%) and heartwood (0.08%) for this *Pinus* species.

Bark ash content of *Pinus spp* ranged from 4.86 to 11.10%. The results are similar to those observed by Obernberger and Thek [5] except for bark of *P. pseudostrobus* (11.10%). This value was forty-four times greater than sawdust (0.25%) of the same species. Werkelin et al. [23] and Tsuchiya et al. [7] found ash content values in bark of *Picea abies* ten times higher than wood tissue. Differences could be due, in part to adhered aggregates during forest operations of logs or by saws and knives, as explained by van Lith et al. [3]. Typical ash contents for bark is 2-5% [4], but sometimes greater values are found due to an increase of inorganic elements during handling or processing. High concentrations of inorganic elements in inner bark byproducts free of contaminants are also a result of a high number of living cells [2, 7]. However, the high percentage of ash observed in this study may be related to the source of material, since the samples were obtained from 3 km away of the Paricutin volcano (born in 1943) [24]. At the nearby areas there have been volcanic stones spreading, ashes and particle deposition, which may have influenced, to some extent, the ash content in the woody species.

Usually ash content of sapwood is higher than heartwood, but lower than bark, branches and roots [25]. The results observed in this study were similar to those found by Siddique [2]. In order to maintain a high performance during operations for domestic uses great ash content should be avoided. High values of

ash content increase costs by emptying and cleaning the ash box container and increasing the risk for deposit formation and slag, as well as increasing dust emissions. According to Obernberger and Thek [4], wood pellets for non-industrial use (residential heating sector at a small-scale) class A1 must have an ash content $\leq 0.7\%$, class A2 $\leq 1.5\%$, class B (industrial use in large-scale) $\leq 3.5\%$. Wood and bark briquettes must be $\leq 5.0\%$ and $\leq 6.0\%$, respectively [19]. Sawdust from *Pinus spp* meets the threshold value cited by Obernberger and Thek [4] to produce class A1 pellets. According to the ÖNORM 7135 [19], bark from *P. leiophylla* and *P. montezumae* could be used to produce bark briquettes.

Ash elemental analysis

Calcium contents

Calcium percentages in the ash from *Pinus spp* were statistically different between byproducts (Scheirer–Ray–Hare test: cumulative $X^2=0.996$, $df=1$, $p=0.004$). However, they were similar among *Pinus spp* (cumulative $X^2=0.074$, $df=2$, $p=0.926$) and the interaction byproduct**Pinus spp* (cumulative $X^2=0.632$, $df=2$, $p=0.368$) (Table 1).

Calcium was the element with higher content in sawdust ash for the species studied (44.9-47.7%). Campbell [26] found Ca content values from 7 to 33% in sawdust, which made it an ideal source of lime for soil recovery.

In this study, Ca percentage showed the largest quantity, followed by Si, for *P. montezumae* and *P. leiophylla* species bark. Werkelin et al. [23], found Ca as the highest percentage content in bark. High Ca content values have also been found in poplar [1]. These observations are similar to those results found by

Lambert [27], who pointed out that bark was higher in Ca content than sapwood and heartwood. The findings in Ca contents for *P. montezumae* and *P. leiophylla* species bark were different to those found in Werkelin et al. [1, 23] and Lambert [27].

Calcium contents in bark ash aggregates from two *Pinus spp* (*P. montezumae* and *P. leiophylla*) were statistically similar (Table 2). In the same way, similar results were found for K, Mg, P, Si, Al, Fe, Na and Ti.

Potassium contents

Potassium percentages in ash from *Pinus spp* were statistically different between byproducts ($F=529.68$, $df_e=1,6$, $p<0.001$), among *Pinus spp* ($F=34.73$, $df_e=2,6$, $p=0.001$), but not in their interaction ($F=2.82$, $df_e=2,6$, $p=0.137$) (Table 1). Potassium concentration was the highest second element detected from *Pinus spp* sawdust ash; *P. montezumae* acquired the highest content (29.7%). Lower figures (3-4%) were found by Campbell [26]. Potassium is an essential mineral nutrient for plants [3]. Higher values indicate a high solubility, especially when K is applied for improving soil pH (acid to alkaline); this also contributes to improved properties of ash hardness in storage places [6]. Potassium also helps reduce the melting point of ash. This could induce slag and hard deposit formation in furnaces and boilers. High K concentrations would enhance aerosols formation during the combustion, which could damage boiler and increase the emission of fine particles [3, 5].

Potassium percentages in bark ash aggregates of *Pinus spp* were greater than 3-4% according to Campbell [26], except for *P. montezumae* bark, (Table 2).

Table 1. Ash elemental analysis (%) in two byproducts (sawdust and bark) of three *Pinus* species. Values are means \pm standard errors (n=2).

Element	Sawdust			Bark		
	<i>P. leiophylla</i>	<i>P. montezumae</i>	<i>P. pseudostrobus</i>	<i>P. leiophylla</i>	<i>P. montezumae</i>	<i>P. pseudostrobus</i>
Ca	44.9 \pm 0.9 a ¹	45.0 \pm 0.1 a	47.7 \pm 0.9 a	17.4 \pm 0.1 b	19.9 \pm 0.7 b	8.4 \pm 2.6 b
K	25.8 \pm 0.8 ab	29.7 \pm 1.0 a	23.1 \pm 0.5 b	12.0 \pm 0.4 c	12.9 \pm 0.1 c	5.5 \pm 1.5 d
Mg	13.7 \pm 0.1 a	13.9 \pm 0.3 a	14.2 \pm 0.3 a	7.2 \pm 0.6 b	9.1 \pm 0.5 b	2.4 \pm 0.5 b
P	9.0 \pm 0.0 a	5.2 \pm 0.3 bc	5.2 \pm 0.2 bc	6.5 \pm 0.2 b	4.3 \pm 0.0 c	1.7 \pm 0.5 d
S	3.4 \pm 0.1 a	2.1 \pm 0.1 ab	3.6 \pm 0.2 a	1.6 \pm 0.1 ab	0.9 \pm 0.9 b	0.7 \pm 0.3 b
Si	1.4 \pm 0.3 b	1.7 \pm 0.2 b	3.0 \pm 0.6 b	23.2 \pm 0.4 a	21.2 \pm 1.2 a	33.5 \pm 1.6 a
Al	1.4 \pm 0.2 b	1.0 \pm 0.2 b	1.6 \pm 0.1 b	15.2 \pm 0.4 a	13.8 \pm 0.3 a	25.5 \pm 2.2 a
Fe	n.d.	n.d.	0.6 \pm 0.6 c	13.9 \pm 0.5 ab	11.9 \pm 0.8 b	19.6 \pm 1.7 a
Na	n.d.	1.4 \pm 0.2 bc	1.1 \pm 0.0 c	2.1 \pm 0.0 b	3.2 \pm 0.2 a	0.9 \pm 0.1 c
Ti	n.d.	n.d.	n.d.	0.9 \pm 0.0 a	0.8 \pm 0.1 a	1.8 \pm 0.1 a

n.d.= not detected; ¹For a given byproduct, means within rows with different letters differ at $p=0.05$. See materials and methods for mean comparison details for a given element.

Magnesium contents

Magnesium percentages in ash from *Pinus spp* were statistically different between byproducts (Scheirer–Ray–Hare test: cumulative $\chi^2=0.996$, $df=1$, $p=0.004$), but they were similar among *Pinus spp* (cumulative $\chi^2=0.221$, $df=2$, $p=0.779$) and the interaction byproduct**Pinus spp* (cumulative $\chi^2=0.509$, $df=2$, $p=0.491$) (Table 1).

The magnesium percentages from sawdust were higher than those values (1-2%) found by Campbell [26]. High Mg contents increase the melting point of ash [4] and improve plant growth when applied as a soil fertilizer [28]. Magnesium also increases the solubility of ash [6].

Phosphorous contents

Phosphorous percentages in ash from *Pinus spp* were statistically different between byproducts ($F=113.91$, $df_e=1,6$, $p<0.001$), among *Pinus spp* ($F=136.15$, $df_e=2,6$, $p<0.001$), and their interaction was significant ($F=11.96$, $df_e=2,6$, $p=0.008$) (Table 1). Phosphorous content in sawdust was higher than those (0.3-1.4%) observed by Campbell [26]. These results may affect the combustion equipment during ash fusion due to phosphate formation. High P content could be considered as a good fertilizer source for plants [4] and it is desired to use ash with a high P content, however, it has lower solubility than K [6].

Sulfur contents

Sulfur percentages in the ash from *Pinus spp* were statistically different between byproducts ($F=36.87$, $df_e=1,6$, $p=0.001$). However, not significant

differences were found among *Pinus spp* ($F=2.92$, $df_e=2,6$, $p=0.130$) and the interaction byproduct**Pinus spp* ($F=2.23$, $df_e=2,6$, $p=0.188$) (Table 1). The *Pinus spp* sawdust ash showed an S content of 2.1 to 3.6%. High S contents could be a result of chemical contamination. Sulfur content should be low due to its negative influence during the combustion process. High amounts of S could increase SOx emissions, deposits formation and corrosion [5]. According to Obernberger and Thek [4], acceptable levels of S in wood pellets for non-industrial use class A1 and A2 should be $\leq 0.03\%$ and for class B and wood briquettes $\leq 0.04\%$. For bark briquettes $\leq 0.08\%$ [19]. None of the byproducts met these standards in terms of S content.

The bark, S content ranged from 0.7 to 1.6%. These values were different from those observed by Obernberger and Thek [5], who found higher percentage values in bark than in sawdust. However, these S content figures do not agree with the specifications indicated for sawdust above. Only, one observation of S content ($0.02\pm 0.02\%$) for aggregates in *P. leiophylla* bark ash was found.

Silicon contents

Silicon percentages in ash from *Pinus spp* were statistically different between byproducts (Scheirer–Ray–Hare test: cumulative $X^2=0.996$, $df=1$, $p=0.004$). In contrast, no significant differences were detected among *Pinus spp* (cumulative $X^2=0.610$, $df=2$, $p=0.390$) and the interaction byproduct**Pinus spp* (cumulative $X^2=0.159$, $df=2$, $p=0.841$) (Table 1).

Table 2. Summary of the analysis of variance and element contents (%) in aggregates of bark ashes from *P. leiophylla* (n=4) and *P. montezumae* (n=3). Values are means \pm standard errors.

Element	MSE	Statistic values		Aggregates in bark ash	
		F	p	<i>P. leiophylla</i>	<i>P. montezumae</i>
Ca	32.090	5.56	0.065	7.0 \pm 2.1 a ¹	17.2 \pm 4.2 a
K	6.674	1.80	0.237	5.2 \pm 1.5 a	2.5 \pm 0.9 a
Mg	31.610	0.34	0.584	5.0 \pm 2.8 a	7.5 \pm 3.2 a
P	0.586	1.37	0.295	1.1 \pm 0.4 a	0.4 \pm 0.4 a
Si	133.100	0.44	0.535	34.0 \pm 7.4 a	39.8 \pm 1.3 a
Al	73.050	0.24	0.647	13.6 \pm 5.4 a	10.4 \pm 1.9 a
Na	8.086	0.00	0.978	2.7 \pm 1.6 a	2.8 \pm 1.4 a

MSE=Mean Square Error, F=Fisher statistic, p=Significance.

¹For a given byproduct, means within rows with different letters differ at $p=0.05$. See materials and methods for mean comparison details for a given element.

High Si values (1.4-3.0%) were detected in sawdust of the three *Pinus* species. Silicon values of 0.5% in wood could damage cutting tools [21]. Data coincides with Torelli and Čufar [29], they present values above 0.5% of Si, element that affects sharpening.

Higher Si values (21.2-33.5%) were detected in the bark of the three *Pinus* species. Unlike the findings of Werkelin et al. [1], where Al was the element with the highest percentage in *Pinus* bark, in this study Si had the highest percentage

on all barks. The highest Si percentage for *P. montezumae* bark ash aggregates was 39.8% (Table 2).

Aluminum contents

Aluminum percentages in ash from *Pinus spp* were statistically different between byproducts (Scheirer–Ray–Hare test: cumulative $\chi^2=0.996$, $df=1$, $p=0.004$). However, no significant differences among *Pinus spp* (cumulative $\chi^2=0.666$, $df=2$, $p=0.334$) and the interaction byproduct**Pinus spp* were detected (cumulative $\chi^2=0.019$, $df=2$, $p=0.981$) (Table 1). Aluminum content values in sawdust ranged from 1.0 to 1.6%. These values were low according to Lambert [27], even for species grown in acidic soils. Aluminum content varied from 13.8 to 25.5% in bark from all examined *Pinus spp*. The highest percentage (25.5%) of Al was found in bark of *P. pseudostrobus*. Aluminum ranked third for *P. leiophylla* bark ash aggregates (Table 2).

Iron contents

Iron contents in ash between byproducts (sawdust and bark) and among *Pinus spp* were significantly different ($F=184.519$, $df_e=1,4$, $p<0.001$ and $F=16.285$, $df_e=2,4$, $p=0.012$, respectively) (Table 1). The interaction byproduct**Pinus spp* was not performed due to in sawdust ash only one observation for *P. pseudostrobus* was detected.

P. pseudostrobus bark showed the highest content of Fe (19.6%). This value was very high compared to the low content (0.29%) found by Werkelin et al. [23].

The Fe contents between *P. montezumae* (17.7%) and *P. leiophylla* (28.7%) bark ash aggregates were statistically similar ($H=2.00$, $df=1$, $p=0.157$) (Table 2).

Sodium contents

Sodium contents in ash between byproducts as well as among *Pinus spp* were significantly different ($F=40.443$, $df_e=1,5$, $p=0.001$ and $F=47.864$, $df_e=2,5$, $p=0.001$, respectively). In addition, their interaction was also different ($F=54.398$, $df_e=1,5$, $p=0.001$) (Table 1). Sodium values were higher for all species sawdust than 0.2 to 0.5% found by Campbell [26], except sawdust from *P. leiophylla*. High values of Na reduce the melting point of ash [4]. This condition increases deposit formation when vapors are condensed within the pipeline of the combustion equipment [23]. Under normal conditions, Na contents are low, since this is not an essential element for plants [3]. The Na values from barks in all species were higher than the range (0.2-0.5%) attained by Campbell [26].

Titanium, Manganese and Molybdenum contents

Titanium contents among *Pinus spp* sawdust ash were similar ($H=4.57$, $df=2$, $p=0.102$) (Table 1). Titanium contents between *P. montezumae* (1.7%) and *P. leiophylla* (2.7%) bark ash aggregates were also similar ($H=0.13$, $df=1$, $p=0.724$) (Table 2). There was a Mn content of 0.4% for *P. leiophylla* sawdust ash and a 2.0% of Mo in *P. montezumae* bark ash.

General order of inorganic elements

With the exception of P in temperate woods, the order of content (%) of elements found in sawdust was similar to those found by Tsuchiya et al. [7] and Pettersen [21]. Werkelin et al. [1] found low contents of Ca, Mn, Si and Al. Except for Ca, these findings are in agreement with the results observed in the sawdust of studied *Pinus* species. Werkelin et al. [23], found a high content of Ca followed by K, Mg, P, S, Mn and Cl in bark, showing a similar trend for sawdust; except for Mn and Cl.

Rutiaga [22] found Mg, P, S, K, Ca, Mn and Si in wood of *P. pseudostrobus*. This is similar for sawdust of this species, except for Mn. Ash composition is influenced by season, age, growth conditions, climate and cutting season [25]. As stated by Siddique [2], the difference in ash composition of wood can be highly variable and depends on geographic location and industrial processes.

The order of elemental analysis content in bark in this study does not agree with order observed by Tsuchiya et al. [7], which were $Ca \geq K \geq Mg \geq S \geq P$ for almost all parts of the trees. *P. montezumae* and *P. leiophylla* showed the same rank percentage order of Si, Ca and Al.

Great variation on element proportion from bark ash aggregates is not presented on byproducts *per se*, but it is effected by cutting tools and/or by type of aggregates generation [3]. According to Karlton et al. [6] metal availability could be influenced by ash treatment and site contamination. Werkelin [30], found higher Si, Al, Fe and Na content in industrial biomass than pure or clean biomass, the high amount of aggregates elements is by soil and sand; soil contains high

concentrations of Si, Al and Fe from clays and humus. Sand is composed of crystalline quartz and feldspar that contain significant amounts of Al, Ca and Na. Figure 2 shows aggregates elements found in two *Pinus* species.

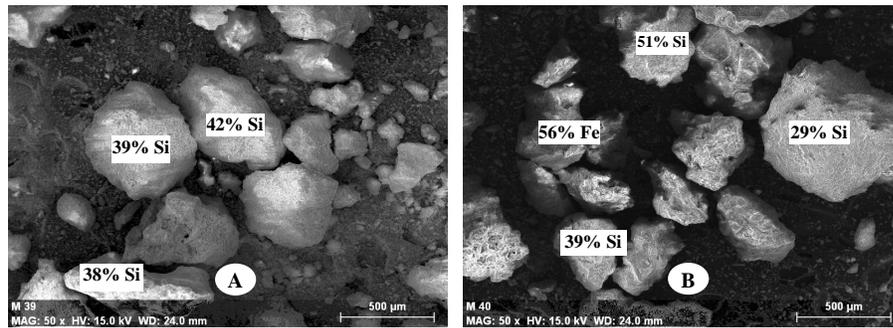


Fig. 2. Electron scanning microscope images of ash aggregates elemental (%) in bark of *Pinus montezumae* (A) and *Pinus leiophylla* (B)

CONCLUSIONS

All tested byproducts types will require more energy supply for drying to use them in pellets and briquettes. Higher ash content was found in bark than sawdust. Based in low ash percentage of sawdust from the three *Pinus* species, material could be used for production of class A1 wood pellets. Bark from *P. leiophylla* and *P. montezumae* could be used to produce bark briquettes.

In addition to the chemical composition of ash, aggregates adhered during logs supply, industrial process or due to the nearby activity of volcano where sand, soil and metal materials produced an atypical order of inorganic elements percentages. Sawdust tends to show a small proportion of aggregates that in bark. These same byproducts had the highest Ca and Mg (followed by K) percentages,

this condition could increase the melting point of ash, while K and Na decrease it, with the possibility to form deposits and slag in the combustion equipment. Silicon, Fe and Al showed the highest values in the bark of *Pinus* species, even in the same aggregates, which could greatly affect cutting equipment. Sulfur in all byproducts was higher than threshold value of standards, which can cause problems of SO_x emissions, deposit formation and corrosion in furnaces and boilers. The *Pinus spp* sawdust showed good properties to use in class A1 (residential heating sector) wood pellets, *P. pseudostrobus* showed the best properties. Bark from *P. leiophylla* and *P. montezumae* can be used to produce bark briquettes.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the support of the Indigenous Community of Nuevo San Juan Parangaricutiro, the Metallurgical Research Institute of the Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, the Universidad Autonoma de Nuevo Leon, and CONACYT grant project No. 166444.

REFERENCES

1. Werkelin J, Skrifvars B-J, Zevenhoven M, Holmbom B, Hupa M. Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel*. 2010;89(2):481-93.

2. Siddique R. Waste Materials and By-Products in Concrete. Wood Ash. Springer Berlin Heidelberg 2008, p. 303-21.
3. van Lith SC, Alonso V, Jensen PA, Frandsen FJ, Glarborg P. Release to the Gas Phase of Inorganic Elements during Wood Combustion. Part 1: Development and Evaluation of Quantification Methods. Energy & Fuels. 2006;20(3):964-78.
4. Obernberger I, Thek G. The Pellet Handbook. First ed. London-Washington DC: Earthscan; 2010.
5. Obernberger I, Thek G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. Biomass and Bioenergy. 2004;27(6):653-69.
6. Karlton E, Saarsalmi A, Ingerslev M, Mandre M, Andersson S, Gaitnieks T, et al. Wood Ash Recycling – Possibilities And Risks. Sustainable Use of Forest Biomass for Energy. In: Röser D, Asikainen A, Raulund K, Stupak I, eds.: Springer Netherlands 2008, p. 79-108.
7. Tsuchiya Y, Shimogaki H, Abe H, Kagawa A. Inorganic elements in typical Japanese trees for woody biomass fuel. Journal of Wood Science. 2010;56(1):53-63.
8. Liu X, Bi XT. Removal of inorganic constituents from pine barks and switchgrass. Fuel Processing Technology. 2011;92(7):1273-9.
9. UNE-EN14774-3. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general. In: 9 G, ed. AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos CONFEMADERA. Madrid, España: AENOR 2010, p. 9.

10. UNE-EN14775. Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas. AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos CONFEMADERA. Madrid, España: AENOR 2010, p. 10
11. Bahng M-K, Mukarakate C, Robichaud DJ, Nimlos MR. Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review. *Analytica Chimica Acta*. 2009;651(2):117-38.
12. García R, Pizarro C, Lavín AG, Bueno JL. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*. 2012;103(1):249-58.
13. Téllez C, Ochoa HG, Sanjuan R, Rutiaga JG. Componentes Químicos del Duramen de *Andira inermis* (W. Wright) DC.(Leguminosae). *Revista Chapingo Serie ciencias forestales y del ambiente*. 2010(1):87-93.
14. Dytham C. *Choosing and using statistics: a biologist's guide*. 3rd ed. New York: Wiley-Blackwell; 2011.
15. Kruskal WH, Wallis WA. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American statistical Association*. 1952:583-621.
16. Shapiro SS, Wilk MB. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*. 1965;52(3/4):591-611.
17. Hayter AJ. A Proof of the Conjecture that the Tukey-Kramer Multiple Comparisons Procedure is Conservative. *The Annals of Statistics*. 1984;12(1):61-75.
18. Miranda MT, Arranz JI, Rojas S, Montero I. Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest. *Fuel*. 2009;88(11):2106-12.

19. ÖNORM 7135 M. Compressed wood or compressed bark in natural state- Pellets and briquettes, Requirements and test specifications, Österreichisches Normungsinstitut (Ed), Vienna, Austria. 2000.
20. Fengel D, Wegener G. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin, New York; 1984.
21. Pettersen RC, ed. The Chemical Composition of Wood. Washington, DC: American Chemical Society 1984.
22. Rutiaga JG. Chemische und biologische Untersuchungen zum Verhalten dauerhafter Holzarten und ihrer Extrakte gegenüber holzabbauenden Pilzen. Buchverlag Graefelfing. Muenchen; 2001.
23. Werkelin J, Lindberg D, Boström D, Skrifvars B-J, Hupa M. Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples. Biomass and Bioenergy. 2011;35(1):725-33.
24. de la Torre EY. Los volcanes del Sistema Volcánico Transversal. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. 2012(50).
25. Kollman F. Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones. Madrid, España: Ministerio de Agricultura; 1959.
26. Campbell AG. Recycling and disposing of wood ash. TAPPI journal. 1990;73(9):141-6.
27. Lambert MJ. Inorganic Constituents in Wood and Bark of New South Wales Forest Tree Species. Sydney, Australia; 1981.
28. Demirbaş A. Trace Metal Concentrations in Ashes from Various Types of Biomass Species. Energy Sources. 2003;25(7):743-51.

29. Torelli N, Čufar K. Mexican tropical hardwoods. Comparative study of ash and silica content. *European Journal of Wood and Wood Products*. 1995;53(1):61-2.
30. Werkelin J. Ash-forming elements and their chemical forms in woody biomass fuels. PhD thesis, Abo: Department of Chemical Engineering, Process Chemistry Group, Abo Akademi University, PhD, 2008.

**4.2 Manuscrito dos. Contenido de humedad, ceniza y su microanálisis en
residuos de astilladora de tres especies de encinos de Nuevo San Juan
Parangaricutiro, Michoacán, México: Su evaluación para biocombustibles
densificados**

Contenido de humedad, ceniza y su microanálisis en residuos de astilladora de tres especies de encinos de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México: Su evaluación para biocombustibles densificados⁴

Correa-Méndez Fermín¹; Carrillo-Parra Artemio¹; Rutiaga-Quiñones José Guadalupe²; González-Rodríguez Humberto¹; Jurado-Ybarra Enrique¹; Garza-Ocañas Fortunato¹

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Carretera Nacional, No. 85, km. 145, C.P. 67700, Linares, Nuevo León, México.

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Fco. J. Múgica s/n, Edificio "D" planta alta, Ciudad Universitaria. C. P. 58060. Morelia, Michoacán, México.

Resumen

Se analizó corteza-aserrín de *Quercus candicans* Née, *Q. laurina* H. et B., y *Q. rugosa* Née, subproducto obtenido en la astilladora del complejo industrial de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, municipio de Nuevo Parangaricutiro, Michoacán, México. El contenido de humedad y cenizas se determinó según las normas europeas UNE-EN14774-3 y UNE-EN14775, respectivamente. El microanálisis de elementos inorgánicos se realizó a través de la cuantificación de la energía dispersiva de rayos X en un espectrómetro acoplado a un microscopio electrónico de barrido. El contenido de humedad fue de

⁴ Este manuscrito fue redactado conforme a la guía para la elaboración de los documentos en extenso, presentado en el 1er Congreso Sustentabilidad e Interculturalidad: Paradigmas entre la relación Cultura y Naturaleza.

46.5 a 51.0% y en cenizas fue de 5.92 a 7.35%. Se presentaron altos contenidos de Ca, K y Mg. El uso de la corteza-aserrín en pelets y briquetas puede estar limitado por su alto contenido de S, respecto a los estándares. Corteza-aserrín de *Quercus candicans* es la más adecuada para la producción de briquetas.

Palabras clave: corteza-aserrín, contenido de humedad, contenido de cenizas, elementos inorgánicos, biocombustibles densificados

Introducción

La Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP), del municipio de Nuevo Parangaricutiro, Michoacán, México, cuentan con una astilladora en la cual se estima que genera $3,621 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ de corteza-aserrín. La disponibilidad, el bajo uso del subproducto como sustrato en viveros de la localidad y como fertilizante en huertas de aguacate, y los precios relativamente económicos, propician la búsqueda de proyectos productivos enfocados a la producción de bioenergía. Sin embargo, en éstos es de considerarse aspectos técnicos que tienen que ver con la calidad de la corteza-aserrín como biocombustible, resultado de algunas características como las siguientes: a) Un alto contenido de humedad (CH) disminuye el poder calorífico neto, la eficiencia en la combustión y la temperatura (2010, Obernberger y Thek 2004), incurriéndose en gastos considerables de energía durante el secado de los subproductos, b) La combustión de la corteza genera un contenido de ceniza de 2.0 a 5.0% y la biomasa sin corteza de maderas duras genera un contenido de ceniza de 1.0 a 1.3% (Obernberger y Thek 2010), requiriéndose una limpieza continua de ceniza en los equipos de combustión y c) Los elementos inorgánicos pueden generar un

impacto negativo debido a que las partículas pueden dispersarse y adherirse al interior de los intercambiadores de calor y plantas de generación de energía por combustión directa, lo que puede obstruir el canal de gases de combustión e inducir a la corrosión del metal, en hornos, reactores, turbinas y dispositivos de control de emisiones, además de afectar la calidad de los productos derivados de la corteza (Liu y Bi 2011, Werkelin et al. 2011), por lo que, es esencial conocer las concentraciones de los elementos de formación de la ceniza (Werkelin et al. 2010).

El propósito de este estudio es determinar el CH inicial, porcentaje de cenizas e identificación y cuantificación de sus elementos inorgánicos en la corteza-aserrín de tres especies de *Quercus* obtenida en astilladora, para su posible uso en pelets y briquetas.

Materiales y métodos

Especies y origen de los subproductos

Las especies seleccionadas para analizar la calidad de la corteza-aserrín fueron *Quercus candicans* Née, *Q. laurina* H. et. B., y *Q. rugosa* Née. La corteza-aserrín de cada especie se obtuvo en una astilladora (Presicion American Corporation) instalada en la industria forestal de la CINSJP, ubicada en Nuevo Parangaricutiro, Michoacán, México. El proceso consistió en la identificación de las trozas de acuerdo a la especie, se colectó la corteza-aserrín durante un turno en forma al

azar. El volumen total colectado de cada subproducto fue de 0.02 m³ aproximadamente.

Contenido de humedad, cenizas y elementos inorgánicos

El CH inicial (%) se determinó con base a la norma UNE-EN14774-3 (2010). El porcentaje de cenizas se obtuvo de acuerdo a la norma UNE-EN14775 (2010). La identificación y cuantificación de los elementos constitutivos de las cenizas se determinó bajo el procedimiento establecido por Bahng et al. (2009), éste consiste en determinar la absorción por medio de un espectrómetro de dispersión de rayos X (Bruker AXS), acoplado a un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM-6400), las condiciones para los análisis fueron 15 k V y 30 s.

Análisis estadístico

El CH, contenido de cenizas y elementos inorgánicos (Ca, K, Mg, P, S, Al, Fe, Na) de la corteza-aserrín de *Quercus candicans* Née, *Q. laurina* H. et. B., y *Q. rugosa* Née, se analizaron de la siguientes formas: la normalidad se determinó con la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk 1965) utilizando el programa PASW Statistics 18 (SPSS Inc.), versión 18.0.0, 2009. Se realizó un análisis de varianza de un factor “especie”, con tres niveles, excepto para Si donde se aplicó la prueba de Kruskal Wallis (Kruskal y Wallis 1952). Se utilizaron pruebas de Tukey para realizar comparaciones múltiples de las medias (Hayter 1984). Los análisis estadísticos se procesaron con el programa Minitab Inc. 2010, versión 16.2.1.

Resultados y discusión

Contenido de humedad

Se encontraron diferencias estadísticas significativas en el CH de la corteza-aserrín entre las especies de *Quercus* ($F=832.08$, $gl_e=3,2$, $p<0.001$). El CH se presentó desde 46.5 a 51.0% (Figura 1a). Miranda et al. (2009), reportó valores de CH para *Quercus pyrenaica* de 41 a 42% en ramas de todos tamaños.

El CH de la corteza no cumple con el valor $\leq 10\%$ citado por Obernberger y Thek (2010) para ser utilizada como pellets de la clase A2 (uso en el sector residencial), clase B (uso industrial a gran escala), ni para briquetas ($\leq 18\%$) según el estándar ÖNORM 7135 (2000). Altos valores de CH afectan el balance de energía (Miranda et al. 2009).

Porcentaje de ceniza

Se encontraron diferencias estadísticas significativas en el contenido de ceniza de la corteza-aserrín entre las especies ($F=38.47$, $gl_e=3,2$, $p<0.007$), (Figura 1b); excepto *Q. laurina* y *Q. rugosa* presentaron contenidos de ceniza similares (7.2%), mayor que en *Q. candicans* (5.9%).

Los valores de contenido de ceniza en la corteza-aserrín de *Quercus spp* fueron diferentes a los reportados por Obernberger and Thek (2004, 2010). Lambert

(1981) observó un contenido de ceniza en *Eucalyptus maculosa* en el rango de 6.0-12.7%, en *E. saligna* de 6.6-10.5%, en *E. globoidea* de 0.5-1.3% y para *E. muellerana* entre 0.8 y 1.2%. Los valores del contenido de ceniza encontrados en *E. maculosa* y *E. saligna* están dentro del rango de las especies de *Quercus spp* (5.9-7.4%) de este estudio. *Q. candicans* presentó 5.9%, este valor fue diferente a los resultados encontrados por Rutiaga et al. (2000) (0.9% en ceniza de aserrín de madera dura). Las diferencias podrían ser atribuidas al tipo de tejido usado.

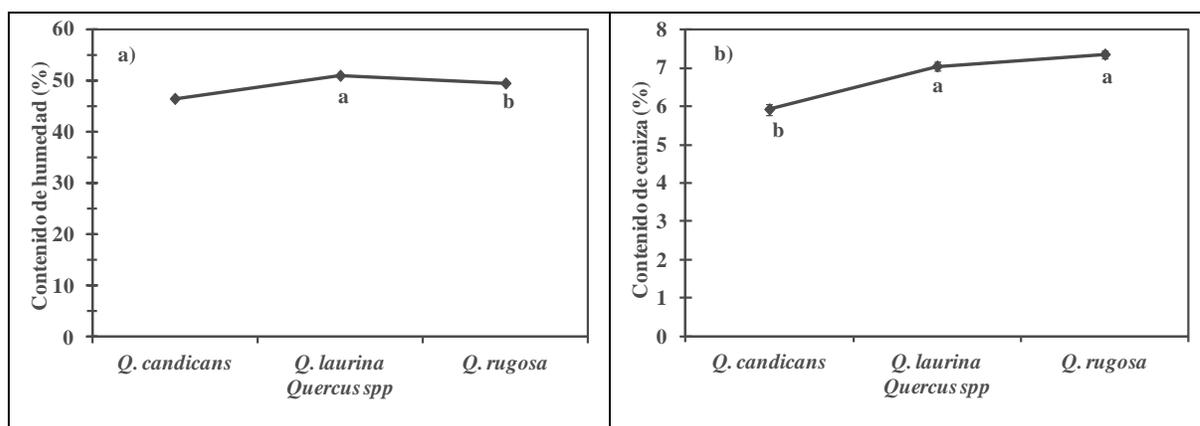


Figura 1. Contenido de humedad (a) y ceniza (b) en corteza-aserrín. Valor medio (%), N=2), error estándar de la media y significancia estadística.

Elevado contenido de ceniza del combustible puede afectar el equipo de combustión y a los usuarios del sector residencial por aumentar los procesos de limpieza. Según los porcentajes de ceniza encontrados, solamente se deben elaborar briquetas de corteza-aserrín de *Q. candicans* por presentar un valor $\leq 6,0$ (ÖNORM 7135 2000).

Elementos inorgánicos en cenizas

Calcio

Los porcentajes de Ca, así como los de K, Mg, S, Al, Fe, Na y Si en la ceniza de corteza-aserrín, entre las especies de *Quercus* no difirieron estadísticamente (Tabla 1). Estas especies mostraron un contenido de Ca desde 61.9 a 70.6%, valores que son aproximadamente dos veces mayores (33%) a los reportados por Campbell (1990). Esto se convierte en una ventaja debido a que un alto contenido de Ca aumenta el punto de fusión de la ceniza y reduce la cantidad de cenizas en los equipos de combustión (Oberberger y Thek 2010).

Werkelin et al. (2011), reportan que el Ca presentó el mayor porcentaje (62%) en corteza de *Picea abies* (L.) H. Karst, coincidiendo con los resultados de este estudio al presentar los mayores valores.

Potasio

El porcentaje de K en la corteza-aserrín de todos los subproductos fue mayor al 3-4% indicado por Campbell (1990); altos valores de K contribuyen a disminuir el punto de fusión de la ceniza, lo cual puede causar escoria y formación de depósitos sólidos en hornos y calderas. Las concentraciones altas de K pueden aumentar la cantidad de aerosoles formados durante la combustión que pueden ensuciar las calderas y presentar emisiones de partículas finas (van Lith et al. 2006, Oberberger y Thek 2004), (Tabla 1).

Magnesio

Los porcentajes de Mg en los subproductos son mayores al rango 1-2% reportado por Campbell (1990). Alto porcentaje de Mg favorece el aumento del punto de fusión de la ceniza (Obernberger y Thek 2010).

Fósforo

Los contenidos de P en la ceniza de corteza-aserrín de *Q. laurina* y *Q. rugosa* fueron similares, pero más bajos que los encontrados en los de *Q. candicans* (Tabla 1).

El porcentaje de P en la corteza-aserrín de las especies estudiadas fue mayor a 1.4% reportado por Campbell (1990). Altos valores de P afectan el proceso de combustión, debido a que el P es semi-volátil y puede causar problemas en la fusión de la ceniza al formar fosfatos (Obernberger y Thek 2010).

Azufre

Altas cantidades de S pueden causar problemas por emisiones de SO_x, formación de depósitos y corrosión (Obernberger y Thek 2004). La corteza-aserrín de las especies examinadas no cumple con los parámetros permitidos para su uso en pelets y briquetas, debido a que el contenido de S para pelets de corteza de la clase A2 debe tener un porcentaje ≤ 0.03 , la clase B un porcentaje ≤ 0.04 (Obernberger y Thek 2010); y el contenido de S en briquetas de corteza debe ser $\leq 0.08\%$ (ÖNORM 7135 2000).

Silicio

El contenido de Si en la corteza-aserrín de *Q. candicans* fue de 1.4%, para *Q. laurina* fue de 1.2% y *Q. rugosa* mostró 2.1%. Los contenidos de Si entre las especies de *Quercus spp* fueron similares ($H=4.57$, $gl_e=2$, $p=0.102$) (Tabla 1).

Valores altos de Si en la corteza es resultado del desgaste de las herramientas de corte al generarla (van Lith et al. 2006).

Tabla 1. Resumen del análisis de varianza y contenido de elementos inorgánicos presentes en la corteza-aserrín de tres especies de *Quercus*. Valor medio (%), error estándar y significancia (n=2).

Elemento	CME	Valores estadísticos		Corteza-Aserrín		
		F	p	<i>Q. candicans</i>	<i>Q. laurina</i>	<i>Q. rugosa</i>
Ca	8.520	4.71	0.119	61.9±0.7 a ¹	70.6±0.2 a	64.6±3.5 a
K	3.030	0.77	0.538	18.5±0.2 a	16.4±0.6 a	17.8±2.0 a
Mg	0.369	7.86	0.064	9.7±0.5 a	7.3±0.4 a	8.7±0.4 a
P	0.020	223.59	0.001	5.6±0.1 a	2.8±0.1 b	3.3±0.1 b
S	0.037	4.85	0.115	1.0±0.2 a	0.4±0.1 a	0.6±0.1 a
Al	0.080	2.08	0.271	0.7±0.1 a	0.4±0.2 a	1.0±0.3 a
Fe	0.240	3.53	0.163	1.1±0.1 a	0.5±0.5 a	1.8±0.3 a
Na	0.130	0.08	0.808	n.d.	0.3±0.3 a	0.2±0.2 a

n.d.= no detectado, CME=Cuadrado Medio del Error, F= Estadístico de Fisher, p= Significancia

¹Para un elemento dado, las medias dentro de filas con letras diferentes “a,b” difieren en $p=0.05$. Ver materiales y métodos para detalles de la comparación de medias para un elemento dado.

Sodio

Los contenidos de Na entre *Q. rugosa* y *Q. laurina* fueron similares (Tabla 1). Los valores de Na para todos los subproductos fueron inferiores a 0.5% establecido como máximo por Campbell (1990). Valores altos de Na reducen el punto de fusión de la ceniza (Oberberger y Thek 2010), esto favorece la formación de depósitos cuando se condensan los vapores al interior de la tubería en el equipo de combustión (Werkelin et al. 2011).

Conclusiones

El CH en la corteza-aserrín de las especies estudiadas fue relativamente mayor a lo requerido para la producción de biocombustibles densificados, para acondicionar estos subproductos se requerirá de aplicar energía.

Por el bajo contenido de ceniza de la corteza-aserrín de *Q. candicans*, se puede permitir su uso en la producción de briquetas.

Altos contenidos de Ca fueron detectados en todos los subproductos, lo que favorece al punto de fusión en la ceniza. La presencia de Si, Fe y Al en la ceniza de corteza-aserrín, demuestra el efecto del proceso de trituración. Los contenidos de S en los subproductos son mayores a los permitidos en pelets y briquetas, esto puede limitar su aplicación en estos productos.

Finalmente, la corteza-aserrín de *Q. candicans* es la que presenta las mejores propiedades para su uso en briquetas.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo otorgado del Ing. Felipe Aguilar de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, de la Universidad Autónoma de Nuevo León y del CONACYT por el proyecto No. 166444.

Bibliografía

- Bahng, M.-K., Mukarakate, C., Robichaud, D. J. and Nimlos, M. R. (2009) 'Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review', *Analytica Chimica Acta*, 651(2), 117-138.
- Campbell, A. G. (1990) 'Recycling and disposing of wood ash', *TAPPI journal*, 73(9), 141-146.
- Hayter, A. J. (1984) 'A Proof of the Conjecture that the Tukey-Kramer Multiple Comparisons Procedure is Conservative', *The Annals of Statistics*, 12(1), 61-75.
- Kruskal, W. H. and Wallis, W. A. (1952) 'Use of ranks in one-criterion variance analysis', *Journal of the American statistical Association*, 583-621.
- Lambert, M. J. (1981) *Inorganic Constituents in Wood and Bark of New South Wales Forest Tree Species*, Sydney, Australia.

- Liu, X. and Bi, X. T. (2011) 'Removal of inorganic constituents from pine barks and switchgrass', *Fuel Processing Technology*, 92(7), 1273-1279.
- Miranda, M. T., Arranz, J. I., Rojas, S. and Montero, I. (2009) 'Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest', *Fuel*, 88(11), 2106-2112.
- Obernberger, I. and Thek, G. (2004) 'Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour', *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653-669.
- Obernberger, I. and Thek, G. (2010) *The Pellet Handbook*, First ed., London-Washington DC: Earthscan.
- ÖNORM 7135, M. (2000) *Compressed wood or compressed bark in natural state- Pellets and briquettes, Requirements and test specifications*, *Osterreichisches Normungsinstitut (Ed.), Vienna, Austria*.
- Rutiaga, J. G., Windeisen, E. and Strobel, C. (2000) 'Composición química del duramen de la madera de *Quercus candicans* Neé', *Madera y Bosques*, 6(2), 73-80.
- Shapiro, S. S. and Wilk, M. B. (1965) 'An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)', *Biometrika*, 52(3/4), 591-611.
- UNE-EN14774-3 (2010) 'Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general', *AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos. CONFEMADERA*, 9.

- UNE-EN14775 (2010) 'Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas.', *AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos CONFEMADERA*, 10
- van Lith, S. C., Alonso, V., Jensen, P. A., Frandsen, F. J. and Glarborg, P. (2006) 'Release to the Gas Phase of Inorganic Elements during Wood Combustion. Part 1: Development and Evaluation of Quantification Methods', *Energy & Fuels*, 20(3), 964-978.
- Werkelin, J., Lindberg, D., Boström, D., Skrifvars, B.-J. and Hupa, M. (2011) 'Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples', *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 725-733.
- Werkelin, J., Skrifvars, B.-J., Zevenhoven, M., Holmbom, B. and Hupa, M. (2010) 'Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels', *Fuel*, 89(2), 481-493.

4.3 Manuscrito tres. Humedad, Ceniza e Inorgánicos en Corteza Industrial de Tres Pinos para Bioenergía

**HUMEDAD, CENIZA E INORGÁNICOS EN CORTEZA INDUSTRIAL DE TRES
PINOS PARA BIOENERGÍA⁵**

**MOISTURE, INORGANIC AND ASH IN INDUSTRIAL BARK FROM THREE
PINES FOR BIOENERGY**

M. C. F. Correa-Méndez¹; Ph.D. A. Carrillo-Parra^{1*}; Doctor en ciencias J. G. Rutiaga-Quiñones²; Ph.D. H. González-Rodríguez¹; Ph.D. E. Jurado-Ybarra¹; Ph.D. F. Garza-Ocañas¹

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Carr. Nal. Km. 145 C.P. 67700. Linares, Nuevo León, México. *Correo-e: artemio.carrillopr@uanl.edu.mx

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Apartado Postal 580. C.P. 58060. Morelia, Michoacán, México.

RESUMEN

Se analizó la corteza de *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. y *P. pseudostrobus* Lindl., subproducto de un molino y del descortezado manual. El contenido de humedad y cenizas se determinó según las normas europeas UNE-

⁵ Este artículo fue redactado de acuerdo a las normas Editoriales de la Revista Forestal Baracoa (<http://www.actaf.co.cu/revista-forestal-baracoa>).

EN14774-3 y UNE-EN14775, respectivamente. El microanálisis de elementos inorgánicos se realizó a través de la cuantificación de la energía dispersiva de rayos X en un espectrómetro acoplado a un microscopio electrónico de barrido. El contenido de humedad y cenizas fue de 31,91 a 48,61% y 0,99 a 2,97%, respectivamente. La corteza obtenida manualmente presentó los mayores contenidos de Ca, excepto la de *P. pseudostrobus*. La corteza obtenida mecánicamente mostró mayor contenido de Si y Fe. El uso de la corteza en pelets y briquetas puede estar limitada por su alto contenido de S. Corteza de *P. leiophylla* y *P. montezumae* obtenida manualmente es la más adecuada para la producción de pelets y briquetas.

Palabras clave: corteza, contenido de humedad, contenido de cenizas, elementos inorgánicos, biocombustibles densificados

ABSTRACT

It was analyzed the bark of *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. and *P. pseudostrobus* Lindl., byproduct of a mill and manual debarked. The moisture and ash content was determined according to European standards EN14774-3-UNE and UNE-EN14775, respectively. The inorganic elements microanalysis was performed through of the quantification of the X-ray energy dispersive spectrometer coupled to a scanning electron microscope. The moisture and ash content was 31,91 to 48,61% and 0,99 to 2,97%, respectively. The bark manually obtained showed the highest contents of Ca, except for *P. pseudostrobus*. The highest contents of Si and Fe were showed in the bark

obtained mechanically. Bark could be limited in their use for pellets and briquettes due to its contents of S. Bark manually obtained from *P. leiophylla* and *P. montezumae* are the most suitable for the pellets and briquettes production.

Keywords: bark, moisture content, ash content, inorganic elements, densified biofuels

INTRODUCCIÓN

Nuevo San Juan Parangaricutiro y la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP), del municipio de Nuevo Parangaricutiro, Michoacán, México, cuentan con 33 talleres de secundarios registrados, los cuales se estima que generan 2.151,5 m³ año⁻¹ de corteza de pino. En 32 talleres externos a la CINSJP se generan 1.496,7 m³ año⁻¹ aproximadamente⁶ y en el de la CINSJP alrededor de 654,8 m³ año⁻¹ de corteza⁷.

La disponibilidad, el bajo uso del subproducto como sustrato en viveros de la localidad y como fertilizante en huertas de aguacate, y los precios relativamente económicos, propician la búsqueda de proyectos productivos enfocados a la producción de bioenergía. Sin embargo, en éstos es de considerarse aspectos técnicos que tienen que ver con la calidad de la corteza como biocombustible, resultado de algunas características como las siguientes: a) Un alto contenido de humedad (CH) disminuye el poder calorífico neto, la eficiencia en la combustión y la temperatura (Oberberger y Thek 2004; 2010), incurriéndose en gastos

⁶Tarimas López. Xochitl Pte. s/n. Col. Lázaro Cárdenas, Nuevo San Juan Parangaricutiro. Comunicación personal. Junio, 2011.

⁷Aguilar, F. Director Técnico Forestal. Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro. Comunicación personal. Junio, 2011.

considerables de energía durante el secado de los subproductos, b) La combustión de la corteza genera un contenido de ceniza de 2,0 a 5,0% (Oberberger y Thek 2010), requiriéndose una limpieza continua de ceniza en los equipos de combustión y c) Los elementos inorgánicos pueden generar un impacto negativo debido a que las partículas pueden dispersarse y adherirse al interior de los intercambiadores de calor y plantas de generación de energía por combustión directa, lo que puede obstruir el canal de gases de combustión e inducir a la corrosión del metal, en hornos, reactores, turbinas y dispositivos de control de emisiones, además de afectar la calidad de los productos derivados de la corteza (Liu y Bi 2011; Werkelin et al. 2011), por lo que, es esencial conocer las concentraciones de los elementos de formación de la ceniza (Werkelin et al. 2010).

El propósito de este estudio es determinar el CH inicial, porcentaje de cenizas e identificación y cuantificación de sus elementos inorgánicos en la corteza de tres especies de *Pinus* obtenida de la fuente manual y mecánica, para su posible uso en pelets y briquetas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Especies y origen de los subproductos

Las especies seleccionadas para analizar la calidad de la corteza fueron *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *Pinus montezumae* Lamb. y *Pinus pseudostrobus* Lindl. La corteza de cada especie se obtuvo del descortezado con hacha en un taller de secundarios “Tarimas López”, fuente denominada “manual” y de un molino

(Industrial OCHOA, SMR-1500, 14,2 Amperios, 1760 rpm) instalado en el taller de secundarios de la CINSJP, fuente denominada “mecánica”, ambos talleres ubicados en Nuevo Parangaricutiro, Michoacán, México. El proceso consistió en la identificación de la troza de acuerdo a la especie, se colectó la corteza de ambas fuentes en forma al azar. El volumen total colectado de cada subproducto fue de 0,02 m³ aproximadamente.

Contenido de humedad, cenizas y elementos inorgánicos

El CH inicial (%) se determinó con base a la norma UNE-EN14774-3 (2010). El porcentaje de cenizas se obtuvo de acuerdo a la norma UNE-EN14775 (2010). La identificación y cuantificación de los elementos constitutivos de las cenizas se determinó bajo el procedimiento establecido por Bahng et al. (2009), éste consiste en determinar la absorción por medio de un espectrómetro de dispersión de rayos X (Bruker AXS), acoplado a un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM-6400), las condiciones para los análisis fueron 15 k V y 30 s.

Análisis estadístico

El CH, contenido de cenizas y elementos inorgánicos (Ca, K, Mg, Si, Al, Fe, P, S, Na, Ti y Cl) de la corteza de *P. leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* obtenida de la fuente manual y mecánica; se analizaron estadísticamente con un modelo lineal general univariado de dos factores, el factor “especie” con tres niveles y factor “fuente” de la corteza con dos niveles. La normalidad se determinó con la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk 1965) utilizando el programa PASW

Statistics 18 (SPSS Inc.), versión 18.0.0, 2009. El análisis estadístico para Mg se efectuó después de realizar una transformación angular a los valores ($\text{Grados}(\text{ArcSen}(\sqrt{\text{Mg } 100^{-1}}))$), y para los valores de S se efectuó una transformación logarítmica ($\text{LN}((\text{S } 100^{-1}) (1-(\text{S } 100^{-1}))^{-1})$), (Dytham 2011). Se utilizaron pruebas de Tukey para realizar comparaciones múltiples de las medias (Hayter 1984). Los análisis estadísticos se procesaron con el programa Minitab Inc. 2010, versión 16.2.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de humedad

Se encontraron diferencias estadísticas significativas en el CH de la corteza entre las especies ($F=1198,17$, $gl_e=2,7$, $p<0,001$), entre las dos fuentes de obtención de corteza ($F=4158,89$, $gl_e=1,7$, $p<0,001$) así como en la interacción entre especies y fuentes de obtención ($F=524,24$, $gl_e=2,7$, $p<0,001$) (Figura 1a). El CH de la corteza no cumple con el valor $\leq 10\%$ citado por Obernberger y Thek (2010) para ser utilizada como pelets de la clase A2 (uso en el sector residencial), clase B (uso industrial a gran escala), ni para briquetas ($\leq 18\%$) según el estándar ÖNORM 7135 (2000). Altos valores de CH afectan el balance de energía (Miranda et al. 2009).

Porcentaje de ceniza

Se encontraron diferencias estadísticas significativas en el contenido de ceniza de la corteza entre las especies ($F=343,35$, $gl_e=2,6$, $p<0,001$), entre el porcentaje de

ceniza de la corteza de ambas fuentes ($F=692,97$, $gl_e=1,6$, $p<0,001$), así como entre la interacción especies y fuentes de obtención de corteza ($F=63,89$, $gl_e=2,6$, $p<0,001$) (Figura 1b).

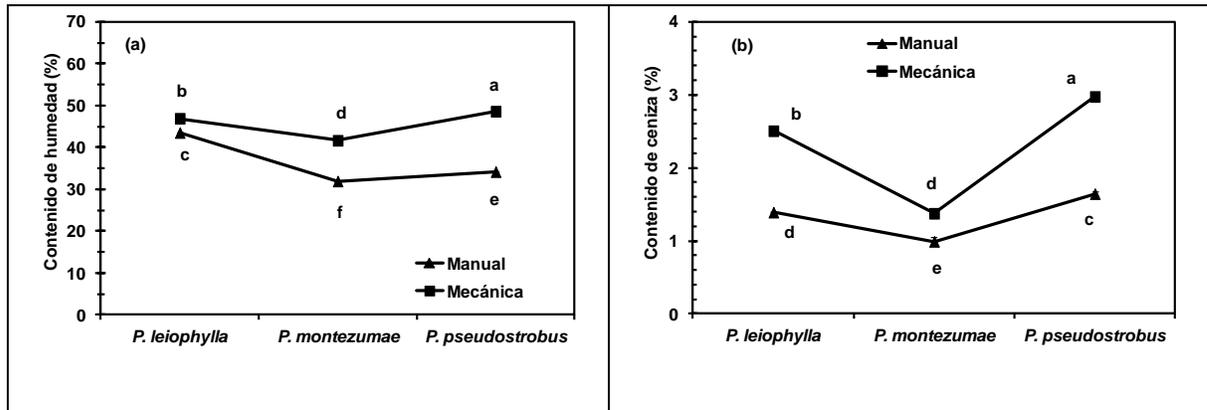


Figura 1. Contenido de humedad (a) y ceniza (b) en corteza obtenida de la fuente manual y mecánica. Valor medio (%), N=2, excepto en CH de la corteza de *P. leiophylla* de la fuente mecánica, N=3), error estándar de la media y significancia estadística.

El porcentaje de ceniza de la corteza de las tres especies de pinos es similar al contenido (2,0 a 5,0%) reportado por (Oberberger y Thek 2010). Elevado contenido de ceniza del combustible puede afectar el equipo de combustión y a los usuarios del sector residencial por aumentar los procesos de limpieza. Según los porcentajes de ceniza encontrados, se pueden elaborar pelets clase A2 a partir de la corteza de *P. montezumae* obtenida de ambas fuentes, así como de la corteza de *P. leiophylla* de la fuente manual por presentar un porcentaje de ceniza $\leq 1,5$ y

pelets de clase B de la corteza de *P. pseudostrobus* de ambas fuentes y de la corteza de *P. leiophylla* de la fuente mecánica por presentar un porcentaje $\leq 3,5$ (Oberberger y Thek 2010). Briquetas se pueden elaborar a partir de las tres especies y de ambas fuentes por presentar un porcentaje de ceniza $\leq 6,0$ (ÖNORM 7135 (2000)).

Elementos inorgánicos en cenizas

Calcio

El contenido de Ca de la corteza presentó diferencias estadísticamente significativas entre especies ($F=36,57$, $gl_e=2,6$, $p<0,001$), entre ambas fuentes de corteza ($F=179,86$, $gl_e=1,6$, $p<0,001$) y entre la interacción de especies y las fuentes de corteza ($F=25,27$, $gl_e=2,6$, $p<0,001$) (Tabla 1). El porcentaje de Ca en la corteza de *P. leiophylla* y *P. montezumae* obtenida de la fuente manual sobrepasa el valor de 33% reportado por Campbell (1990). Un alto contenido de Ca aumenta el punto de fusión de la ceniza y reduce la cantidad de cenizas en los equipos de combustión (Oberberger y Thek 2010). Werkelin et al. (2011), reportan que el Ca presentó el mayor porcentaje (62%) en corteza de *Picea abies* (L.) H. Karst, coincidiendo con los resultados de este estudio al presentar los mayores valores, excepto para la corteza de *P. pseudostrobus* obtenida de la fuente manual y para la corteza de *P. montezumae* obtenida de la fuente mecánica, donde fue mayor el contenido de K.

Potasio

El contenido de K de la corteza presentó diferencias estadísticamente significativas entre especies ($F=88,46$, $gl_e=2,6$, $p<0,001$). No hubo diferencias estadísticas entre la corteza obtenida por ambas fuentes ($F=4,06$, $gl_e=1,6$, $p=0,090$). La interacción entre especies y fuentes de corteza presentó diferencias estadísticas ($F=23,09$, $gl_e=2,6$, $p=0,002$) (Tabla 1).

El porcentaje de K en la corteza de todos los subproductos fue mayor al 3-4% indicado por Campbell (1990); altos valores de K contribuyen a disminuir el punto de fusión de la ceniza, lo cual puede causar escoria y formación de depósitos sólidos en hornos y calderas. Las concentraciones altas de K pueden aumentar la cantidad de aerosoles formados durante la combustión que pueden ensuciar las calderas y presentar emisiones de partículas finas (Oberberger y Thek 2004; van Lith et al. 2006).

Magnesio

El contenido de Mg de la corteza fue estadísticamente diferente entre especies ($F=8,24$, $gl_e=2,6$, $p=0,019$), entre la corteza obtenida por ambas fuentes ($F=16,39$, $gl_e=1,6$, $p=0,007$) y en la interacción entre especies y fuentes de obtención de la corteza ($F=9,45$, $gl_e=2,6$, $p=0,014$) (Tabla 1). Los porcentajes de Mg en los subproductos son mayores al rango 1-2% reportado por Campbell (1990). Alto porcentaje de Mg favorece el aumento del punto de fusión de la ceniza (Oberberger y Thek 2010).

Silicio

El contenido de Si en la corteza no presentó diferencias estadísticas entre especies ($F=0,45$, $gl_e=2,6$, $p=0,657$). Se encontraron diferencias estadísticas significativas entre ambas fuentes ($F=135,38$, $gl_e=1,6$, $p<0,001$). La interacción entre especie y fuentes de obtención de la corteza, no presentó diferencias estadísticas ($F=3,04$, $gl_e=2,6$, $p=0,123$) (Tabla 1).

Valores altos de Si en la corteza es resultado del desgaste de las herramientas de corte al generarla (van Lith, et al. 2006). En el presente estudio el efecto de las herramientas de corte fue claro, el contenido de Si en la corteza derivada del molino supera aproximadamente tres veces al detectado en la corteza obtenida manualmente (Tabla 1).

Aluminio

No hubo diferencias estadísticas en el contenido de Al en la corteza entre especies ($F=2,04$, $gl_e=2,6$, $p=0,211$). Se encontraron diferencias estadísticas en el contenido de Al en la corteza obtenida entre ambas fuentes ($F=10,44$, $gl_e=1,6$, $p=0,018$). La interacción entre especies y fuente de obtención de la corteza no presentó diferencias estadísticas ($F=1,25$, $gl_e=2,6$, $p=0,352$) (Tabla 1).

Fierro

El contenido de Fe en la corteza presentó diferencias estadísticas entre especies ($F=6,85$, $gl_e=2,6$, $p=0,028$) y entre las fuentes de obtención ($F=82,36$, $gl_e=1,6$,

$p < 0,001$). En la interacción entre especies y fuentes de obtención no se encontraron diferencias estadísticas ($F=4,87$, $gl_e=2,6$, $p=0,055$) (Tabla 1).

Fósforo

El contenido de P en la corteza no presentó diferencias estadísticas significativas entre especies ($F=4,32$, $gl_e=2,6$, $p=0,069$), se observaron diferencias estadísticas significativas entre la corteza obtenida a partir de ambas fuentes ($F=159,74$, $gl_e=1,6$, $p < 0,001$) y en la interacción entre especies y fuentes de obtención de la corteza ($F=81,49$, $gl_e=2,6$, $p < 0,001$) (Tabla 1).

El porcentaje de P en la corteza de las especies estudiadas fue mayor a 1,4% reportado por Campbell (1990). Altos valores de P afectan el proceso de combustión, debido a que el P es semi-volátil y puede causar problemas en la fusión de la ceniza al formar fosfatos (Oberberger y Thek 2010).

Azufre

No hubo diferencias estadísticas en el contenido de S en la corteza entre las especies ($F=0,57$, $gl_e=2,6$, $p=0,593$), entre las fuentes de obtención ($F=0,00$, $gl_e=1,6$, $p=0,955$) así como en la interacción entre especies y fuentes de obtención ($F=1,79$, $gl_e=2,6$, $p=0,246$) (Tabla 1).

Altas cantidades de S pueden causar problemas por emisiones de SOx, formación de depósitos y corrosión (Oberberger y Thek 2004). La corteza de las especies examinadas no cumple con los parámetros permitidos para su uso en pelets y briquetas, debido a que el contenido de S para pelets de corteza de la clase A2

debe tener un porcentaje $\leq 0,03$, la clase B un porcentaje $\leq 0,04$ (Oberberger y Thek 2010); y el contenido de S en briquetas de corteza debe ser $\leq 0,08\%$ (ÖNORM 7135 2000).

Sodio

El contenido de Na de la corteza no presentó diferencias estadísticas entre las especies ($F=1,72$, $gl_e=2,6$, $p=0,256$) ni en la interacción especies y fuentes de obtención ($F=0,46$, $gl_e=2,6$, $p=0,654$), se encontraron diferencias estadísticas en el porcentaje de Na entre la corteza obtenida por ambas fuentes ($F=8,98$, $gl_e=1,6$, $p=0,024$) (Tabla 1).

Los valores de Na para todas las cortezas fueron superiores a 0,5% establecido como máximo por Campbell (1990). Valores altos de Na reducen el punto de fusión de la ceniza (Oberberger y Thek 2010), esto favorece la formación de depósitos cuando se condensan los vapores al interior de la tubería en el equipo de combustión (Werkelin, et al. 2011).

Tabla 1. Elementos inorgánicos presentes en la corteza de tres especies de pino obtenida de la fuente manual y mecánica. Valor medio (%), error estándar y significancia (n=2).

Elemento	Manual			Mecánica		
	<i>P. leiophylla</i>	<i>P. montezumae</i>	<i>P. pseudostrobus</i>	<i>P. leiophylla</i>	<i>P. montezumae</i>	<i>P. pseudostrobus</i>
Calcio	57,9±3,7 a ¹	50,5±0,1 a	30,7±0,5 b	30,4±1,9 b	21,4±1,1 b	25,5±1,6 b
Potasio	9,5±0,6 d	18,6±1,2 bc	34,6±0,4 a	11,4±0,1 cd	22,7±2,4 b	21,9±1,8 b
Magnesio	8,7±0,8 b	10,3±2,4 b	17,1±0,4 a	6,8±0,4 b	10,4±0,2 ab	7,7±0,2 b
Silicio	5,0±0,4 b	5,7±0,5 b	2,2±0,0 b	15,2±0,9 a	14,0±1,3 a	16,0±2,2 a
Aluminio	4,4±0,5 a	2,6±2,6 a	1,6±0,2 a	11,8±0,3 a	4,5±4,5 a	10,1±1,5 a
Hierro	7,7±0,6 bc	4,5±0,3 c	3,8±0,5 c	11,1±1,1 ab	12,8±1,2 a	9,4±0,5 ab
Fósforo	3,3±0,4 e	4,1±0,2 de	5,8±0,1 bc	8,8±0,2 a	6,9±0,3 b	5,0±0,3 cd
Azufre	2,6±0,6 a	2,3±0,0 a	3,2±0,8 a	2,3±0,7 a	4,6±1,9 a	2,1±0,3 a
Sodio	0,9±0,9 a	1,3±0,4 a	0,9±0,0 a	1,6±0,1 a	2,9±0,1 a	2,1±0,4 a

¹Filas con letras distintas son estadísticamente diferentes en $p=0,05$, de acuerdo a la prueba de Tukey

Titanio y Cloro

Titanio sólo fue detectado en la corteza de *P. leiophylla* obtenida de la fuente mecánica con un porcentaje medio de $0,51 \pm 0,02$. El cloro fue detectado únicamente en la corteza de *P. pseudostrobus* obtenida de la fuente mecánica con un porcentaje de $0,22 \pm 0,05$. Altos contenidos de Cl generan corrosión, formación de depósitos y emisiones en los equipos de combustión. La corteza de *P. pseudostrobus* obtenida de la fuente mecánica quedaría excluida para la producción de pelets ya que el contenido de Cl supera los valores máximos permitidos (0,02 y 0,03%) citados por Obernberger y Thek (2010) para los pelets de corteza de la clase A2 y B respectivamente. De igual manera supera el valor máximo (0,04%) establecido para la producción de briquetas (ÖNORM 7135 2000).

CONCLUSIONES

El CH en la corteza de las especies estudiadas fue relativamente mayor a lo requerido para la producción de biocombustibles densificados, para acondicionar la corteza se requerirá de aplicar energía.

El bajo contenido de ceniza de la corteza de *P. montezumae* obtenida en la fuente manual y mecánica, y de *P. leiophylla* de la fuente manual, puede permitir su uso en la producción de pelets de la clase A2. La corteza de *P. pseudostrobus* obtenida en ambas fuentes y la corteza de *P. leiophylla* obtenida de la fuente

mecánica, pueden usarse en pelets de la clase B. Por otra parte, todos los subproductos pueden utilizarse para la producción de briquetas.

Altos contenidos de Ca fueron detectados en toda la corteza, excepto en la de *P. pseudostrobus* obtenida de la fuente manual y en la de *P. montezumae* obtenida de la fuente mecánica, lo que favorece al punto de fusión en la ceniza, por consecuencia éstos dos últimos subproductos presentaron los mayores contenidos de K. Altos contenidos de Si y Fe se presentaron en la corteza obtenida de la fuente mecánica, lo cual demuestra el efecto del proceso de trituración. Los contenidos de S en los subproductos son mayores a los permitidos en pelets y briquetas, Cl sólo se encontró en la corteza de *P. pseudostrobus* obtenida de la fuente mecánica, esto puede limitar su aplicación en pelets y briquetas.

Finalmente, la corteza de *P. leiophylla* y la de *P. montezumae* obtenidas de la fuente manual son las que presentan las mejores propiedades para su uso en pelets y briquetas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo otorgado por personal de “Tarimas López”, de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, de la Universidad Autónoma de Nuevo León y del CONACYT por el proyecto No. 166444.

BIBLIOGRAFÍA

BAHNG, M.-K., C. MUKARAKATE, D. J. ROBICHAUD AND M. R. NIMLOS

Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review. *Analytica Chimica Acta*, 2009, 651(2), 117-138.

CAMPBELL, A. G. Recycling and disposing of wood ash. *TAPPI journal*, Sep 1990, 73(9), 141-146.

DYTHAM, C. *Choosing and using statistics: a biologist's guide*. 3rd ed. New York: Wiley-Blackwell, 2011. 316 p. ISBN 1405198389.

HAYTER, A. J. A Proof of the Conjecture that the Tukey-Kramer Multiple Comparisons Procedure is Conservative. *The Annals of Statistics*, 1984, 12(1), 61-75.

LIU, X. AND X. T. BI Removal of inorganic constituents from pine barks and switchgrass. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92(7), 1273-1279.

MIRANDA, M. T., J. I. ARRANZ, S. ROJAS AND I. MONTERO Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest. *Fuel*, 2009, 88(11), 2106-2112.

OBERNBERGER, I. AND G. THEK Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 27(6), 653-669.

OBERNBERGER, I. AND G. THEK *The Pellet Handbook*. First ed. London-Washington DC: Earthscan, 2010. 593 p. ISBN 978-1-84407-631-4.

- ÖNORM 7135, M. Compressed wood or compressed bark in natural state-Pellets and briquettes, Requirements and test specifications, Österreichisches Normungsinstitut (Ed.), Vienna, Austria, 2000.
- SHAPIRO, S. S. AND M. B. WILK An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 1965, 52(3/4), 591-611.
- UNE-EN14774-3. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general. In G. 9. *AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos. CONFEMADERA*. Madrid, España: AENOR, 2010, p. 9.
- UNE-EN14775. Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas. In *AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos CONFEMADERA*. Madrid, España: AENOR, 2010, p. 10
- VAN LITH, S. C., V. ALONSO, P. A. JENSEN, F. J. FRANDBSEN, et al. Release to the Gas Phase of Inorganic Elements during Wood Combustion. Part 1: Development and Evaluation of Quantification Methods. *Energy & Fuels*, 2006/05/01 2006, 20(3), 964-978.
- WERKELIN, J., D. LINDBERG, D. BOSTRÖM, B.-J. SKRIFVARS, et al. Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(1), 725-733.
- WERKELIN, J., B.-J. SKRIFVARS, M. ZEVENHOVEN, B. HOLMBOM, et al. Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel*, 2010, 89(2), 481-493.

Breve reseña curricular

Candidato a Doctor en Ciencias con especialidad en el manejo de recursos naturales. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Ha sido Profesor Investigador Asociado “B”, de tiempo completo, en el área de Tecnología de la Madera, en la Universidad del Mar, Carrera de Ingeniería Forestal, impartiendo asignaturas de Industrias Forestales I y II, Tecnología de la Madera y Productos Forestales No Maderables, en Puerto Escondido, Oaxaca, México.

Fermín Correa Méndez.

4.4 Manuscrito cuatro. Contenido de Humedad y Sustancias Inorgánicas en Subproductos Maderables de Pino para su Uso en Pelets y Briquetas

**CONTENIDO DE HUMEDAD Y SUSTANCIAS INORGÁNICAS EN
SUBPRODUCTOS MADERABLES DE PINO PARA SU USO EN PELETS Y
BRIQUETAS⁸**

Título corto: Humedad y ceniza en subproductos para bioenergía

Fermín Correa-Méndez¹; Artemio Carrillo-Parra^{1¶}; José Guadalupe Rutiaga-
Quiñones²; Francisco Márquez-Montesino³; Humberto González-Rodríguez¹;
Enrique Jurado-Ybarra¹; Fortunato Garza-Ocañas¹

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales,
Carretera Nacional, No. 85, km. 145, C.P. 67700, Linares, Nuevo León, México.

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en
Tecnología de la Madera, Fco. J. Múgica s/n, Edificio “D” planta alta, Ciudad
Universitaria. C. P. 58060. Morelia, Michoacán, México.

³Universidad de Pinar del Río, Centro de Estudios de Energía y Tecnologías
Sostenibles, Martí Núm. 270. C. P. 20100. Tel. (0053) 48755453. Pinar del Río,
Cuba.

[¶]Autor para correspondencia, Teléfono: 52 (821) 212 48 95 ext. 145 / Fax: (821)
212 64 15 ext. 145. E-mail: artemio.carrillopr@uanl.edu.mx.

⁸ Este manuscrito fue redactado según la guía de autores de la Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente (<http://www.chapingo.mx/revistas/forestales/>).

CONTENIDO DE HUMEDAD Y SUSTANCIAS INORGÁNICAS EN SUBPRODUCTOS MADERABLES DE PINO PARA SU USO EN PELETS Y BRIQUETAS

Highlights

- Moisture content in byproducts is high for pellets and briquettes production
- Ash content in byproducts is ideal for pellets and briquettes production
- Sulphur content in byproducts is high for pellets and briquettes production
- Sawdust is more adequate than shavings for pellets and briquettes

RESUMEN

La industria forestal de Nuevo San Juan Parangaricutiro y de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, municipio de Nuevo Parangaricutiro, Michoacán, México genera anualmente 1,232 m³ de aserrín y viruta de pino que son subutilizados. Se realizaron análisis físico-químicos al aserrín y viruta de *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. y *P. pseudostrobus* Lindl para determinar si reunían los requisitos establecidos por estándares internacionales para su uso en la elaboración de pelets y briquetas. Se determinó el contenido de humedad, porcentajes de ceniza y elementos inorgánicos del aserrín y viruta según estándares internacionales. El contenido de humedad fue de 51.5±1.9% para aserrín y 53.7±0.1% para viruta. El contenido de cenizas fue de 0.26±0.03%

para aserrín y $0.34\pm 0.03\%$ para viruta. El porcentaje medio para las tres especies en calcio, potasio, magnesio, fósforo, azufre, silicio, hierro, aluminio y sodio para el aserrín fue de 47.1 ± 2.8 , 26.0 ± 2.5 , 13.5 ± 0.4 , 5.0 ± 0.4 , 3.2 ± 0.4 , 2.3 ± 0.8 , 1.0 ± 0.1 , 1.3 ± 0.4 y 1.4 ± 0.3 , respectivamente, mientras que para la viruta fue de 43.2 ± 7.0 , 16.5 ± 3.0 , 10.1 ± 4.8 , 4.0 ± 0.6 , 1.8 ± 0.2 , 3.6 ± 0.3 , 1.0 ± 0.6 , 1.1 ± 0.1 y 1.0 ± 0.6 , respectivamente. Arsénico sólo se encontró en la viruta (17.1 ± 17.1). Según los resultados el aserrín es el subproducto más adecuado para la producción de pelets y briquetas.

Palabras clave: aserrín, viruta, elementos inorgánicos, biocombustibles sólidos, bioenergía

ABSTRACT

The forest industry from Nuevo San Juan Parangaricutiro and from the Indigenous Community of Nuevo San Juan Parangaricutiro county, in Michoacan state, Mexico, annually generate about of $1,232\text{ m}^3$ of sawdust and shavings that are underutilized. Physicochemical analyzes were performed at sawdust and shavings of *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. and *P. pseudostrobus* Lindl to determine if they met the requirements of international standards for its use in the production of pellets and briquettes. It was determined the moisture content, ash percentages and their inorganic elements in sawdust and shavings using international standards. The moisture content was $51.5\pm 1.9\%$ for sawdust and $53.7\pm 0.1\%$ for shavings. The ash content was $0.26\pm 0.03\%$ for sawdust and

0.34±0.03% for shavings. The average for the three species in calcium, potassium, magnesium, phosphorus, sulfur, silicon, iron, aluminum and sodium to the sawdust was 47.1±2.8, 26.0±2.5, 13.5±0.4, 5.0±0.4, 3.2±0.4, 2.3±0.8, 1.0±0.1, 1.3±0.4 and 1.4±0.3, respectively, while for the shavings was 43.2±7.0, 16.5±3.0, 10.1±4.8, 4.0±0.6, 1.8±0.2, 3.6±0.3, 1.0±0.6, 1.1±0.1 and 1.0±0.6, respectively. Arsenic was found only in the shavings (17.1±17.1). According to the results the sawdust is the most suitable feedstock for the production of pellets and briquettes.

Key words: sawdust, shavings, inorganic elements, solid biofuels, bioenergy

INTRODUCCIÓN

Nuevo San Juan Parangaricutiro y la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP), del municipio de Nuevo Parangaricutiro, Michoacán, México, cuentan con 33 talleres de secundarios registrados, los cuales, según estimaciones de los propietarios generan alrededor de 1,232 m³ año⁻¹ de aserrín y viruta de pino. El taller de secundarios interno de la CINSJP genera alrededor de 375.0 m³ año⁻¹ de aserrín, y el resto (514.2 m³ año⁻¹ de aserrín y 342.8 m³ año⁻¹ de viruta) se genera en los 32 talleres externos.

Los subproductos se utilizan localmente para producir composta, fertilizantes en huertas de aguacate y como fuente de energía en ladrilleras y en la caldera de la planta resinera. Sin embargo su alta disponibilidad y bajo precio, incentiva la búsqueda de nuevas alternativas productivas. La producción de bioenergía es una

opción económica y ecológicamente viable (García, Pizarro, Lavín, & Bueno, 2012). Sin embargo, para determinar si los subproductos cumplen con estándares internacionales de calidad, se requiere evaluar algunas características físico-químicas como: a) contenido de humedad (CH), b) porcentaje de cenizas, y c) tipo y porcentaje de elementos inorgánicos (García, et al., 2012; Vassilev, Baxter, Andersen, Vassileva, & Morgan, 2012).

Un contenido de humedad alto (mayor a 25%) de los subproductos provoca la reducción del poder calorífico neto, de la eficiencia en la combustión y de la temperatura generada (García, et al., 2012; Obernberger & Thek, 2004, 2010). Por otra parte, con contenidos de cenizas elevados (mayores a 0.7%), se requiere de limpieza constante de los equipos de combustión (Obernberger & Thek, 2010). Altos valores de elementos inorgánicos pueden generar que las partículas se dispersen y se adhieran al interior de los intercambiadores de calor y plantas de generación de energía. A largo plazo pueden obstruir el canal de gases de combustión e inducir la corrosión de los hornos, reactores, turbinas y dispositivos de control de emisiones (Liu & Bi, 2011; Werkelin, Lindberg, Boström, Skrifvars, & Hupa, 2011),

Conocer las propiedades de los subproductos forestales señaladas anteriormente y las concentraciones de los elementos que conforman la ceniza es de vital importancia para la generación de energía (Werkelin, Skrifvars, Zevenhoven, Holmbom, & Hupa, 2010). En consecuencia, los objetivos de este estudio fueron

determinar el CH inicial, porcentaje de cenizas y realizar un microanálisis de las cenizas del aserrín y de la viruta de tres especies de *Pinus*, para su posible uso en pelets y briquetas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Especies y origen de los subproductos

Las especies seleccionadas para analizar la calidad del aserrín y viruta fueron *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. y *P. pseudostrobus* Lindl por ser las especies con mayor volumen aprovechado. El aserrín y viruta se obtuvieron después de identificar cada troza según la especie, el aserrín se generó de una sierra cinta de 2" de ancho y 6.27 m de longitud con volante de un metro de diámetro y motor de 15 HP, y la viruta a partir de la máquina ranuradora con motor SIEMENS de 10 HP. El muestreo se hizo hasta que se colectó un volumen de cada subproducto de 0.02 m³ aproximadamente, durante un turno de ocho horas. La maquinaria utilizada se encuentra en talleres de secundarios en Nuevo Parangaricutiro, Michoacán, México.

Contenido de humedad, cenizas y elementos inorgánicos

El CH inicial (%) se determinó con base a la norma UNE-EN14774-3 (2010). El porcentaje de cenizas se obtuvo de acuerdo a la norma UNE-EN14775 (2010). La

identificación y cuantificación de los elementos constitutivos de las cenizas se determinó bajo el procedimiento establecido por Bahng et al. (2009) y por Téllez et al. (2010), utilizando un espectrómetro de dispersión de rayos X (Bruker AXS), acoplado a un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM-6400), las condiciones para los análisis fueron 15 k V y 30 s.

Análisis estadístico

Se analizaron estadísticamente los datos de CH, contenido de cenizas y elementos inorgánicos del aserrín y viruta de las especies *P. leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus*. Se aplicó la prueba de normalidad sin transformaciones en los datos de CH, contenido de cenizas y elementos inorgánicos como Ca, K, S, Si y As; para Mg, P, Fe y Na se hizo una transformación con X^2 y para Al se hizo la transformación con $\sqrt{x+1}$. La normalidad se determinó con la prueba de Shapiro-Wilk (1965) utilizando el programa PASW Statistics 18 (SPSS Inc.), versión 18.0.0, 2009. El CH, contenido de cenizas y elementos inorgánicos (Ca, K, Mg, P, S, Si y Na); se analizó con un modelo lineal general univariado de dos factores, el factor “especie” con tres niveles y factor “subproducto” con dos niveles; para Fe el factor “especie” con dos niveles, Al con un factor de la relación “Especie-Subproducto”, y As sólo con el factor “especie”. Se utilizaron pruebas de Tukey para realizar comparaciones múltiples de las medias (Hayter, 1984). El nivel de confiabilidad en los análisis estadísticos fue de 95% y se procesaron con el programa Minitab Inc. 2010, versión 16.2.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de humedad

El CH en el aserrín y viruta fue de $51.5 \pm 1.9\%$ y de $53.7 \pm 0.1\%$, respectivamente (Figura 1a). Estos resultados se encuentran dentro del rango (10-60%) reportado para biomasa por Vassilev, et al. (2010). El análisis estadístico no mostró diferencias estadísticas significativas en el CH del aserrín y viruta entre las especies ($F=2.51$, $gl_e=2,17$ $p=0.111$), ni entre los subproductos ($F=2.10$, $gl_e=1,17$, $p=0.165$), de igual manera no hubo diferencia en las interacciones especies*subproductos ($F=2.06$, $gl_e=2,17$, $p=0.158$). Una comparación entre los valores encontrados y máximos permitidos para su aplicación en pelets y briquetas puede ser vista en el cuadro 1.

Porcentaje de ceniza

El porcentaje de cenizas varió de $0.26 \pm 0.03\%$ y $0.34 \pm 0.03\%$ para el aserrín y viruta, respectivamente. Los valores obtenidos en este estudio para cada especie y los valores permitidos por los estándares para pelets y briquetas son mostrados en el cuadro 1. Los resultados aquí encontrados están en concordancia con valores de 0.1 a 1.0% reportados por Fengel y Wegener (1984), para algunas coníferas. El análisis estadístico no mostró diferencias estadísticas significativas en el contenido de ceniza entre las especies ($F=1.01$, $gl_e=2,12$, $p=0.392$), lo

opuesto ocurrió entre el aserrín y viruta ($F=8.81$, $gl_e=1,12$, $p=0.012$). La diferencia puede ser resultado del desgaste en el equipo de corte al procesar la madera. No hubo diferencia entre las interacciones de especies y subproductos ($F=0.86$, $gl_e=2,12$, $p=0.448$) (Figura 1b).

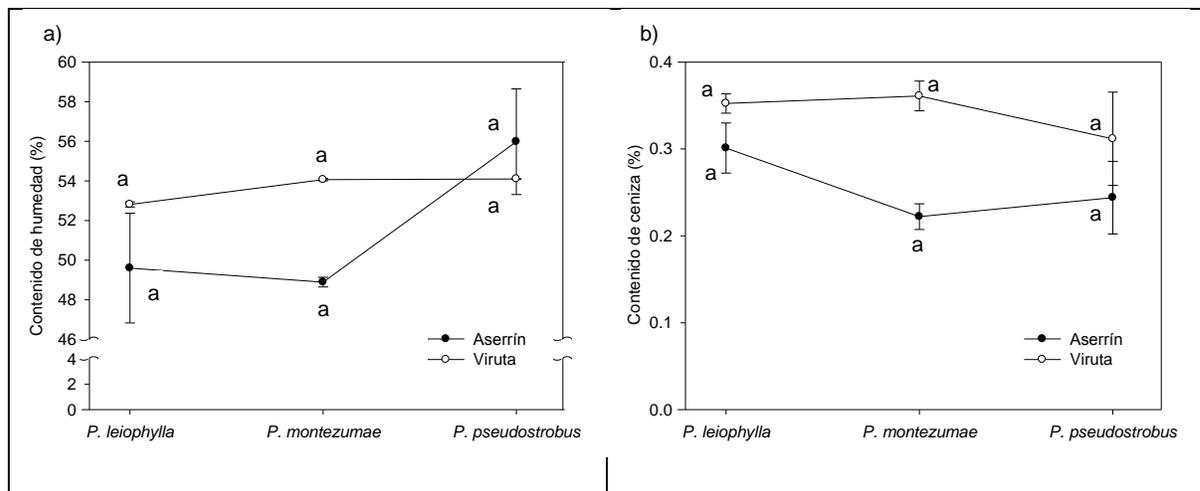


Figura 1. Contenido de humedad (a) y ceniza (b) en subproductos de la industria forestal de las especies *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus*. Valor medio (%), error estándar de la media y significancia estadística.

El porcentaje de ceniza en el aserrín y viruta de las tres especies es menor al contenido (0.4 a 0.8%) de ceniza para maderas suaves, reportado por Obernberger & Thek (2010).

Cuadro 1. Valores encontrados y límites para CH y ceniza de subproductos de la industria forestal de las especies *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* y los requerimientos para su uso en pelets y briquetas.

Propiedad	Especie						Pelets A1	Briquetas	Efecto en la industria de biocombustibles
	<i>P. leiophylla</i>		<i>P. montezumae</i>		<i>P. pseudostrobus</i>		Valor límite	Valor límite	
	Aserrín	Viruta	Aserrín	Viruta	Aserrín	Viruta	(%) ¹	(%) ²	
CH (%)	49.6	52.8	48.9	54.1	56.0	54.1	10.0	18.0	Altos valores de CH afectan el balance de energía ³
Ceniza (%)	0.30	0.35	0.22	0.36	0.24	0.31	0.70	0.50	Elevado contenido de ceniza del combustible puede afectar el equipo de combustión y a los usuarios del sector residencial por aumentar los procesos de limpieza ¹

¹Obernberger & Thek (2010), ²ÖNORM 7135 (2000), ³Miranda, Arranz, Rojas, & Montero (2009)

Elementos inorgánicos en cenizas

Calcio. El contenido de Ca en las cenizas fue de $47.2 \pm 2.9\%$ para el aserrín y $43.3 \pm 7.0\%$ para viruta. Valores cercanos (44.2 a 59.1%) fueron reportados por Revilla (2011) en la madera de las especies *P. cembroides*, *P. johannis*, *P. maximartinezii* y *P. pinceana*. El porcentaje de Ca y el de otros elementos identificados en los subproductos se presentan en el cuadro 2. El análisis estadístico no mostró diferencias estadísticas significativas en el contenido de Ca del aserrín y viruta entre las especies ($F=1.79$, $gl_e=2,12$ $p=0.208$), ni entre los subproductos ($F=1.04$, $gl_e=1,12$, $p=0.327$), de igual manera ocurrió en las interacciones especies y subproductos ($F=0.51$, $gl_e=2,12$, $p=0.614$) (Figura 2). El mismo cuadro presenta el valor permitido e indica el efecto que pueden ocasionar los subproductos en la generación de energía en forma de pelets y briquetas.

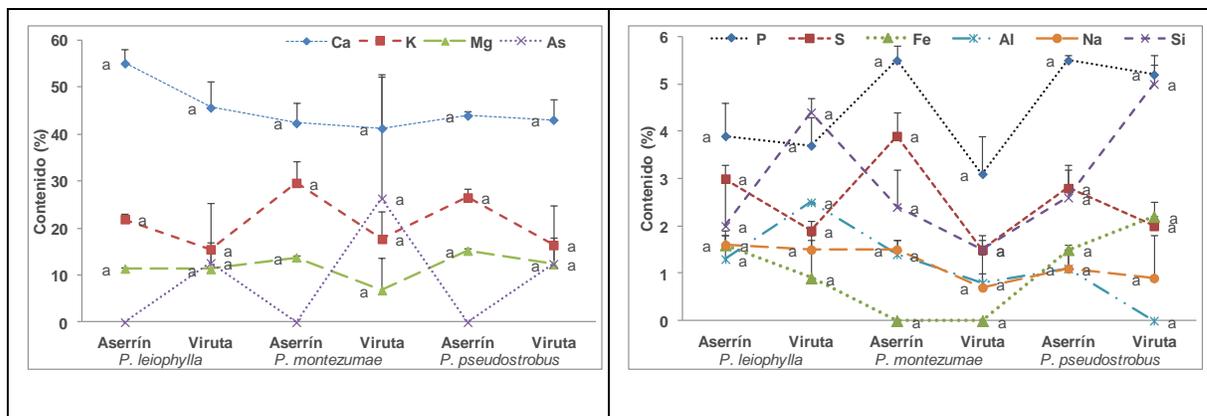


Figura 2. Elementos inorgánicos presentes en subproductos de la industria forestal de las especies *Pinus leiophylla*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus*. Valor medio (%), error estándar y significancia (n=2).

Potasio. El contenido de K en las cenizas fue de 26.0 ± 2.5 y de 16.5 ± 3.0 para el aserrín y viruta, respectivamente. Valores similares (19.3 a 36.2%) fueron reportados por Revilla (2011) en la madera de las especies *P. cembroides*, *P. johannis*, *P. maximartinezii* y *P. pinceana*. El análisis estadístico no mostró diferencias estadísticas significativas en el contenido de K del aserrín y viruta entre las especies ($F=1.05$, $gl_e=2,12$ $p=0.380$), hubo diferencias estadísticas entre los subproductos ($F=11.43$, $gl_e=1,12$, $p=0.005$), lo cual puede ser a causa del aumento en otros elementos por los contaminantes (diesel, desgaste en sierras o cuchillas) de las máquinas al procesar la madera. No se observaron diferencias en las interacciones especies y subproductos ($F=0.34$, $gl_e=2,12$, $p=0.717$) (Figura 2).

Magnesio. El contenido de Mg en las cenizas fue de $13.5 \pm 0.4\%$ y de $10.3 \pm 4.8\%$ para el aserrín y viruta, respectivamente. Valores relacionados (12.9 a 19.2%) a los aquí encontrados fueron reportados por Revilla (2011) en la madera de las especies *P. cembroides*, *P. johannis*, *P. maximartinezii* y *P. pinceana*. El análisis estadístico no mostró diferencias estadísticas significativas en el contenido de Mg del aserrín y viruta entre las especies ($F=1.82$, $gl_e=2,12$ $p=0.203$), ni entre los subproductos ($F=1.82$, $gl_e=1,12$, $p=0.202$) y no hubo diferencia en las interacciones especies y subproductos ($F=0.80$, $gl_e=2,12$, $p=0.473$) (Figura 2).

Fósforo. El contenido de P en las cenizas fue de $4.9 \pm 0.3\%$ y de $4.0 \pm 0.6\%$ para el aserrín y viruta respectivamente. Valores aproximados (1.0 a 4.3%) fueron

reportados por Revilla (2011) en la madera de las especies *P. cembroides*, *P. johannis*, *P. maximartinezii* y *P. pinceana*. El análisis estadístico mostró diferencias estadísticas significativas en el contenido de P del aserrín y viruta entre las especies ($F=4.83$, $gl_e=2,12$ $p=0.029$), resultado similar fue reportado por Lambert (1981), al indicar que la variabilidad entre las diferentes especies es muy alta, además de dependencia de los sitios con estatus nutricionales ampliamente diferentes. Diferencias también se encontraron entre los subproductos ($F=5.65$, $gl_e=1,12$, $p=0.035$), y no se encontraron diferencias en las interacciones especies y subproductos ($F= 2.76$, $gl_e=2,12$, $p= 0.103$) (Figura 2).

Azufre. El contenido de S en las cenizas fue de $3.2\pm 0.4\%$ y de $1.8\pm 0.2\%$ para el aserrín y viruta, respectivamente. Un valor intermedio de 2.64% de S respecto a los valores medios aquí encontrados, fue reportado por Téllez, et al., (2010) en el duramen de *Andira inermis*. El análisis estadístico no mostró diferencias estadísticas significativas en el contenido de S del aserrín y viruta entre las especies ($F=0.30$, $gl_e=2,12$ $p=0.743$). Se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los subproductos ($F=15.56$, $gl_e=1,12$, $p=0.002$), pudiendo ser la causa del efecto en el proceso de obtención; en forma similar no hubo diferencia estadística en las interacciones especies y subproductos ($F=1.71$, $gl_e=2,12$, $p=0.223$) (Figura 2).

Silicio. El contenido de Si en las cenizas fue de $2.3\pm 0.8\%$ y de $3.6\pm 0.3\%$ para el aserrín y viruta, respectivamente. Estos valores medios se encuentran dentro del

rango 0.5 a 4.7% reportado por Revilla (2011) en la madera de las especies *P. cembroides*, *P. johannis*, *P. maximartinezii* y *P. pinceana*. El análisis estadístico no mostró diferencias estadísticas significativas en el contenido de Si del aserrín y viruta entre las especies ($F=2.19$, $gl_e=2,12$ $p=0.154$), tampoco entre los subproductos ($F=3.08$, $gl_e=1,12$, $p=0.105$), de igual manera no hubo diferencia estadística en las interacciones especies y subproductos ($F=2.15$, $gl_e=2,12$, $p=0.160$) (Figura 2).

Fierro. El contenido de Fe en las cenizas fue de $1.5\pm 0.2\%$ y de $1.6\pm 0.6\%$ para el aserrín y viruta, respectivamente. Un valor aproximado de 0.32% fue reportado por Werkelin, et al., (2011) en madera de *Picea abies* (L.) H. Karst. El análisis estadístico no mostró diferencias estadísticas significativas en el contenido de Fe del aserrín y viruta entre las especies ($F=2.55$, $gl_e=1,6$ $p=0.162$), tampoco entre los subproductos ($F=1.17$, $gl_e=1,6$, $p=0.320$), de igual manera no hubo diferencia en las interacciones especies y subproductos ($F=4.55$, $gl_e=1,6$, $p=0.077$) (Figura 2).

Aluminio. El contenido de Al en las cenizas fue de $1.2\pm 0.4\%$ y de $1.7\pm 0.1\%$ para el aserrín y viruta, respectivamente. Valores cercanos (0.3 a 0.9%) fueron reportados por Revilla (2011) en la madera de las especies *P. cembroides*, *P. johannis*, *P. maximartinezii* y *P. pinceana*. El análisis estadístico no mostró diferencias estadísticas significativas en el contenido de Al del aserrín y viruta entre las especies ($F=0.65$, $gl_e=2,13$, $p=0.540$), tampoco entre los subproductos

($F=0.62$, $gl_e=1,14$, $p=0.444$), no hubo diferencia en las interacciones especies y subproductos ($F=1.12$, $gl_e=4,11$, $p=0.398$) (Figura 2).

Sodio. El contenido de Na en las cenizas fue de $1.4 \pm 0.3\%$ y de $1.0 \pm 0.6\%$ para el aserrín y viruta, respectivamente. Estos valores medios se encuentran próximos al límite inferior del rango 2.0 a 4.4% reportado por Revilla (2011) en la madera de las especies *P. cembroides*, *P. johannis*, *P. maximartinezii* y *P. pinceana*. El análisis estadístico no mostró diferencias estadísticas significativas en el contenido de Na del aserrín y viruta entre las especies ($F=0.46$, $gl_e=2,8$, $p=0.648$), tampoco entre los subproductos ($F=0.39$, $gl_e=1,8$, $p=0.549$), no hubo diferencia en las interacciones especies y subproductos ($F=0.46$, $gl_e=2,8$, $p=0.645$) (Figura 2).

Arsénico. No se encontró As en el aserrín y el contenido medio de éste en las cenizas de las virutas fue de $17.1 \pm 17.1\%$. No presentó diferencias estadísticas significativas entre las especies ($F=0.19$, $gl_e=2,5$, $p=0.837$) (Figura 2).

Cuadro 2. Relación de valores de elementos inorgánicos encontrados y de referencia en aserrín y viruta, además de su efecto en la industria

Elemento	Especie, subproducto y valor (%)						Valor de referencia	Efecto en la industria de biocombustibles
	<i>P. leiophylla</i>		<i>P. montezumae</i>		<i>P. pseudostrabus</i>			
	Aserrín	Viruta	Aserrín	Viruta	Aserrín	Viruta		
Calcio	55.0	45.6	42.8	41.2	43.9	43.0	33% ¹	Alto contenido de Ca, aumenta el punto de fusión de la ceniza y reduce la cantidad de la misma en los equipos ⁴
Potasio	21.9	15.5	29.6	17.7	26.5	16.4	4% ¹	Altos valores de K contribuyen a disminuir el punto de fusión de la ceniza, lo cual puede causar escoria y formación de depósitos duros en hornos y calderas. Pueden aumentar la cantidad de aerosoles formados durante la combustión, que pueden ensuciar las calderas y presentarse emisiones de partículas finas ^{2,3}
Magnesio	11.4	11.3	13.8	6.8	15.2	12.9	2% ¹	Alto porcentaje de Mg favorece el aumento del punto de fusión de la ceniza ⁴
Fósforo	3.9	3.7	5.5	3.1	5.5	5.2	1.4% ¹	Altos valores de P afectan el proceso de combustión, debido a que el P es semi-volátil y puede causar problemas en la fusión de la ceniza al formar fosfatos ⁴
Azufre	3.0	1.9	3.9	1.5	2.8	2.0	Pelets Clase A1 y A2 ≤0.03%, y clase B≤0.04% ⁴ Briquetas ≤0.04% ⁵	Altas cantidades de S pueden causar problemas por emisiones de SOx, formación de depósitos y corrosión ²
Sodio	1.6	1.5	1.5	0.7	1.1	0.9	0.5% ¹	Valores altos de Na reducen el punto de fusión de la ceniza ⁴ , favoreciendo la formación de depósitos cuando se condensan los vapores al interior de la tubería en el equipo de combustión ⁶
Arsénico	N.D.	12.6	N.D.	26.3	N.D.	12.4	Pelets ≤1% ⁴	La presencia del As puede ser un problema de salud debido a que existe la posibilidad de contaminación del suelo y aguas subterráneas ⁷

N.D.= No detectado, ¹Campbell (1990), ²Obernberger & Thek (2004), ³van Lith, et al., (2006), ⁴Obernberger & Thek (2010), ⁵ÖNORM 7135 (2000), ⁶Werkelin, et al. (2011), ⁷Khan, Solo-Gabriele, Dubey, Townsend, & Cai (2004).

CONCLUSIONES

El aserrín de las especies de *Pinus* generado durante el proceso de asierre de la madera en talleres de secundarios puede ser utilizado para la producción de pelets y briquetas. Los bajos valores en el contenido de ceniza, alto contenido de Ca y Mg favorecen el punto de fusión en la ceniza, sin embargo, el contenido de S excede el parámetro de los estándares, así como en el contenido de humedad, requiriéndose aplicar energía para su acondicionamiento.

La calidad de la viruta de las tres especies analizadas es adecuada para utilizarse en la elaboración de pelets y briquetas, por presentar propiedades similares a las del aserrín, con la diferencia de que genera mayor cantidad de ceniza y en ella se presenta mayor contenido de Si, menor contenido de K y S que el aserrín. Aunado al contenido de ceniza, sólo la viruta presenta contenidos de As no permitidos en los estándares que el aserrín. Finalmente, el aserrín es el subproducto que presenta las mejores propiedades para su uso en pelets y briquetas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo otorgado por personal de “Tarimas López”, de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, de la Universidad Autónoma de Nuevo León y del CONACYT por el proyecto No. 166444.

REFERENCIAS

- Bahng, M.-K., Mukarakate, C., Robichaud, D. J., & Nimlos, M. R. (2009). Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review. *Analytica Chimica Acta*, 651(2), 117-138. doi: 10.1016/j.aca.2009.08.016
- Fengel, D., & Wegener, G. (1984). *Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin, New York.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, 103(1), 249-258. doi: 10.1016/j.biortech.2011.10.004
- Hayter, A. J. (1984). A Proof of the Conjecture that the Tukey-Kramer Multiple Comparisons Procedure is Conservative. *The Annals of Statistics*, 12(1), 61-75.
- Lambert, M. J. (1981). Inorganic Constituents in Wood and Bark of New South Wales Forest Tree Species. In F. C. o. N. S. Wales (Ed.), (pp. 45). Sydney, Australia.
- Liu, X., & Bi, X. T. (2011). Removal of inorganic constituents from pine barks and switchgrass. *Fuel Processing Technology*, 92(7), 1273-1279. doi: 10.1016/j.fuproc.2011.01.016
- Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion

- behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653-669. doi: 10.1016/j.biombioe.2003.07.006
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The Pellet Handbook* (First ed.). London-Washington DC: Earthscan.
- Revilla, G., E. (2011). *Química de la madera de cuatro pinos mexicanos de la subsección Cembroides*. Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Texcoco, Estado de México.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591-611.
- Téllez, C., Ochoa, H. G., Sanjuan, R., & Rutiaga, J. G. (2010). Componentes Químicos del Duramen de *Andira inermis* (W. Wright) DC.(Leguminosae). *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*(1), 87-93. doi: 10.5154/r.rchscfa.2099.11.046
- UNE-EN14774-3. (2010). Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general. In G. 9 (Ed.), *AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos. CONFEMADERA* (pp. 9). Madrid, España: AENOR.
- UNE-EN14775. (2010). Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas. *AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos CONFEMADERA* (pp. 10). Madrid, España: AENOR.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933. doi: 10.1016/j.fuel.2009.10.022

- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G., & Morgan, T. J. (2012). An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*, *94*(0), 1-33. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.030>
- Werkelin, J., Lindberg, D., Boström, D., Skrifvars, B.-J., & Hupa, M. (2011). Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples. *Biomass and Bioenergy*, *35*(1), 725-733. doi: [10.1016/j.biombioe.2010.10.010](http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.10.010)
- Werkelin, J., Skrifvars, B.-J., Zevenhoven, M., Holmbom, B., & Hupa, M. (2010). Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel*, *89*(2), 481-493. doi: [10.1016/j.fuel.2009.09.005](http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.005)

**4.5. Manuscrito cinco. Distribución Granulométrica en Subproductos de
Aserrío para su Posible Uso en Pelets y Briquetas**

DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA EN SUBPRODUCTOS DE ASERRÍO PARA SU POSIBLE USO EN PELETS Y BRIQUETAS⁹

Fermín Correa Méndez¹, Artemio Carrillo Parra^{1¶}, José Guadalupe Rutiaga Quiñones², Francisco Márquez Montesino³, Humberto González Rodríguez¹, Enrique Jurado¹ y Fortunato Garza Ocañas¹

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Carretera Nacional, No. 85, km. 145, C.P. 67700, Linares, Nuevo León, México.

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, C.P. 58060, Morelia, Michoacán, México.

³Universidad de Pinar del Río, Centro de Estudios de Energía y Tecnologías Sostenibles, Martí Núm. 270. C. P. 20100. Tel. (0053) 48755453. Pinar del Río, Cuba.

¶Autor para correspondencia, Teléfono: 52 (821) 212 48 95 ext. 145. / Fax: (821) 212 64 15 ext. 145. E-mail: artemio.carrillopr@uanl.edu.mx.

⁹ Este manuscrito fue redactado de acuerdo a las instrucciones para autores de la Revista Mexicana de Ciencias Forestales (<http://www.cienciasforestales.org.mx/>).

RESUMEN

Se analizó el aserrín, corteza y viruta de *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. y *P. pseudostrobus* Lindl., así como la mezcla corteza-aserrín de *Quercus candicans* Née, *Q. laurina* Humb. et. Bonpl. y *Q. rugosa* Née. El contenido de humedad se determinó según la norma europea UNE-EN14774-3. La distribución del tamaño de partícula para el aserrín inferior o igual a 3.15 mm se determinó con la norma UNE-EN 15149-2 y para partículas de corteza triturada y virutas iguales o superiores a 1 mm se empleó la norma UNE-EN 15149-1. Se encontró que el 76.91% de las partículas de aserrín, 25.49% de corteza, 16.89% de viruta y 61.67% de corteza-aserrín; podrían utilizarse en la producción de pelets. El 49.60% de corteza, 56.29% de viruta, así como 0.77% de corteza-aserrín, podrían usarse en la producción de briquetas. A nivel de industrias con los mismos subproductos, 58.67% de los del aserradero, 66.82% del Taller de Secundarios de la Comunidad (TSC) y 58.45% del Taller de Secundarios Externo (TSE); son aptos para su utilización en pelets, mientras que el 29.90% de los provenientes del aserradero, 19.70% del TSC y 28.14% del TSE; son adecuados para su uso en briquetas. Los tamaños de partículas de estos subproductos fueron diferentes, mientras que entre especies y a nivel de las industrias que las generan fueron similares. La mayor parte de las partículas de aserrín y de la mezcla corteza-aserrín se podrían utilizar en la producción de pelets y las de corteza y viruta en briquetas.

Palabras clave: aserrín, biocombustibles densificados, corteza, granulometría, partícula, viruta.

ABSTRACT

Sawdust, bark, and shavings from *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. and *P. pseudostrobus* Lindl., and bark-sawdust mixture of *Quercus candicans* Née, *Q. laurina* Humb. et. Bonpl., and *Q. rugosa* Née were analyzed. Moisture content was determined according to the European standard UNE-EN14774-3. To determine particle size distribution less than or equal to 3.15 mm (sawdust), the standard UNE-EN 15149-2 was used and the UNE-EN 15149 -1 for particles equal to or greater than 1 mm (bark-sawdust and shavings). Results showed that 76.91% of sawdust particles, 25.49% of bark, 16.89% of shavings and 61.67% of bark-sawdust could be used in pellet production. Another percentages of these byproducts as 49.60% of bark, 56.29% shavings, so as 0.77% of bark-sawdust could be used in briquettes production. In terms of industries with the same byproducts, 58.67% of them obtained from sawmill, 66.82% from Community Secondary Workshop (CSW) and 58.45% from External Secondary Workshop (ESW) are suitable for its use in pellets, while the 29.90% of those obtained from sawmill, 19.70% from CSW and 28.14% from ESW are suitable for its use in briquettes. Particle size of these products differed, while between species and industries values were similar. Most sawdust could be used for pellet production and most bark, bark-sawdust and shavings could be transformed into briquettes.

Keywords: bark, densified biofuels, granulometry, particle, sawdust, shavings.

INTRODUCCIÓN

Los subproductos generados en la industria de transformación y elaboración secundaria de la madera pueden llegar a ser del 20-60% de la materia prima (Antolín, 2006). En la industria principal de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP), Michoacán, México, se generan aproximadamente un total de $7,063 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ de subproductos maderables¹⁰. La descortezadora instalada en el aserradero genera anualmente alrededor de $1,866 \text{ m}^3$ de corteza. La sierra principal que realiza el procesamiento primario de la madera genera $1,576 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ de aserrín. La astilladora genera aproximadamente $3,621 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ de la mezcla de corteza-aserrín.

Nuevo San Juan Parangaricutiro y la CINSJP cuentan con 33 talleres de secundarios registrados. En conjunto generan aproximadamente $3,384 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ de subproductos de pino, de los cuales $2,152 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ son de corteza, $889 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ de aserrín y $343 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ de viruta. Del volumen total de los subproductos señalados anteriormente se generan aproximadamente $1,496.7 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ de

¹⁰Aguilar, F. Director Técnico Forestal. Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro. Comunicación personal. Junio, 2011.

corteza en los 32 talleres externos¹¹ a la CINSJP, 514.3 m³ año⁻¹ de aserrín y 343.0 m³ año⁻¹ de viruta, en la CINSJP se generan alrededor de 654.8 m³ año⁻¹ de corteza y 375.0 m³ año⁻¹ de aserrín.

El uso local de los subproductos de la industria de aserrío comprende desde compostas hasta fuente de energía en calderas de resinas y hornos de ladrilleras. Sin embargo, la alta disponibilidad y los precios relativamente económicos, propicia la búsqueda de proyectos productivos enfocados a la generación de bioenergía a partir de la elaboración de diferentes productos. Recomendar el uso de éstos subproductos, requiere considerar aspectos técnicos relacionados con la calidad de los mismos, como lo son la mejora de los procesos industriales de secado, métodos de trituración, homogeneización granulométrica y densificación tendientes a disminuir los costos derivados de los tratamientos. Sin embargo, el punto de partida de tales caracterizaciones es determinar el tamaño de partícula, que sirve de parámetro para seleccionar del sistema de pretratamiento más adecuado (Antolín, 2006).

La forma y tamaño de las partículas del combustible, es usualmente un factor importante en la elección de los tipos de hornos y suministro del material, por la influencia que tiene en el transporte y en la eficiencia en la combustión. Las partículas de combustible de mayor tamaño requieren de equipos de alimentación

¹¹Tarimas López. Xochitl Pte. s/n. Col. Lázaro Cárdenas, Nuevo San Juan Parangaricutiro. Comunicación personal. Junio, 2011.

más robustos, llegando a requerir mayor tiempo para presentar una combustión completa (Oberberger y Thek, 2010).

La distribución de partículas permite separar fracciones con dimensiones específicas, la aplicación diferenciada de las mismas puede contribuir a mejorar la calidad de la biomasa como fuente de energía, materiales compuestos y químicos (Silva y Xavier, 2011).

Conocer las dimensiones y distribución granulométrica de las partículas en subproductos maderables es importante antes de iniciar procesos de densificación (Miranda et al., 2012). El tamaño de las partículas tiene influencia en la durabilidad mecánica de los pelets; partículas finas (< 1 mm) presentan mayor durabilidad y mayor higroscopicidad que las partículas grandes (> 1 mm), por lo que las partículas finas experimentarán un mayor grado de acondicionamiento (Kaliyan y Vance, 2009). Por otra parte, la inclusión de partículas grandes puede generar fisuras y posteriores rompimientos en pelets (MacBain, 1966). Por lo anteriormente mencionado y con la finalidad de incrementar el conocimiento de los subproductos generados en la industria forestal para su posible uso en pelets y briquetas, el objetivo principal de este estudio fue determinar la distribución granulométrica en el aserrín, corteza y viruta generados en un aserradero y taller de secundarios de tres especies de *Pinus*, así como en la mezcla de corteza-aserrín de tres especies de *Quercus* proveniente de una astilladora.

MATERIALES Y MÉTODOS

Especies y origen de los subproductos

Las especies utilizadas para analizar la calidad del aserrín, corteza y viruta fueron *Pinus leiophylla* Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb., *P. pseudostrobus* Lindl., mientras que las especies utilizadas para la mezcla de corteza-aserrín fueron *Quercus candicans* Née, *Q. laurina* Humb. et. Bonpl. y *Q. rugosa* Née. Las especies se seleccionaron por ser de mayor aprovechamiento en el área forestal del municipio de Nuevo Parangaricutiro, Michoacán, México.

Las muestras de aserrín, corteza y mezcla corteza-aserrín fueron colectadas en el aserradero y en la industria de astillado de la CINSJP. El aserrín se obtuvo de la sierra principal, que tiene una sierra de 5" de ancho, calibre 17, ancho de diente de 1/8" (3.175 mm), motor de 60 caballos de potencia y velocidad de corte de 34 m/s. La corteza se obtuvo de la banda de salida del subproducto de la descortezadora por fricción con cabezal dentado, donde las trozas son giradas a través de rodillos. La mezcla corteza-aserrín se obtuvo en una astilladora (Presicion American Corporation).

En forma adicional, se colectaron muestras de aserrín del taller de secundarios de la CINSJP (TSC) y del taller externo (TSE) "Tarimas López" que fueron obtenidas de una máquina con sierra cinta de 2" de ancho y 6.27 m de longitud

colocada sobre un volante de un metro de diámetro movido por un motor de 15 caballos de potencia. Las muestras de virutas fueron provenientes de la máquina ranuradora accionada mediante un motor SIEMENS de 10 caballos de potencia, instalada en el TSE.

El proceso para la colecta del material inició con la identificación de la troza, previo al proceso de aserrío o descortezado de acuerdo a la especie. Posteriormente, se colectaron muestras de los subproductos de forma al azar en el sitio donde son vertidos por cada equipo durante un turno de trabajo. El volumen total colectado de cada muestra de subproducto fue de 0.02 m^3 aproximadamente.

Distribución granulométrica

La clasificación por granulometría de las partículas se realizó a partir de dos grupos de partículas que se describen a continuación:

Aserrín

El porcentaje de partículas de aserrín provenientes del aserradero de la CISJNP y TSC registradas fueron aquellas que pasaron por un tamiz vibrante con abertura de malla inferior o igual a 3.15 mm, según lo establece la norma UNE-EN-15149-2 (2011). Los cinco tamices utilizados en esta prueba retenían partículas de los

siguientes tamaños: a) >0.850 mm, b) ≤ 0.850 y >0.425 mm, c) ≤ 0.425 y >0.250 mm, d) ≤ 0.250 y >0.150 mm y e) ≤ 0.150 mm, para efectos de control, los porcentajes retenidos serán identificados en el presente trabajo como: a) >0.850 mm, b) 0.425 mm, c) 0.250 mm, d) 0.150 mm y e) ≤ 0.150 mm, respectivamente. El tamaño mínimo de cada repetición fue de 50 g, conformándose así dos repeticiones.

Corteza, corteza-aserrín y viruta

Para esta distribución granulométrica de cada tipo de partícula, se consideró aquellas que pasaran por un tamiz oscilante con abertura de malla igual o superior a 1 mm según lo establece la norma UNE-EN-15149-1 (2011). Los cinco tamices empleados en esta prueba retenían partículas de los siguientes tamaños: a) >10.0 mm, b) ≤ 10.0 y >8.0 mm, c) ≤ 8.0 y >6.5 mm, d) ≤ 6.5 y >4.0 mm y e) ≤ 4.0 mm para efectos de control, los porcentajes retenidos serán identificados en el presente trabajo como: a) >10.0 mm, b) 8.0 mm, c) 6.5 mm, d) 4.0 mm y e) ≤ 4.0 mm, respectivamente. El volumen mínimo utilizado para cada repetición fue de 8 L, siendo dos repeticiones.

Contenido de humedad (CH)

La caracterización de la distribución granulométrica se realizó con partículas con contenidos de humedad menores a 20%. La determinación del CH se realizó con

base a la norma UNE-EN14774-3 (2010). Ésta norma se aplicó a todos los subproductos y los resultados considerados para posteriores análisis fueron aquellos en los que la diferencia entre la masa total de la muestra y la masa total de todas las fracciones después de tamizar fue menor del 2%.

Análisis estadístico

Se hizo un análisis estadístico considerando los grupos de tamaño de partícula de los siguientes subproductos: aserrín, corteza, corteza-aserrín y viruta. La variable aserrín se normalizó con la transformación del $\ln(x)$ y la corteza con una \sqrt{x} , se aplicó un ANOVA univariado desbalanceado y se utilizaron pruebas de Tukey para realizar comparaciones múltiples de las medias (Hayter, 1984). El análisis de cada subproducto entre las especies se realizó usando la prueba de Kruskal-Wallis (Kruskal y Wallis, 1952), excepto en viruta donde se aplicó un ANOVA univariado. También se hicieron análisis según el tipo de industria: aserradero, astillado, taller de secundarios de la comunidad y externo, aplicándose la prueba de Kruskal-Wallis para el tamaño de las partículas en cada industria (Kruskal y Wallis, 1952). El nivel de significancia en las pruebas fue del 95%. Los análisis estadísticos se procesaron con el programa Minitab Inc. 2010, versión 16.2.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aserrín de *Pinus*

El porcentaje de partículas de aserrín de las tres especies de pino retenidas en cinco tamices presentaron diferencias altamente significativas ($F=40.14$, $gl_e=4,85$, $p<0.001$), (Figura 1a). A nivel de especies no hubo diferencias estadísticamente significativas ($H=0.00$, $gl=2$, $p=0.998$). El porcentaje de partículas incluidas en los tamices 0.250, 0.150 y ≤ 0.150 mm fue de 37.18%, las cuales son denominadas como polvo de madera por ser menores de 0.315 mm (Oberberger y Thek, 2010).

Aproximadamente 76.91% de las partículas de aserrín se concentraron en los tamices 0.425, 0.250, 0.150 y ≤ 0.150 mm. El tamaño de las partículas se encuentra dentro del límite indicado por Oberberger y Thek (2010). Estos mismos autores señalan que en el aserrín, la mayor parte de las partículas tienen una longitud menor a 5 mm, siendo éste tamaño de partícula adecuado para producir pelets, lo cual coincide con Ortíz et al., (2003), al indicar que se pueden producir pelets con tamaños de partícula del orden de 5 mm.

De acuerdo con lo recomendado por Turner (1995), pelets de buena calidad pueden elaborarse con partículas de 0.6-0.8 mm, cumpliendo el polvo de madera con esta especificación. El rango recomendado por Franke y Rey (2006) para producir pelets durables es 0.5-0.7 mm, rango que se encuentra acorde a los valores del tamaño de partículas del polvo de madera. Estos autores indican que

partículas mayores a 1 mm pueden actuar como puntos de rompimiento en los pelets.

El 37.18% de las partículas de aserrín fueron retenidas en los tamices 0.250, 0.150 y ≤ 0.150 mm, el cual puede ser usado para producir pelets de buena calidad (Turner, 1995) y durables (Franke y Rey, 2006). También es aconsejable una mezcla de partículas de diferentes tamaños ya que ayuda a generar una buena unión entre partículas sin permitir espacios entre las mismas (MacBain, 1966; Payne, 1978; Grover y Mishra, 1996).

La mayor parte del 23.09% del aserrín retenido en el tamiz >0.850 mm, podría ser utilizado en la producción de pelets, sin embargo, partículas entre 5 y 10 mm deben ser destinadas hacia la elaboración de briquetas, ya que en esta industria se pueden integrar partículas de mayor tamaño (Tripathi et al., 1998; Ortiz et al., 2003).

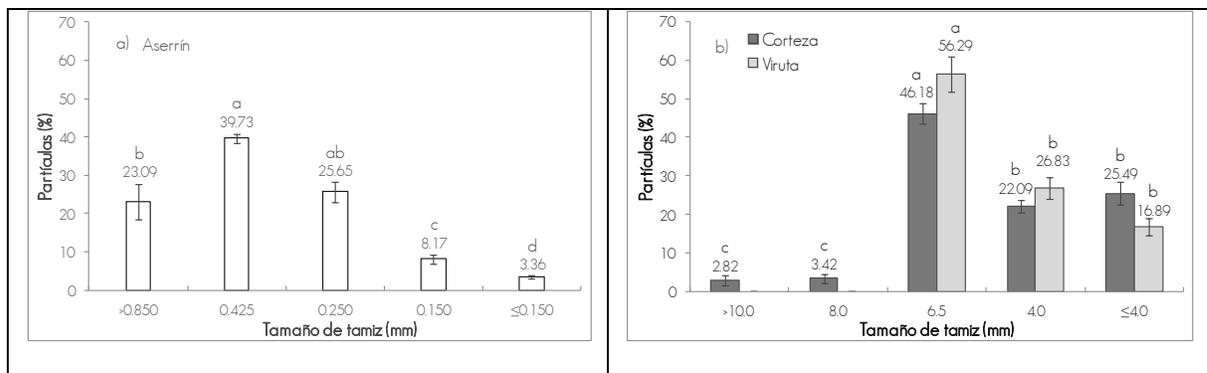


Figura 1. Distribución granulométrica de los subproductos: a) Aserrín y b) Corteza y viruta

Corteza de *Pinus*

El porcentaje de partículas de corteza de las tres especies de *Pinus* retenidas en cinco tamices fueron estadísticamente diferentes ($F=69.44$, $gl_e=4,55$, $p<0.001$), según se puede observar en la Figura 1b. Por otra parte, no hubo diferencias significativas en el tamaño de las partículas entre las especies ($H=0.16$, $gl=2$, $p=0.922$).

El 25.49% de las partículas de corteza del tamiz ≤ 4.0 mm, podría ser aprovechable en la elaboración de pelets. El mayor porcentaje de partículas de corteza (46.18%) se ubicó en el tamiz 6.5 mm. Las partículas de corteza procedentes de ambas fuentes presentaron grandes dimensiones y proporciones, lo anterior coincide con Miranda et al. (2012), quienes reportan valores de 66.0 y 50.3% de partículas mayores a 2 mm para cortezas de abeto y pino, respectivamente.

Se puede utilizar el 49.60% de las partículas de corteza para elaborar briquetas provenientes de los tamices 6.5 mm (46.18%) y 8 mm (3.42%), ya que se encuentran en el rango 6 a 8 mm indicado por Tripathi et al., (1998), y son inferiores a 10 mm (Ortiz et al., 2003). También, se puede añadir cierta cantidad del 22.09% de partículas mayores a 5 mm que fueron retenidas en el tamiz 4.0 mm (Ortiz et al., 2003).

Viruta de *Pinus*

El porcentaje de partículas de viruta de las tres especies de *Pinus* retenidas en cinco tamices fueron estadísticamente diferentes ($F=37.18$, $gl_e=2,15$, $p<0.001$), según se puede apreciar en la Figura 1b. Sin embargo, entre las especies no se presentaron diferencias significativas ($F=0.00$, $gl_e=2,15$, $p=1.0$). Las virutas de madera pueden ser de utilidad, según el tamaño y proporción ya que si superan el tamaño requerido para la elaboración de pelets deberán de ser molidas. Virutas pequeñas de madera obtenidas en máquinas de ejecución rápida pueden ser peletizadas sin antes ser molidas (Oberberger y Thek, 2010).

En la Figura 1b, se observa que más del 50% de las partículas de viruta de madera se quedaron retenidas en el tamiz 6.5 mm, valor dentro del rango 5-12 mm establecido para viruta según Oberberger y Thek (2010). El porcentaje de virutas menores o iguales a 4 mm fue de 16.89%, siendo aptas para ser aprovechadas en pelets. Se recomienda no usar partículas grandes, porque la resistencia de los pelets se genera principalmente por las fuerzas físicas y la interacción mecánica de las partículas durante el proceso de densificación (Kaliyan y Vance, 2009).

El 56.29% de las partículas de viruta retenidas en el tamiz 6.5 mm se pueden emplear en la producción de briquetas, además, se puede añadir cierta cantidad

del 26.83% de las partículas que fueron retenidas en el tamiz 4.0 mm y que correspondan a partículas mayores a 5 mm.

Corteza-aserrín de *Quercus*

El porcentaje de partículas de corteza-aserrín de *Quercus* retenidas en cinco tamices fueron estadísticamente diferentes ($F=522.38$, $gl_e=2,15$, $p<0.001$), (Figura 2). Por otro lado, no hubo diferencias estadísticas significativas entre las especies ($H=0.11$, $gl=2$, $p=0.949$).

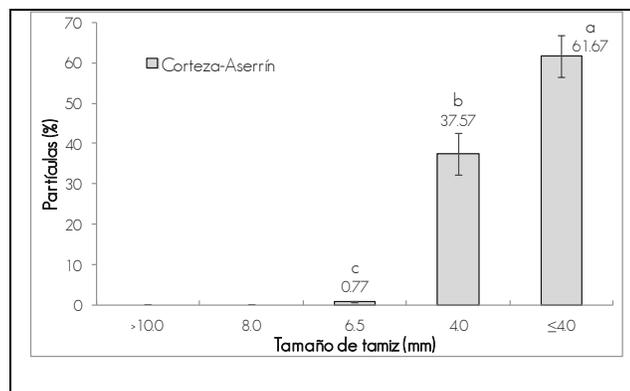


Figura 2. Distribución granulométrica de las partículas de corteza-aserrín de *Quercus*

Debido al tamaño de las partículas de madera obtenidas del bosque o industrial, se deben moler en cualquier caso antes de la peletización (Oberberger y Thek, 2010). Los mismos autores reportan que el rango para astillas de madera procedente del bosque es de 2.8 a 63 mm. Rango que abarca al 61.67% de

partículas de corteza-aserrín proveniente de la astilladora que fueron retenidas en el tamiz ≤ 4.0 mm, y que pueden ser aprovechadas en la producción de pelets en forma directa.

La producción de partículas grandes puede depender de la fuerza de tracción de la madera y de la flexibilidad del material a astillar. Esto ocurre en las maderas duras como *Quercus*. Según Hakkila (1984), lo anterior explica el aumento de la proporción de partículas de mayor tamaño en la madera de álamos ya que a medida que transcurre el tiempo de molido las cuchillas se desgastan. Este efecto se observa en la Figura 2, donde los tamices presentan mayor cantidad de material de encino que corteza y viruta de pino, aunque se hayan obtenido en otras máquinas. Por otra parte, la producción de astillas a partir de trozas siempre contiene una proporción menor de partículas grandes, y por tanto mayor cantidad de astillas aceptadas (Nati et al., 2010), caso que sucede con las especies de *Quercus* aquí analizadas, al aprovechar los árboles desde trozas hasta ramas grandes y pequeñas.

Según los tamaños de partículas indicados por Ortiz et al. (2003), se pueden elaborar briquetas con el 0.77% de las partículas de corteza-aserrín retenidas en los tamices 6.5 mm, además, se puede añadir cierta cantidad del 37.57% del material retenido en el tamiz 4.0 mm que corresponda a partículas de tamaño mayor o igual a 5 mm.

Aserradero

El tamaño de las partículas de aserrín y corteza obtenidas en el aserradero no presentaron diferencias estadísticas significativas ($H=7.87$, $gl_e=9$, $p=0.548$), (Figura 3a).

El mayor porcentaje de partículas en esta industria correspondió a 26.58%, las cuales fueron retenidas en el tamiz 6.5 mm. Se puede considerar que aproximadamente el 58.67% de las partículas obtenidas en el aserradero son menores o iguales a 4 mm, las cuales pueden aprovecharse en la producción de pelets. Así, mientras más pequeño sea el tamaño de partícula, mejor se desarrolla el proceso de densificación del combustible (Kaliyan y Vance, 2009).

En relación a la producción de briquetas y de acuerdo a las dimensiones de las partículas sugeridas por Tripathi et al., (1998) y Ortiz et al. (2003), pueden ser aprovechables 29.90% de las partículas residuales derivadas del aserradero, las cuales se quedan retenidas en los tamices 8.0 mm y 6.5 mm. Se puede incluir en la producción de briquetas, una proporción del 8.79% de partículas que fueron retenidas en el tamiz 4.0 mm, ya que corresponden a partículas de un tamaño mayor a 5 mm.

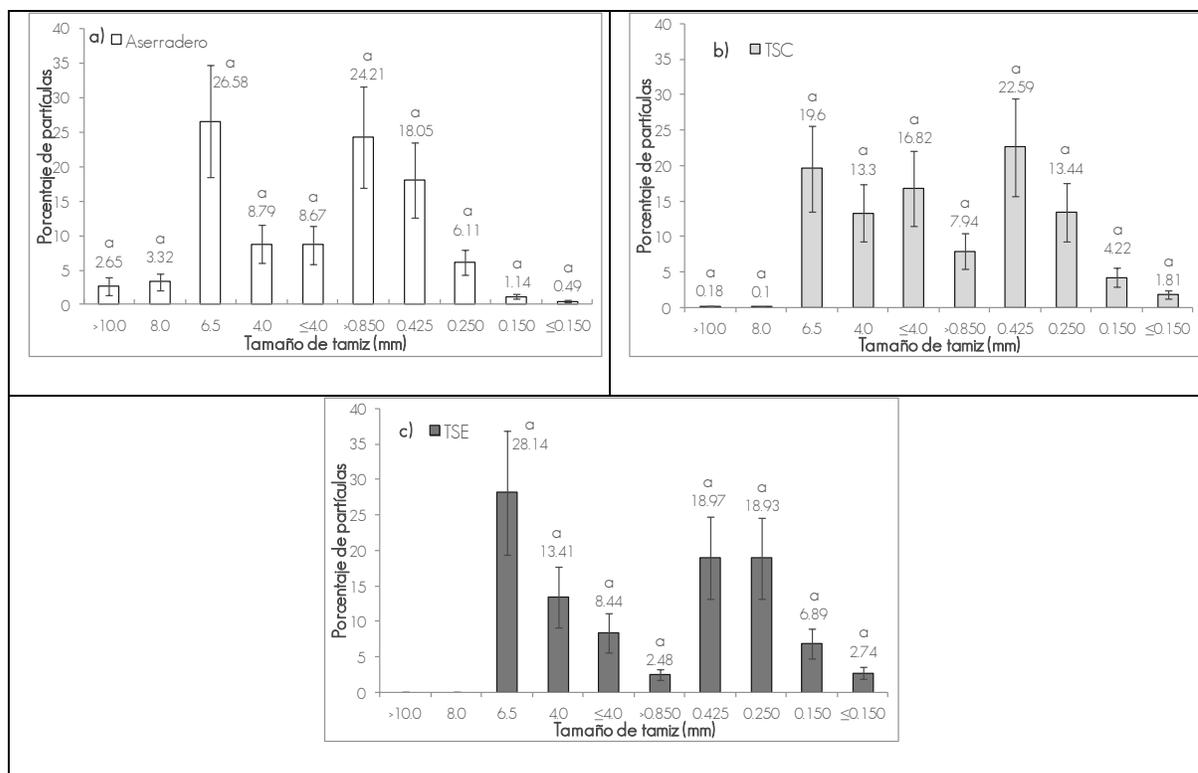


Figura 3. Distribución de tamaño de partículas por industria. a) Aserradero, b) Taller de secundarios de la comunidad (TSC) y c) Taller de secundarios externo (TSE)

Taller de secundarios de la comunidad

Los tamaños de partículas en el aserrín y corteza de *Pinus* obtenidos en el TSC no presentaron diferencias estadísticas significativas ($H=14.04$, $gl_e=9$, $p=0.121$), (Figura 3b).

Se puede apreciar que el 66.82% de las partículas obtenidas en el TSC presentaron tamaños menores o iguales a 4 mm, con posibilidad de uso para elaborar pelets, donde se incluye al mayor porcentaje de este material en el tamiz

0.425 mm con 22.59%. En cuanto a la relación partículas-durabilidad en los pelets, Lee et al. (2013), utilizó madera de *Larix kaempferi* C. (alerce), la cual presentó más alta durabilidad usando partículas pequeñas en lugar de grandes.

Respecto a la producción de briquetas utilizando subproductos provenientes del TSC, son susceptibles de aprovecharse el 19.70% de las partículas que se encontraron en el rango 5 a 10 mm, según dimensiones reportadas por Tripathi et al., (1998) y Ortiz et al. (2003). Una parte del 13.3% del material residual contenido en el tamiz 4.0 mm, también podría utilizarse para elaborar briquetas.

Taller de secundarios externo

Las partículas de aserrín, corteza y viruta de *Pinus* fueron de tamaños estadísticamente similares ($H=6.41$, $gl_e=7$, $p=0.492$), (Figura 3c).

Alrededor del 58.45% de las partículas residuales (menores o iguales a 5 mm) de este taller podrían ser aprovechables en la producción de pelets (Ortiz et al., 2003; Obernberger y Thek, 2010).

En referencia a la producción de briquetas, éstas podrían ocupar el 28.14% de los subproductos generados en el TSE, que fueron retenidos en el tamiz 6.5 mm. Según las dimensiones de la materia prima para elaborar briquetas (Tripathi et al., 1998; Ortiz et al., 2003), se podría agregar también, un porcentaje de las partículas encontradas en el tamiz 4.0 mm, representando el 13.41%.

CONCLUSIONES

La proporción en el tamaño de las partículas encontradas en el aserrín, la corteza, la mezcla corteza-aserrín y viruta fue diferente. Las partículas que conforman el polvo de madera incluido en el aserrín, son adecuadas para producir pelets de buena calidad y alta durabilidad. El 76.91% de las partículas de aserrín son aptas para elaborar pelets, aunque, sólo el 37.18% de ellas puedan ser utilizadas en la producción de pelets con buena calidad y con alta durabilidad.

El 25.49% de la corteza puede ser aprovechada en la producción de pelets, y el 49.60% de este mismo tipo de partículas se pueden emplear en la elaboración de briquetas.

Partículas de viruta en un 16.89% pueden ser aprovechadas en la elaboración de pelets, mientras que el 56.29% de las partículas de este subproducto podrían aplicarse en briquetas.

Las partículas de corteza-aserrín en un 61.67%, podrían ser aprovechadas en la producción de pelets. Sin embargo, en la elaboración de briquetas podrían ser usadas en un 0.77%.

A nivel de tipo de industria y con los mismos subproductos, en el aserradero puede utilizarse hasta el 58.67% de aserrín y corteza en pelets. Además, esta industria puede abastecer la producción de briquetas con 29.90% de los subproductos.

En el TSC, 66.82% de aserrín y corteza podrían usarse en pelets. Por otro lado, esta industria genera 19.70% de subproductos aptos para elaborar briquetas.

El TSE tiene 58.45% de las partículas disponibles para pelets. Adicionalmente, este tipo de industria podría suministrar aserrín, corteza y viruta en un 28.14% para producir briquetas.

La proporción del tamaño de las partículas en las diferentes industrias fue similar. Finalmente, la mayor parte de las partículas de aserrín y de la mezcla corteza-aserrín, se podrían utilizar en la producción de pelets y las partículas de corteza y viruta en la producción briquetas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo otorgado por personal de la CINSJP, del taller “Tarimas López”, del Departamento de Madera Celulosa y Papel de la Universidad de Guadalajara, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (FITECMA), de la Universidad Autónoma de Nuevo León (Facultad de Ciencias Forestales), de la Universidad de Pinar del Río (CEETES-Cuba) y del CONACYT por el proyecto No. 166444.

REFERENCIAS

- Antolín, G., 2006. La gestión y el aprovechamiento de los residuos en la industria de la madera, Proyecto Mejora de la Eficiencia y de la Competitividad de la Economía Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina, pp. 29.
- Franke, M. and Rey, A., 2006. Pelleting quality. *World Grain* 2006 May, 78(9).
- Grover, P. and Mishra, S., 1996. Biomass briquetting: technology and practices. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hakkila, P., 1984. Forest chips as fuel for heating plants in Finland.
- Hayter, A.J., 1984. A Proof of the Conjecture that the Tukey-Kramer Multiple Comparisons Procedure is Conservative. *The Annals of Statistics*, 12(1): 61-75.
- Kaliyan, N. and Vance, M.R., 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3): 337-359.
- Kruskal, W.H. and Wallis, W.A., 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American statistical Association*: 583-621.
- Lee, S.m. et al., 2013. Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Biomass and Bioenergy*, 48(0): 1-9.
- MacBain, R., 1966. Pelleting animal feed. Chicago, IL: American Feed Manufacturing Association.
- Miranda, I., Gominho, J., Mirra, I. and Pereira, H., 2012. Chemical characterization of barks from *Picea abies* and *Pinus sylvestris* after fractioning into different particle sizes. *Industrial Crops and Products*, 36(1): 395-400.

- Nati, C., Spinelli, R. and Fabbri, P., 2010. Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. *Biomass and Bioenergy*, 34(5): 583-587.
- Obernberger, I. and Thek, G., 2010. *The Pellet Handbook*. Earthscan, London-Washington DC, 593 pp.
- Ortiz, L., Tejada, A., Vázquez, A. and Piñeiro, G., 2003. Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. *Revista CIS-Madera*, Galicia, España.
- Payne, J., 1978. Improving quality of pellet feeds. *Milling Feed and Fertilizer*, 162: 34-41.
- Silva, G.G.D. and Xavier, R.S.G., 2011. Successive centrifugal grinding and sieving of wheat straw. *Powder Technology*, 208(2): 266-270.
- Tripathi, A.K., Iyer, P.V.R. and Kandpal, T.C., 1998. A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India. *Biomass and Bioenergy*, 14(5-6): 479-488.
- Turner, R., 1995. Bottomline in feed processing: achieving optimum pellet quality. *Feed Management*, 46(30): 3.
- UNE-EN14774-3, 2010. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general. In: G. 9 (Editor), AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos. CONFEMADERA. AENOR, Madrid, España, pp. 9.
- UNE-EN-15149-1, 2011. Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución de tamaño de partícula. Parte 1: Método del tamiz oscilante con abertura de malla igual o superior a 1 mm. In: G. 11 (Editor), AEN/CTN 164

Biocombustibles sólidos. CONFEMADERA. AENOR, Madrid, España, pp. 14.

UNE-EN-15149-2, 2011. Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación de la distribución de tamaño de partícula. Parte 2: Método del tamiz vibrante con apertura de malla inferior o igual a 3,15 mm. In: G. 12 (Editor), AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos. CONFEMADERA. AENOR, Madrid, España, pp. 15.

5. CONCLUSIONES GENERALES

El CH en los subproductos de las especies estudiadas fue relativamente mayor a lo requerido para la producción de pelets y briquetas, su empleo requerirá de un acondicionamiento que implica la aplicación de energía.

Las especies de *Quercus* presentaron mayor porcentaje de ceniza que las de *Pinus*, de la misma manera, la corteza presentó mayores valores de ceniza que el aserrín. Basado en el bajo porcentaje de ceniza presente en el aserrín de las especies de *Pinus* proveniente del aserradero, se considera que éste podría ser usado para la producción de pelets de la clase A1. La corteza-aserrín de *Q. candicans* y corteza de *P. leiophylla* y *P. montezumae* podrían ser usadas en la elaboración de briquetas. El aserrín y viruta proveniente de talleres de secundarios, pueden emplearse en la producción de pelets y briquetas. La corteza de *P. montezumae* obtenida en forma manual y mecánica, y de *P. leiophylla* de la fuente manual, puede utilizarse en la producción de pelets de la clase A2. La corteza de *P. pseudostrobus* obtenida en ambas fuentes y la corteza de *P. leiophylla* obtenida de la fuente mecánica, pueden usarse en pelets de la clase B. Por otra parte, ambas cortezas y sus fuentes de obtención pueden utilizarse para la producción de briquetas.

El análisis de los elementos inorgánicos en todos los subproductos mostró contenidos altos de Ca, lo que favorece al punto de fusión en la ceniza. Altos contenidos de Si, Fe y Al se presentaron en la corteza, lo cual está relacionado con el proceso de obtención. Los contenidos de S en los subproductos son mayores a los permitidos en pelets y briquetas.

En referencia a la granulometría de las partículas, el aserrín y la mezcla de corteza-aserrín, son los idóneos para elaborar pelets. Corteza y viruta por sus porcentajes de partícula más grandes, las hacen más aptas para producir briquetas.

Considerando todos los análisis anteriores en los subproductos; el aserrín de *P. pseudostrobus* mostró las mejores propiedades para su uso en pelets de la clase A1, que el aserrín de las otras especies.

La corteza-aserrín de *Q. candicans* fue la mejor para ser usada en briquetas de corteza que los demás subproductos con corteza.

La corteza de *P. leiophylla* y la de *P. montezumae* obtenidas de la fuente manual del taller de secundarios externo a la CINSJP es la que presentó las mejores propiedades para su uso en pelets y briquetas que la obtenida del molino.

El aserrín de los talleres presentó las mejores propiedades para su uso en pelets y briquetas que la viruta.

6. PUBLICACIONES PRODUCIDAS Y PARTICIPACIÓN EN CONGRESOS

Artículo científico

Fermín Correa-Méndez; Artemio Carrillo-Parra; José Guadalupe Rutiaga-Quiñones; Humberto González-Rodríguez; Enrique Jurado-Ybarra; Fortunato Garza-Ocañas. (2013). Humedad, Ceniza e Inorgánicos en Corteza Industrial de Tres Pinos para Bioenergía. **Revista Forestal Baracoa**. Vol. 32, No. 2. ISSN 0138 – 6441 (Formato impreso), ISSN 2078 – 7235 (Formato electrónico).

Manuscritos

Fermín Correa-Méndez; Artemio Carrillo-Parra; José Guadalupe Rutiaga-Quiñones; Humberto González-Rodríguez; Enrique Jurado-Ybarra; Fortunato Garza-Ocañas. (2013). Moisture and Ash Elemental Content of Sawmill Industry Byproducts from Three Forest Species and their Evaluation as Feedstock for Densified Biofuels. **Enviado al Journal Solid Fuel Chemistry**.

Fermín Correa-Méndez; Artemio Carrillo-Parra; José Guadalupe Rutiaga-Quiñones; Francisco Márquez-Montesino; Humberto González-Rodríguez; Enrique Jurado-Ybarra; Fortunato Garza-Ocañas. (2013). Contenido de Humedad y

Sustancias Inorgánicas en Subproductos Maderables de Pino para su Uso en Pelets y Briquetas. **Enviado a la *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*.**

Fermín Correa-Méndez; Artemio Carrillo-Parra; José Guadalupe Rutiaga-Quiñones; Francisco Márquez-Montesino; Humberto González-Rodríguez; Enrique Jurado-Ybarra; Fortunato Garza-Ocañas. (2013). Distribución Granulométrica en Subproductos de Aserrío para su Posible Uso en Pelets y Briquetas. **Enviado a la *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*.**

Participación en congreso y simposio

Fermín Correa-Méndez; Artemio Carrillo-Parra; José Guadalupe Rutiaga-Quiñones; Humberto González-Rodríguez; Enrique Jurado-Ybarra; Fortunato Garza-Ocañas. (2013). Humedad, Ceniza e Inorgánicos en Corteza Industrial de Tres Pinos para Bioenergía. *II Simposio Científico Internacional "Universidad de Pinar del Río 2012". VII TALLER INTERNACIONAL SOBRE MANEJO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS FORESTALES. 23 al 26 de octubre del año 2012. Pinar del Río, Cuba.*

([http://simposio.upr.edu.cu/memorias/docs/Comision de Aprovechamiento Forestal/Articulo_Fermin_Correa_Mendez.pdf](http://simposio.upr.edu.cu/memorias/docs/Comision_de_Aprovechamiento_Forestal/Articulo_Fermin_Correa_Mendez.pdf)). ISBN: 978-959-16-2044-6.

Fermín Correa-Méndez; Artemio Carrillo-Parra; José Guadalupe Rutiaga-Quiñones; Humberto González-Rodríguez; Enrique Jurado-Ybarra; Fortunato Garza-Ocañas. (2013). Contenido de humedad, ceniza y su microanálisis en residuos de astilladora de tres especies de encinos de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México: Su evaluación para biocombustibles densificados. *1er Congreso Sustentabilidad e interculturalidad: paradigmas entre la relación cultura y naturaleza*. 04 al 06 de Marzo de 2013. Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Pichátaro, Michoacán, México.