

COMPORTAMIENTO DE LOS MINERALES QUE CONSTITUYEN LAS CENIZAS DE BIOCOMBUSTIBLES DE ORIGEN FORESTAL

[BEHAVIOR OF THE MINERALS THAT CONSTITUTE THE ASHES OF BIOFUELS OF FOREST ORIGIN]

Juan Carlos Contreras-Trejo¹, Daniel José Vega-Nieva², José Ángel Prieto-Ruiz², Cynthia Adriana Nava-Berumen³, José Guadalupe Rutiaga-Quiñones⁴, Artemio Carrillo-Parra^{5§}

¹Universidad Juárez del Estado de Durango. Maestría Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales. Constitución 404 sur, zona centro, Durango, Dgo., México. C.P. 34000. ²Universidad Juárez del Estado de Durango. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Río Papaloapan y Boulevard Durango S/N Col. Valle del Sur, Durango, Dgo., México. C.P. 34120. ³Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana. Highway 22.5, Durango, Dgo., México, C.P. 34371. ⁴Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Madera. C. de Santiago Tapia 403, Centro, Michoacán, México. C.P. 58004. ⁵Universidad Juárez del Estado de Durango. Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera. Boulevard del Guadiana, Torre de Institutos No. 500. Durango, Durango. México.

§Autor para correspondencia: (acarrilloparra@ujed.mx).

RESUMEN

Los biocombustibles sólidos proveen energía renovable, sustituyen los combustibles fósiles y reducen las emisiones atmosféricas. Sin embargo, la biomasa genera ceniza con diferentes concentraciones de minerales que puede provocar problemas durante la combustión. Altas concentraciones de metales alcalinos favorecen procesos de sinterización, fusión y pegajosidad de las cenizas y los metales alcalinotérreos como el Ca y Mg que son refractarios y aumentan el punto de fusión de la ceniza. El objetivo del presente trabajo fue determinar la concentración de los minerales presentes en las cenizas de la biomasa de especies de importancia forestal en México como *Pinus patula*, *P. durangensis*, *Quercus laeta*, *Q. sideroxyla*, *Q. konzattii* y *Juniperus deppeana* y establecer el efecto de estos durante la combustión. Se determinó la concentración de los micronutrientes Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S y Si empleando un espectrofotómetro de rayos X acoplado a un microscopio electrónico de barrido. Se realizaron pruebas de ANOVA y de Kruskal-Wallis para comparar concentraciones de elementos entre biomásas. Se observaron diferencias estadísticas significativas entre biomásas ($p < 0.05$). Todas las muestras presentaron altos contenidos de calcio lo cual favorece el punto de fusión de las cenizas. *Q. konzattii* mostró una alta concentración de potasio (42.54%) y baja concentración de sílice (3.49%). Debido a la concentración alta de potasio de *Q. konzattii* se recomienda tomar a consideración su uso, por otra parte, se encontraron altas concentraciones de azufre para todas las especies.

Palabras clave: Elementos alcalinos, fusibilidad, microanálisis, sinterización.

ABSTRACT

Solid biofuels provide renewable energy, replace fossil fuels and reduce atmospheric emissions. However, biomass generates ash with different concentrations of minerals that can cause problems during combustion. High concentrations of alkali metals favor processes of sintering, melting and stickiness of the ashes and alkaline earth metals such as Ca and Mg are refractory and increase the melting point of the ashes. The objective of the present work was to determine the concentration of the minerals present in the ashes of the biomass of species of forest importance in Mexico such as *Pinus patula*, *P. durangensis*, *Quercus laeta*, *Q. sideroxyla*, *Q. konzattii* and *Juniperus deppeana* and to establish the effect of these during combustion. The

Recibido: 20-enero-2021

Aceptado: 31-marzo-2021

determination of the micronutrients Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S and Si was carried out at the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. An X-ray spectrophotometer coupled to a scanning electron microscope was used for quantification. ANOVA and Kruskal-Wallis tests were performed to compare element concentrations between biomasses. Concentration differences between biomasses were observed ($p < 0.05$). All the samples presented high calcium contents, which favors the melting point of the ashes. *Q. conzattii* showed a high concentration of potassium (42.54%) and a low concentration of silica (3.49%). Due to the high concentration of potassium in *Q. conzattii*, it is recommended to consider its use, on the other hand, high concentrations of sulfur were found for all species.

Index words: Alkaline elements, fusibility, microanalysis, sintering.

INTRODUCCIÓN

El incremento demográfico, el desarrollo industrial y tecnológico y el agotamiento de las reservas internacionales de petróleo, reducen la disponibilidad de los combustibles fósiles e incrementan la contaminación del medio ambiente. Para enfrentar lo anterior se proponen el desarrollo de energías renovables basadas en la biomasa (Tun *et al.*, 2019). La biomasa que se produce puede ser empleada para la elaboración de diferentes biocombustibles sólidos como *pellets* mediante procesos de astillado, triturado y compactación que mejoran el rendimiento y las características combustibles (Ríos *et al.*, 2017).

Los *pellets* de biomasa se caracterizan por ser una fuente de energía ecológica y económica, se elaboran a partir de residuos de la industria agro-forestal, su uso está enfocado principalmente como combustible para la generación de calor en estufas domésticas, aunque en la actualidad su consumo de industrias está aumentando progresivamente (Pérez-Arteaga, 2019).

El potencial energético de los *pellets* de residuos forestales y agrícolas en México varía de 131 a 233 PJ/año, esta energía sustituiría el 73% de la demanda de gas LP para calefacción residencial y comercial, además se podrían mitigar el 18% de emisiones de GEI de la producción de electricidad (Tauro *et al.*, 2018).

No obstante, de los beneficios ecológicos, económicos y sociales que pudieran proporcionar los *pellets*, estos presentan una serie de limitantes cuando son empleados en calderas industriales y domésticas. La heterogeneidad al ser elaborados de un gran número de especies, el efecto de elaboración con diferentes procesos, el desconocimiento de los elementos alcalinos que los componen, así como el comportamiento de las sus cenizas durante los procesos de combustión (Shao *et al.*, 2012).

Los mecanismos de formación de cenizas durante la combustión del carbón mineral han sido ampliamente estudiados y sus efectos son bien conocidos. Para la biomasa, sin embargo, se cuenta con poca información por lo que consideran necesario hacer más investigaciones. La formación de cenizas durante el proceso de combustión de la biomasa se considera un proceso muy complejo, pero, la concentración y el comportamiento se pueden establecer cuándo se conoce la distribución, la forma y la asociación de los elementos orgánicos e inorgánicos que están presentes como sales disueltas y minerales (Kleinhans *et al.*, 2018).

El uso de *pellets* de biomasa como elementos de calefacción en la industria se ha limitado por desconocer los elementos y las proporciones en que componen las cenizas. El contenido de cenizas se define como la fracción mineral de un combustible en forma oxidada, y se compone principalmente por concentraciones de calcio, magnesio, silicio y potasio los cuales tienen una estrecha relación con el punto de fusión de la ceniza y la formación de escorias, que están asociados a los riesgos que se generan en las estufas domésticas y equipos de combustión a gran escala y con los sistemas de limpieza de calderas (Obernberger and Thek, 2010).

Adicional a lo anterior, se tiene que la temperatura de combustión también juega un papel importante en el proceso de transformación de los minerales que componen las cenizas, esto se ve reflejado en que algunas partículas pueden presentarse en estado fundido o sinterizado dependiendo de la temperatura del proceso, se tienen reportes en los que compuestos minerales a base de sodio con tamaño inferior a 10 mm pueden presentarse en estado sinterizado a temperaturas altas (Lu *et al.*, 2017).

MATERIALES Y MÉTODOS

Elaboración de *pellets*

El aserrín de las especies *Pinus patula*, *P. durangensis*, *Quercus laeta*, *Q. sideroxyla* y *Juniperus deppeana* se obtuvo de aserraderos ubicados en la región del Salto, Durango, mientras que el aserrín perteneciente a la especie *Q. conzattii* se obtuvo de la región de Guadalupe y Calvo, Chihuahua.

La biomasa se acondicionó a temperatura ambiente extendiéndose en una lona durante dos semanas, el contenido de humedad se estuvo monitoreando hasta alcanzar una humedad del 12%. Los *pellets* se elaboraron en una máquina pelletizadora de matriz plana Mill modelo ZSLP-R300 con capacidad de 250–350 kg h⁻¹, el proceso de transformación de la biomasa consistió en la densificación mediante rodillos giratorios que elevan la temperatura presionando la biomasa por un plato con orificios de 3.15 mm facilitando la aglomeración de las partículas por la fusión de la lignina que contienen el aserrín y dando como resultado los *pellets* (Figura 1).



Figura 1. Proceso de elaboración de pelles. A. Acondicionamiento del material a temperatura ambiente. B. Proceso de pelletización. C. *Pellets* obtenidos.

Análisis de minerales

Se generó aproximadamente 2 g de ceniza de *pellets* en una mufla Thermolyne furnace 1400 a temperatura de 550 °C de acuerdo a la norma UNE-EN 14775 (2010). Las concentraciones de los minerales Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, P, Si, S y Na se cuantificaron mediante un espectrofotómetro de dispersión de rayos X (Bruker AXS, Alemania) acoplado a un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM-6400, Japón) las condiciones de análisis fueron 15 kV y 30 s obteniéndose la distribución granulométrica de cada muestra y los espectros en puntos aleatorios (Figura 2).

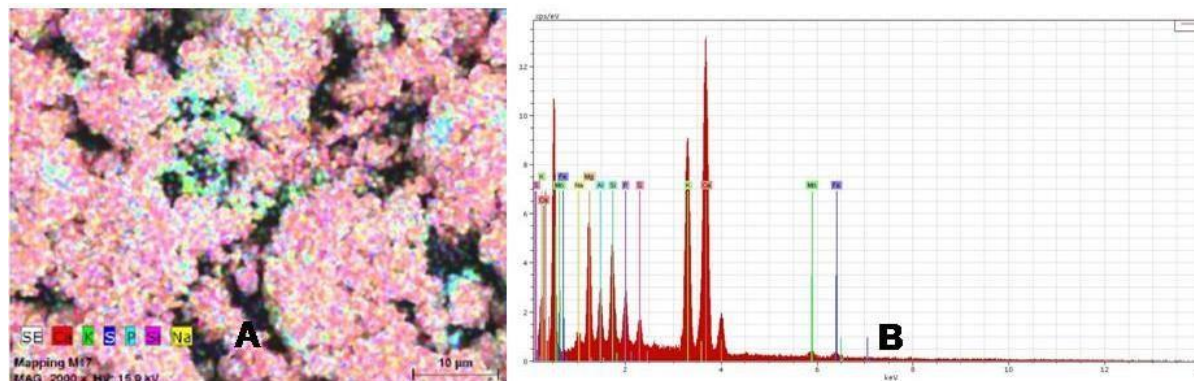


Figura 2. Determinación de los minerales. A. Muestra la distribución granulométrica de los micronutrientes de las cenizas. B. Se observan los espectros de dispersión de energía de rayos X para los minerales de las cenizas en puntos aleatorios.

Análisis estadísticos

Valores medios y desviaciones estándares se calcularon del contenido de minerales de los *pellets* de cada fuente. Asimismo, los datos se analizaron con el software R Studio versión 3.4.4., mediante una prueba de Shapiro-test se determinó el cumplimiento de la normalidad de los datos, para establecer la existencia de diferencias entre los grupos muestreados se utilizó una prueba de Kruskal-Wallis para datos no paramétricos y una prueba de Tukey para datos paramétricos considerando el valor de $p < 0.05$ como significativo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante la prueba de Shapiro-Wilk se encontró que los minerales calcio, hierro, magnesio, potasio, sílice y azufre cumplen con la normalidad de datos; por otra parte, los micronutrientes aluminio, manganeso, fosforo y sodio no presentaron distribución normal en los datos, en el cuadro 1 muestra las pruebas de normalidad y los análisis de varianza.

Cuadro 1. Pruebas de Shapiro-Wilk, Kruskal-Wallis y ANOVA ($p < 0.05$) de los minerales.

Minerales	Shapiro-Wilk test	Kruskal-Wallis test		ANOVA test	
	p-Value	Chi-squared	p-Value	F value	p-Value
Aluminio	0.002	11.139	0.048	-	-
Calcio	0.342	-	-	7.171	0.002
Hierro	0.121	-	-	2.801	0.066
Magnesio	0.220	-	-	9.188	0.008
Manganeso	0.022	14.778	0.011	-	-
Fosforo	0.002	9.233	0.100	-	-
Potasio	0.080	-	-	22.881	9.45×10^{-6}
Sílice	0.638	-	-	22.825	9.57×10^{-6}
Azufre	0.573	-	-	5.692	0.006
Sodio	0.005	7.875	0.163	-	-

Los resultados del ANOVA mostraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) en la concentración de los minerales entre *pellets* de diferentes especies de biomasa. Los *pellets* de *J. deppeana* fueron el biocombustible con mayor contenido de calcio, seguidos por *P. patula*, el menor contenido de

calcio lo presento *Q. conzattii*, por otra parte las mayores concentraciones de magnesio las presento *Q. conzattii* y *P. durangensis* y en menor cantidad *J. deppeana*, asimismo el contenido de potasio fue en mayor medida para las muestras *Q. conzattii* y *Q. laeta* y en menor cantidad para *P. durangensis*, finalmente se determinó que la mayor cantidad de sílice la tuvieron los *pellets* elaborados a partir de aserrín de *Q. sideroxyla* y *P. durangensis* mientras que la menor concentración fue para *Q. s laeta* (Figura 3).

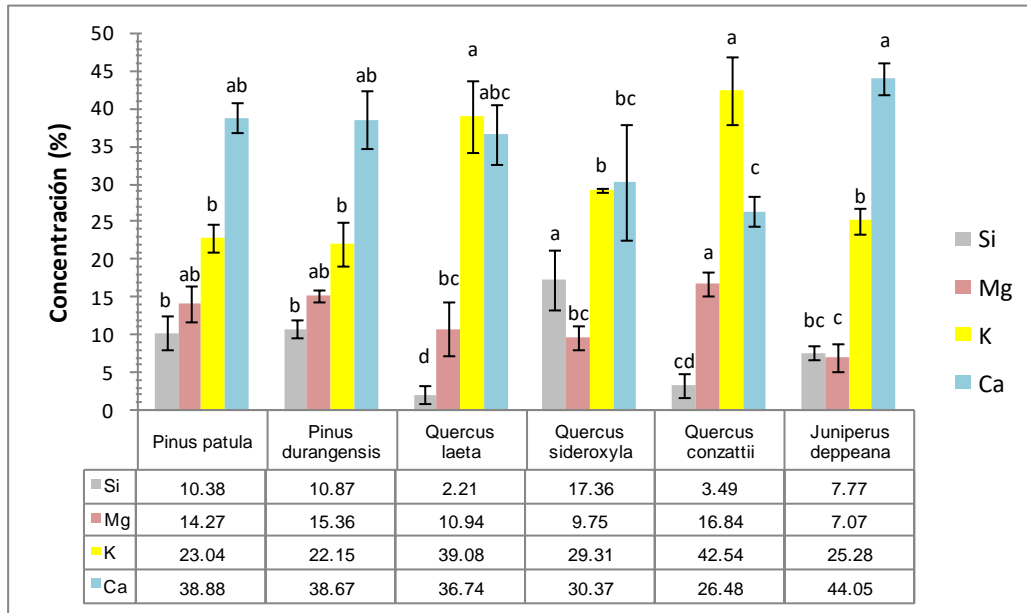


Figura 3. Concentración (%) de calcio, potasio, magnesio y sílice de los *pellets* evaluados. Las líneas que se observan encima de las barras muestran la desviación estándar de los datos, especies con literales distintas indican que son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$).

Los minerales aluminio, azufre y manganeso presentaron diferencias significativas caso contrario sucedió con hierro, fósforo y sodio (Figura 4).

Calcio y magnesio

Las concentraciones de CaO y MgO en los *pellets* de *Q. laeta* fue de 36.74 y 10.94%, respectivamente, mientras que para *Q. sideroxyla* fue de 30.37 y 9.75% *Q. conzattii* se mantuvo con valores bajos de CaO y altos de MgO (26.48 y 16.84%), respectivamente. En un estudio acerca de los mecanismos de formación de cenizas Boström *et al.* (2012), encontraron que el CaO y MgO son elementos de carácter refractario y permanecerán sólidos a altas temperaturas de combustión y como consecuencia no disminuyen significativamente con aumentos de temperatura. Al usar un espectrómetro de fluorescencia de rayos X Philips Magix Pro para caracterizar químicamente residuos de biomasa de podas de *P. pinaster*. Lapuerta *et al.* (2008), encontraron concentraciones de CaO (31.79%) y MgO (8.17%) similares a los obtenidos en el estudio para las especies *P. patula* (38.88 y 14.27%) y *P. durangensis* (38.67 y 15.36%). Por otra parte, Vega-Nieva *et al.* (2016), en el estudio de la composición química de *pellets* de virutas de encino mediante espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) encontraron concentraciones de CaO (36.5%) y MgO (9.22%).

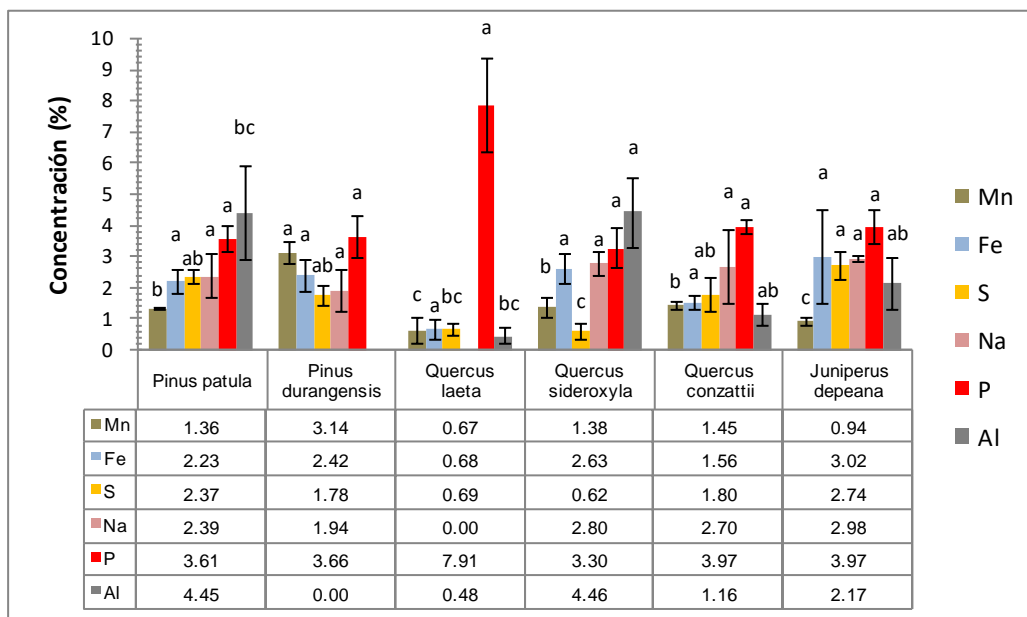


Figura 4. Concentración (%) de aluminio, fosforo, sodio, azufre, hierro y manganeso. Las líneas que se observan encima de las barras muestran la desviación estándar de los datos, especies con literales distintas indican que son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$).

Potasio y sodio

La biomasa de *P. patula*, *P. durangensis* y *J. deppeana* presentaron concentraciones de potasio 23.04, 22.15 y 25.28%, respectivamente, mientras que de sodio fueron 2.39, 1.94 y 2.98%, respectivamente. Valores similares de K_2O con 22.32% y Na_2O con 0.42% fueron reportados por Thy *et al.* (2005) al analizar *P. ponderosa* mediante fluorescencia de rayos X (XRF). En ese sentido, Thy *et al.* (2000), mencionan que los metales alcalinos (K y Na) generalmente se caracterizan por ser óxidos menos estables que conforman las cenizas y a temperaturas superiores a los 550 °C se reducen a vapor de metal, incluso estos pueden reaccionar con las moléculas de agua y formar KOH y NaOH los cuales son compuestos muy inestables y relativamente volátiles. Por lo regular la biomasa que contiene altas concentraciones de K y Si, así como concentraciones bajas de Ca y Mg reaccionan con los contenidos de Si dispersos en la estructura orgánica del combustible y forman una masa alcalina- silicato pegajosa lo cual agrava los problemas de formación de escorias en los sistemas de combustión (Gilbe *et al.*, 2008).

Sílice

En las especies estudiadas la concentración de sílice fue del 3 a 15%, por lo que se considera una concentración baja a alta. Nordin (1994), comenta que generalmente las altas concentraciones de Si están asociadas a muestras de madera contaminadas, menciona que la biomasa con cantidades relativamente bajas en sílice no presenta riesgos de formación de silicatos pegajosos en calefactores que funcionan con temperaturas superiores a los 1000 °C. Por lo regular los combustibles de biomasa herbácea suelen tener altas concentraciones de sílice y metales alcalinos como potasio y sodio los cuales pueden presentar una alta tendencia a la formación de escorias, sinterización de cenizas y puntos de fusibilidad por debajo de los 550 °C (Öhman *et al.*, 2004). En un estudio acerca de especies de arbustos nativos del centro de Portugal, Viana *et al.* (2012), encontraron contenidos de metales alcalinos superiores al 30% lo que representa riesgos potenciales de sinterización, ensuciamiento y aglomeración de cenizas, también encontraron concentraciones de sílice en *Ulex europaeu* (33.6%), *Cytisus multiflorus* (16.6%) y *Erica australis* (17.0%) valores muy por encima a los determinados en este estudio posiblemente por el tipo de biomasa evaluada y el lugar de procedencia.

Hierro y manganeso

El hierro fue más abundante en *pellets* de *J. deppeana* (3.02%) y *Q. sideroxyla* (2.63%) y menos abundante en *Q. laeta* (0.68%). Las concentraciones más altas de manganeso las presentaron los *pellets* de *P. durangensis* (3.14%) y *Q. conzattii* (1.45%) y la más baja *Q. laeta* (0.67%). Yan *et al.* (2019), encontraron que las fuentes de biomasa con altos contenidos de metaloides (Fe y Mn) están asociadas generalmente a agentes contaminantes presentes en los residuos, en equipos de combustión, en aditivos o contaminación por pinturas y revestimientos empleados en la madera, mencionan que las cantidades altas de metaloides y metales pesados son toxicas y debe tomarse en consideración su uso. Por otro parte mediante análisis de difracción de rayos X en polvo (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de rayos X (EDS) Zhang *et al.* (2013), encontraron una relación biomasa/mineral (Mn) donde el elemento generalmente tiende a reducirse.

Además, durante la combustión los volátiles condensables (alquitrán) liberados de la pirolisis de biomasa reaccionaron con el mineral de óxido de manganeso para producir gases reductores no condensables como hidrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos. Demirbas (2004), reporta contenidos de Fe_2O_3 de combustibles de cáscara de nuez (2.4%), madera de encino rojo (9.5%), paja de trigo (3.5%) y cascara de avellana (3.1%), mientras que Vega-Nieva *et al.* (2016), encontraron concentraciones de MnO en muestras de aserrín de pino (0.46%) y aserrín de encino (0.64%).

Aluminio

Los *pellets* de *Q. sideroxyla* y *P. patula* presentaron altas cantidades de Al (4.46 y 4.45%), mientras que los de *Pinus durangensis* no presentaron concentraciones de este elemento. Zevenhoven *et al.* (2012), mencionan que el aluminio puede estar presente en muchas formas generalmente como silicato, este puede reaccionar con los vapores alcalinos afectando los vapores generados en las quemas, durante los procesos de combustión el aluminio forma alúmina (Al_2O_3) que es un compuesto solido que no participa de forma significativa en la química de las cenizas. Fernández-Llorente *et al.* (2006), han encontrado concentraciones de Al_2O_3 en *pellets* de *Brassica* (1.3%), cardo (2.3%) y cascara de nuez (0.49%), mientras que Scurlock *et al.* (2000), reportan contenidos en plantas de bambú de hasta 0.99%.

Fosforo

Este mineral fue más abundante en *pellets* de *Q. laeta* (7.91%), *Q. conzattii* (3.97%) y *J. deppeana* (3.97%) y menos abundante en *Q. sideroxyla* (3.30%). Se ha encontrado en *pellets* de madera y astilla que las altas concentraciones de P forman sales de fosfato de baja fusión lo cual ocasiona la formación de partículas de cenizas parcialmente fundidas que agravan la aglomeración, la formación de escorias y el ensuciamiento de las calderas (Zevenhoven *et al.*, 2012). Durante la combustión los fosfatos ricos en K se presentan puntos de fusión muy bajos que oscilan entre los 650 a 700 °C (Lindström *et al.*, 2007); por lo anterior, Grimm *et al.* (2011), mencionan que las cenizas ricas en fosfatos reaccionan formando capas de revestimientos de silicato/fosfato que son responsables del proceso de aglomeración; sin embargo, los problemas relacionados del P con las cenizas es un proceso confuso y se requiere de más estudios. Vega-Nieva *et al.* (2016), reportan contenidos de P_2O_5 para viruta de pino (7.14%), virutas de eucalipto (16.30%) y virutas de encino (10.33%).

Azufre

Altos contenidos de azufre lo presentaron *J. deppeana* (2.74%) y *P. patula* (2.37%) y el más bajo fue *Q. laeta* (0.69%). Bahng *et al.* (2009), estudiaron los procesos de conversión química de la biomasa mediante diferentes métodos de pirolisis y gasificación y encontraron que las concentraciones altas de SO_2 están estrechamente asociadas con los problemas de emisiones durante la combustión lo que puede causar formación de depósitos y corrosión en las calderas de combustión. Wei *et al.* (2005), analizaron muestras

de madera y encontró concentraciones de SO₂ de 4.95%, mientras que Miles *et al.* (1995), encontraron en muestras de residuos de madera 1.99%, valores relativamente similares a los obtenidos.

CONCLUSIONES

El aserrín de las especies *P. patula*, *P. durangensis*, *Q. sideroxyla* y *J. deppeana* puede utilizarse para la producción de *pellets* y para su combustión en sistemas de uso industrial o doméstico, sin presentar problemas de escoriación, fusibilidad o sinterización de cenizas. Se recomienda tomar a consideración el uso de aserrín de *Q. conzattii* y *Q. laeta* para la producción de biocombustibles sólidos y las temperaturas de combustión a las que se van a someter ya que estas especies presentaron altos contenidos de K (42.54 y 39.08%) y contenidos de calcio relativamente bajos (26.48 y 36.74%) a diferencia de las otras especies analizadas, las concentraciones de azufre fueron relativamente altas en todas las especies a excepción de *Q. laeta* y *Q. sideroxyla* (0.69 y 0.62%).

LITERATURA CITADA

- Bahng, M.K., C. Mukarakate, D.J. Robichaudc and M.R. Nimlos. 2009. Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review. *Analytica Chimica Acta*, 651(2), 117–138. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.08.016>.
- Boström, D., N. Skoglund, A. Grimm, C. Boman, M. Öhman, M. Boström and R. Backman. 2012. Ash transformation chemistry during energy conversion of biomass. *Energy & Fuels*, 26, 85–93. [http://pure.ltu.se/portal/en/publications/ash-transformation-chemistry-during-energy-conversion-of-biomass\(fe6a22f0-b78b-11df-a707-000ea68e967b\).html](http://pure.ltu.se/portal/en/publications/ash-transformation-chemistry-during-energy-conversion-of-biomass(fe6a22f0-b78b-11df-a707-000ea68e967b).html).
- Demirbas, A. 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>.
- Fernández-Llorente, M.J., R. Escalada-Cuadrado, J.M. Murillo-Laplaza and J.E. Carrasco-García. E. 2006. Combustion in bubbling fluidised bed with bed material of limestone to reduce the biomass ash agglomeration and sintering. *Fuel*, 85(14–15), 2081–2092. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.03.018>.
- Gilbe, C., O. Marcus, E. Lindstro, D. Bostro, R. Backman, R. Samuelsson and J. Burvall. 2008. Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets. *Energy & Fuels*, 22(5), 3536–3543.
- Grimm, A., N. Skoglund, D. Boström and M. Öhman. 2011. Bed agglomeration characteristics in fluidized quartz bed combustion of phosphorus-rich biomass fuels. *Energy and Fuels*, 25(3), 937–947. <https://doi.org/10.1021/ef101451e>.
- Kleinhans, U., C. Wieland, F.J. Frandsen and H. Spliethoff. 2018. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior. *Progress in Energy and Combustion Science*, 68, 65– 168. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.02.001>.
- Lapuerta, M., J.J. Hernández, A. Pazo and J. López. 2008. Gasification and co-gasification of biomass wastes: Effect of the biomass origin and the gasifier operating conditions. *Fuel Processing Technology*, 89(9), 828–837. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.02.001>.
- Lindström, E., M. Sandström, D. Boström and M. Öhman. 2007. Slagging characteristics during combustion of cereal grains rich in phosphorus. *Energy and Fuels*, 21(2), 710–717. <https://doi.org/10.1021/ef060429x>.
- Lu, Y., Y. Wang, Y. Zhao, Z. Wei, Y. Li, W. Hao and Y. Zhang. 2017. The characteristics of mineralogy, morphology and sintering during co-combustion of Zhundong coal and oil shale. *RSC Advances*, 7(81), 51036–51045. <https://doi.org/10.1039/c7ra10340a>.
- Miles, T.R., J.T.R. Miles, L.L. Baxter, R.W. Bryers, B.M. Jenkins and L.L. Oden. 1995. Alkali deposits found in biomass power plants: a preliminary investigation of their extent and nature. In *National Renewable Energy Laboratory* (1995).