

Propiedades energéticas de biomasa torrefaccionada de *Dipteryx panamensis* Pittier y *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm.

Johanna Gaitán-Álvarez¹

Resumen

Se cuantificaron las propiedades energéticas de la biomasa torrefaccionada de dos especies forestales, *Dipteryx panamensis* y *Gmelina arborea*. Se tomaron 500 gramos de aserrín provenientes del proceso de aserrío primario de cada especie y se dividió en tres partes para aplicar tres tipos de tiempos a la exposición de temperatura, denominado como tratamientos: el tratamiento número 1 es el testigo, el cual no se torrefaccionó (0 minutos). El tratamiento número 2 consistió en aplicar una temperatura de 200 °C por 15 minutos, y el tratamiento número 3 consistió en aplicar una temperatura de 200 °C por 20 minutos. A este se le determinó densidad, contenido de cenizas, poder calórico, contenido de humedad e índice de combustibilidad. Las densidades de ambas especies variaron entre 155,48 kg/m³ a 191,86 kg/m³. El poder

Abstract

Energetic properties of torrefied *Dipteryx panamensis* Pittier y *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm.

The energy properties of the torrefied biomass of two forest species, *Dipteryx panamensis* and *Gmelina arborea* were measured. Five-hundred grams of sawdust from the sawmill primary process of each species were taken and divided into three parts to apply three types of exposure times of temperature, known as treatments: treatment Number. 1 is the witness, which is not torrefied (0 minutes). Treatment number 2 consisted of applying a temperature of 200 °C for 15 minutes, and treatment Number 3 was to apply a temperature of 200 °C for 20 minutes. It was determined density, ash content, calorific value, moisture content and rate of combustibility. The densities of both species varied between 155,48 kg/m³ to 191.86 kg/m³. The calorific value increase in 9749.00

1. Tecnológico de Costa Rica, Escuela Ingeniería Forestal, Estudiante Programa de Maestría Ciencias Forestales; Cartago, Costa Rica; jgaitanalvarez@gmail.com

Recibido: 06/05/2015
Aceptado: 21/05/2015

calórico paso de 9749,00 kJ/kg a 18126,35 kJ/kg con el proceso de torrefacción. Los porcentajes de cenizas se mantuvieron en un rango de 0,39 % a 1,07 %, y para el índice de combustibilidad en un rango de 109,31 a 6675,93; los valores más bajos los presentó el tratamiento a 0 minutos en ambas especies. Se logró determinar que la torrefacción incrementa las propiedades energéticas del material y que *Dipteryx panamensis* fue la que presentó un mejor comportamiento como combustible.

Palabras claves: torrefacción, energía renovable, *Dipteryx panamensis*, *Gmelina arborea*.

Introducción

En los últimos años se ha creado un fenómeno en el mundo de globalización y utilización de energía masivo (Fournel et al., 2015), basado en el consumo de combustibles fósiles que aumenta día a día, lo que provoca una alta demanda y altos precios de venta, sin dejar de mencionar que el proceso mismo de elaboración trae fuertes consecuencias de contaminación ambiental (Poddar et al., 2014). Como consecuencia, se estudian e investigan nuevas formas de obtención de energía, para desarrollar tecnologías sostenibles que provengan de materias primas renovables (Kullander, 2009). Entre estas se puede considerar la biomasa vegetal, que es un producto limpio y renovable (Tenorio et al., 2015).

La biomasa vegetal lignocelulósica es la que contiene mayor capacidad para generar energía renovable, esta se puede encontrar en residuos de diferentes industrias agrícolas y forestales (Bahng et al., 2009, Gokcol et al., 2009). En Costa Rica, las condiciones tropicales permiten el desarrollo de estas industrias, lo que genera un alto porcentaje de residuos útiles para la producción de energía (Tenorio & Moya, 2012). Sin embargo, este material residual presenta características no favorables como altos contenidos de humedad, naturaleza higroscópica y densidades bajas (Chen et al., 2015).

Por estas razones, residuos de la industria de la biomasa procesada en los aserraderos conocida en Costa Rica como aserrín, se debe someter a tratamientos para mejorar sus condiciones naturales. Uno de estos tratamientos es la torrefacción (Chen et al., 2015), que mejora las características físicas, químicas y calóricas del material lignocelulósico. El proceso de torrefacción disminuye el contenido de humedad de la biomasa y aumenta el poder calórico y la densidad de la biomasa (Bourgois & Guyonnet, 1988, Wu et al., 2011). Básicamente la torrefacción consiste en aplicar temperatura lentamente entre un rango de 200 y 300 °C en ausencia de oxígeno (Van der Stelt et al., 2011), para evitar que el material biomásico arda debido a la inflamabilidad del oxígeno.

kJ/kg to 18126.35 kJ/kg with the torrefaction process. The percentages of ash remained in the range of 0.39 % to 1.07 %, and the combustibility index in the range of 109.31 to 6675.93; the lowest values are presented on the 0-minute treatment in both species. It was determined that torrefaction increases the energy properties of the material and *Dipteryx panamensis* had better behavior as a fuel.

Keywords: torrefaction, renewable energy, *Dipteryx panamensis*, *Gmelina arborea*

El poder calórico es uno de los parámetros más importantes a evaluar en los procesos de torrefacción, se refiere a la cantidad de unidades de energía producida por la combustión de una unidad de masa de un combustible (Telmo & Lousada, 2011). Algunos autores afirman que hay relación entre el poder calórico con respecto algunas características propias de cada especie, como los contenidos de resinas y extractivos, que se conocen como sustancias que se encuentran en composición con la madera, y al estar presentes en cantidades altas el poder calórico aumenta (Demibras, 2009).

Otro parámetro importante a considerar en el proceso de combustión de la biomasa, es el contenido de cenizas. Este porcentaje puede afectar directamente el poder calórico de la madera. Según Kumar et al. (2009), una alta cantidad de cenizas en la madera convierte al material en un combustible menos deseable porque si el porcentaje de estas supera el 4 %, se presentan problemas de corrosión en los quemadores y calderas, que provoca un desgaste significativo del equipo utilizado (Mande, 2009). Esto conduce a tratar de utilizar biomasa que presente bajos porcentajes de cenizas.

El objetivo del presente trabajo fue determinar las propiedades energéticas; poder calórico, porcentaje de cenizas e índice de combustibilidad, de la biomasa residual de la industria forestal tipo aserrín de dos especies forestales *Gmelina arborea* y *Dipteryx panamensis*, en Costa Rica. Con el fin ver el potencial de usarla en la producción de energía renovable.

Material y métodos

Procedencia del material

Se utilizó residuos maderables de las especies *Gmelina arborea* procedente de una plantación de 8 años localizada en el Pacífico Sur y *Dipteryx panamensis*, procedente de plantaciones de 13 años ubicada en la provincia de Limón, Costa Rica. Para ambas especies el aserrín se obtuvo recolectándolo directamente del proceso de aserrío. El

Cuadro 1. Densidad y propiedades energéticas para *Dipteryx panamensis* y *Gmelina arborea* sometidas a tres tiempos de torrefacción (0, 15 y 20 minutos) en Costa Rica.

Table 1. Density and energetic properties for *Gmelina arborea* and *Dipteryx panamensis* subjected to three torrefaction times (0, 15 and 20 minutes) in Costa Rica.

Especies	Tiempo (minutos)	Densidad (kg/m ³)	Poder calórico (kJ/kg)	Contenido de cenizas (%)	Contenido de humedad (%)
<i>Dipteryx panamensis</i>	0	163,08(4,7)A	10504,00(10,0)A	0,40(1,2)A	10,30(1)A
	15	189,39(1,2)B	17619,15(2,3)B	0,43(65,9)A	3,26(1)B
	20	191,86(4,8)B	18126,35(7,2)B	0,39(103,2)A	1,87(1)B
<i>Gmelina arborea</i>	0	155,48(2,5)A	9749,00(10,6)A	1,07(1,1)B	12,96(1)A
	15	176,84(2,8)B	17471,35(6,5)B	0,71(51)A	4,24(1)B
	20	178,71(4,8)B	17302,29(1,5)B	0,97(19,7)AB	3,82(1)B

Nota: valores entre paréntesis corresponde al coeficiente de variación y letras diferentes para cada parámetro significan diferencias estadísticas entre la especie por tratamiento a un 95 %.

aserrín una vez recolectado fue secado al aire hasta alcanzar aproximadamente 14 %, que es la condición de contenido de humedad de equilibrio donde se realizan las pruebas. El tamaño de las partículas varió entre 1 y 3 mm de largo.

Proceso de torrefacción

Se tomaron 500 gramos de aserrín de cada especie y fue dividido en tres partes para aplicar tres tipos de tiempos a la exposición de temperatura, denominado como tratamientos: el tratamiento número 1 es el testigo, el cual no se torrefaccionó (0 minutos). El tratamiento número 2 consistió en aplicar una temperatura de 200 °C por 15 minutos, y el tratamiento número 3 consistió en aplicar una temperatura de 200 °C por 20 minutos. Este proceso se realizó en la Mufla ubicada en el CIF (Centro de Investigación en Innovación Forestal del Tecnológico de Costa Rica) y para controlar el flujo de aire fue sellada y cada 4-5 minutos fue liberado el aire por una llave de paso para evitar el ingreso de oxígeno e evitar la combustión del aire en el momento que estaba el proceso de torrefacción.

Determinación de la densidad

La determinación de la densidad del aserrín se determinó con una caja pequeña rectangular la cual se conocían sus dimensiones y se calculó capacidad de volumen, luego se agregó poco a poco aserrín hasta llegar por completo la caja y esta se pesó, se determinó el peso del aserrín que ocupaba dicho volumen, esta densidad se determinó entre la relación del peso y el volumen que ocupaba el aserrín según la ecuación 1, para este parámetro se utilizó una muestra de diez repeticiones por cada tratamiento para ambas especies.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{masa(g)}}{\text{Volumen(cm}^3\text{)}} \quad (1)$$

Determinación de las propiedades energéticas

El poder calórico se determinó bajo la norma ASTM-D5865 (ASTM 2003) por el método de prueba calorimétrica de Parr's, en el cual se utilizaron diez muestras de 0,5 g para cada tratamiento en ambas especies. Para obtener el porcentaje de cenizas se tomaron diez muestras de 2 g de cada especie y se realizó el procedimiento según la norma ASTM-D 1102-84 (ASTM, 2013). El contenido de humedad del aserrín se determinó en una termo-balanza OHAUS modelo MB45.

El índice de combustibilidad (FVI) fue calculado con la ecuación 2 propuesta por Purohit y Nautiyal, (1987).

$$\text{Índice de combustibilidad} = \frac{\text{Poder calórico(KJ/Kg)} \cdot \text{Densidad(g cm}^{-3}\text{)}}{\text{Porcentaje de cenizas(\%)} \cdot \text{Contenido de humedad(\%)}} \quad (2)$$

Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo (media, desviación estándar, valores máximos y mínimos) para las variables de densidad, poder calórico, porcentaje de cenizas, contenido de humedad e índice de combustibilidad, en el cual se utilizaron cinco repeticiones para cada variable. Además, se verificó si las variables cumplían con los supuestos de normalidad y homocedasticidad de las varianzas. Luego se hizo un análisis de varianza ANDEVA para verificar la existencia de diferencias significativas entre los promedios de las variables ($p < 0,05$) y finalmente fue aplicado la prueba de Tukey para determinar la diferencias estadísticas entre las medias, este análisis se realizó en el programa InfoStat.

Resultados

Las propiedades energéticas y densidades de las dos especies sometidas a los tres tratamientos térmicos se

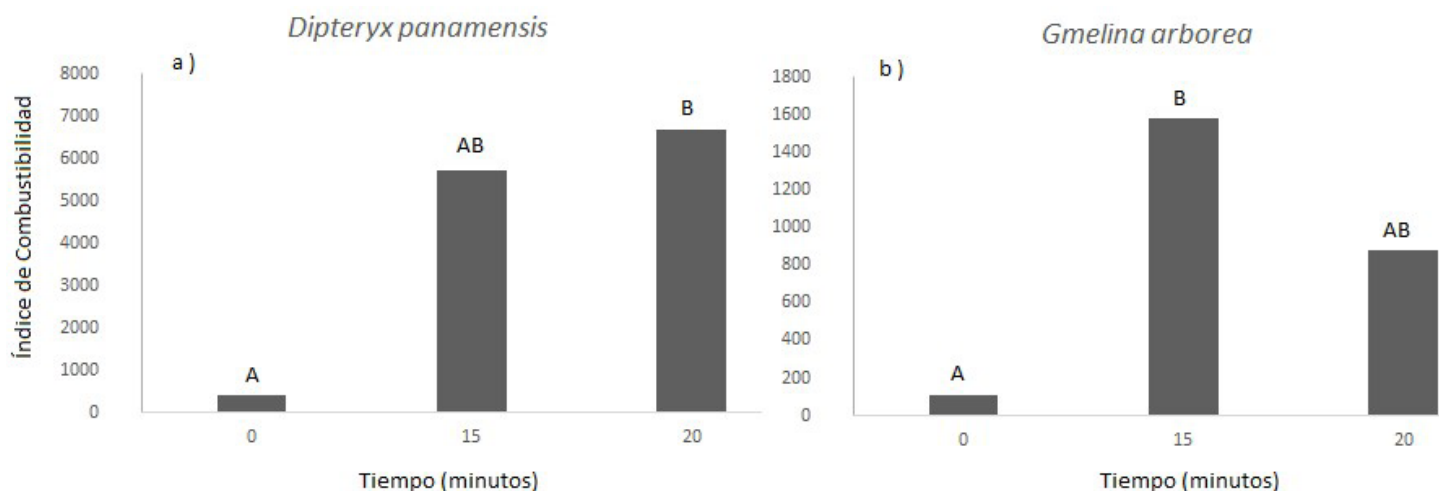


Figura 1. Índice de combustibilidad para las especies *Dipteryx panamensis* (1-a) y *Gmelina arborea* (1-b), sometidas a tres tiempos de torrefacción (0, 15 y 20 minutos) en Costa Rica.

Figure 1. Combustibility index for *Dipteryx panamensis* (1-a) and *Gmelina arborea* (1-b), subjected to three torrefaction times (0, 15 and 20 minutes) in Costa Rica.

muestran en el cuadro 1. Las densidades variaron entre 155,48 kg/m³ a los 191,86 kg/m³. *Gmelina arborea* fue la que presentó los valores más bajos de densidad, y *Dipteryx panamensis* los más altos. El poder calórico varió de 9749,00 kJ/kg a 18126,35 kJ/kg. En ambas especies se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento a 0 minutos con respecto al tratamiento de 15 y 20 minutos, en estos últimos no se evidenciaron diferencias estadísticas. El tratamiento a 0 minutos fue el que presentó los menores valores en poder calórico para ambas especies. En el caso del porcentaje de cenizas se obtuvieron valores desde 0,39 % a 1,07 %. La especie *Dipteryx panamensis* presentó los menores valores de producción de cenizas; sin embargo, en esta especie no se identificaron diferencias entre los tres tratamientos. En el caso de *Gmelina arborea* el tratamiento a 0 minutos difirió completamente al de 15 y 20 minutos fue similar a ambos. Para el contenido de humedad se determinó que los valores variaron entre 1,87 % y 12,96 %. En las dos especies estudiadas el tratamiento a 0 minutos fue el que presentó mayores valores y fue estadísticamente diferente con respecto al de 15 y 20 minutos, los cuales presentaron diferencias estadísticas entre sí.

En el caso del Índice de combustibilidad, los valores más bajos los presentó el tratamiento 1 para la especie *Dipteryx panamensis* y *Gmelina arborea* con 415,78 y 109,31 respectivamente. Se identificaron diferencias significativas entre tratamientos en ambas especies, y el valor más alto lo obtuvo *Dipteryx panamensis* con 6675,93 en el tratamiento (figura 1). Se identificaron diferencias significativas entre las especies y entre los tratamientos. *Dipteryx panamensis* mostró valores más altos de combustibilidad muy por encima de los de la especie *Gmelina arborea*.

Discusión

La densidad aumentó al aplicar los tratamientos de torrefacción esta también se vio favorecida al aumentar el tiempo de exposición del tratamiento. Esto es favorable al material ya que lo ideal es que se presenten densidades más altas, lo que señala que existe un mayor contenido de madera y menos contenidos de otros materiales como agua y algunos extractivos presentes en la madera (Tumuluru et al., 2011).

Los valores de 9749,00 kJ/kg a 18126,35 kJ/kg obtenidos de poder calórico de los tratamientos son inferiores a los reportados para especies maderables de rápido crecimiento en Costa Rica, los cuales varían de 16500 kJ/kg a 20600 kJ/kg (Moya & Tenorio, 2013), estas diferencias se pueden relacionar a las condiciones de contenido de humedad que presentó el material, ya que algunos autores señalan que un alto valor de contenido de humedad hace menos eficiente a la madera como combustible (Senelwa & Sims, 1991; Moya & Tenorio, 2013). El poder calórico aumentó al someter el material al tratamiento de torrefacción. Lo que indica que a mayores temperaturas el producto sólido torrefaccionado presenta un incremento en los valores de poder calórico al igual que este aumentó si el tiempo de resistencia de la torrefacción se incrementa; (Ferro et al., 2009). Este incremento está relacionado con la pérdida de oxígeno e hidrógeno y la conservación del carbono, el cual se desintegra a temperaturas más altas, conservando en el material el producto sólido y eliminando los componentes gaseosos y líquidos (Tumuluru et al., 2011).

El contenido de cenizas en la madera afectó la capacidad de combustión del material. Un alto porcentaje de cenizas

provoca que la madera sea menos deseable como combustible (Kumar et al., 2009; Kumar et al., 2010;). Los contenidos de ceniza en el estudio disminuyeron ligeramente luego del tratamiento térmico, la especie más apta para la combustión según esta característica fue *Dipteryx panamensis*, ya que sus porcentajes de ceniza son más bajos, aunque después del tratamiento estos se mantuvieron similares, aun así estos valores se encontraron por debajo de los de *Gmelina arborea*.

El contenido de humedad después del tratamiento térmico disminuyó considerablemente en las especies estudiadas, Conforme aumentó el tiempo de la torrefacción disminuyó ligeramente la humedad. Este parámetro fue muy importante de considerar ya que mayores contenidos de humedad reducen la eficiencia del proceso de combustión del material, al igual que aumentan los costos del proceso de generación de energía (Evergreen, 2009). Otros estudios evidencian que, después del tratamiento de torrefacción el contenido de humedad disminuye (Keipi et al. 2014), y que convierten la biomasa en un material de características más estables que disminuyen los problemas de calidad como la del biodeterioro natural en el almacenamiento (Acharjee et al., 2011; Shankar et al., 2011).

El índice de combustibilidad (IC), es uno de los mejores parámetros para comparar el potencial energético de las especies, ya que este considera el poder calórico y la densidad como factores positivos y el contenido de cenizas y contenido de humedad como factores negativos (Purohit & Nautiyal, 1987). Los índices de combustibilidad en el presente estudio aumentaron después de aplicar el tratamiento térmico, los valores observados superaron los valores reportados por diferentes autores en investigaciones anteriores (Kataki & Konwer, 2002; Kumar et al., 2011; Moya & Tenorio, 2013), siendo *Dypteryx panamensis* torrefaccionada a 20 minutos la que presentó un mejor comportamiento.

Al comparar las dos especies estudiadas, *Dipteryx panamensis* obtuvo mayor capacidad de combustión que *Gmelina arborea*. Por su naturaleza, *D. panamensis* se considera una madera que presenta una dureza extraordinaria y se reporta como de las maderas más pesadas a nivel mundial, por esto sus altos valores en cuanto a la densidad, lo que significa que su estructura está compuesta un alto porcentaje de celulosa, parámetro que no se evaluó en el presente estudio pero que sería importante estudiarlo en futuras investigaciones.

Conclusiones

Las propiedades energéticas de *Dipteryx panemensis* fueron superiores a las de *Gmelina arborea*.

Dipteryx panamensis presentó valores para densidad,

poder calórico, contenido de cenizas e índice de combustibilidad de 163,08 kg/cm³ a 191,86 kg/cm³; 10504,00 KJ/Kg a 18126,35 KJ/Kg; 0,40 % a 0,39 % y 415,78 a 6675,93 respectivamente.

Gmelina arborea presentó valores para densidad, poder calórico, contenido de cenizas e índice de combustibilidad de 155,48 kg/cm³ a 178,71 kg/cm³; 9749,00 KJ/Kg a 17302,29 KJ/Kg; 1,07 % a 0,97 % y 109,31 a 884,48 respectivamente.

Los residuos del proceso de aserrío primario o aserrín de *Dipteryx panamensis*, fueron los que presentaron un mejor comportamiento ante la torrefacción para la generación de energía.

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Tecnológico de Costa Rica por el financiamiento del proyecto de investigación. Al Centro de Investigación e Innovación Forestal (CIF) del Tecnológico de Costa Rica por el préstamo del equipo necesario y la colaboración del personal.

Referencias

- Acharjee, C., Coronella, J., & Vasquez, R. (2011). Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 102(7), 4849-4854. doi: 10.1016/j.biortech.2011.01.018
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). (2003) D 5865-04 "Standard test method for gross calorific value of coal and coke". In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM, Vol. 04.10. 11pp.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). (2013) D-1102-84 "Standard test method for ash in wood". In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2pp.
- Bahng, M., Mukarakate, C., Robichaud, D., & Nimlos, M. (2009). Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing. *Analytica Chimica Acta*, 651, 117-138. doi: 10.1016/j.aca.2009.08.016
- Bourgeois, J., & Guyonnet, R. (1988). Characterization and analysis of torrefied wood. *Wood Science and Technology*, 22(2), 143-155. doi: 10.1007/BF00355850
- Chen, W., Peng, J., & T.Bi, X. (2015). A state-of-the art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 847-866. doi:10.1016/j.rser.2014.12.039
- Demirbas, A. (2009) Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. *Energy Exploration and Exploitation*, 20, 105-111.
- Evergreen Renewables. (2009). Biomass torrefaction as a preprocessing step for thermal conversion: Reducing costs in the biomass supply chain. Obtenido de http://evergreenrenewable.com/welcome_files/Biomass%20torrefaction.pdf

- Ferro, D., Beatón, P., & Zanzi, R. (2009). Torrefacción de biomasa densificada. *Tecnología Química*. Obtenido de <http://ojs.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/2679/2205>
- Fournel, S., Palacios, J.H., Morissette, R., Villeneuve, J., Godbout, S., Heitz, M., & Savoie, P. (2015). Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. *Applied Energy*, 141, 247-259. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.022
- Gokcol, C., Dursunb, B., Alboyaci, B., & Sunan, E. (2009). Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey. *Energy Policy*, 37, 424-431. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.057.
- Kataki, R., & Konwer, D. (2002). Fuelwood characteristics of indigenous tree species of north-east India. *Biomass Bioenergy*, (22), 433-37. doi: 10.1016/S0961-9534(02)00026-0
- Keipi, T., Tolvanen, H., Kokko, L., & Raiko, R. (2014). The effect of torrefaction on the chlorine content and heating value of eight woody biomass samples. *Biomass and Bioenergy*, (66), 232-239. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.02.015
- Kullander, S. (2009). Energy from biomass. *The European Physical Journal Special Topics*, 176:115-125. doi: 10.1140/epjst/e2009-01152-1
- Kumar, R., Patel, K., Kumar, R., & Kumar, R. (2009). An assessment of Indian fuelwood with regards to properties and environmental impact. *Asian Journal of Energy Environment*, 10, 99-107.
- Kumar, R., Pandey, K., Chandrashekar, N. & Mohan, S. (2010). Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus hybrid*. *Journal of Forestry Research*, 21, 514-516. doi: 10.1007/s11676-010-0108-x
- Kumar, R., Patel, K., Kumar, R. & Kumar, R. (2011). An evaluation of fuelwood properties of some aravally mountain tree and shrub species of Western India. *Biomass and Bioenergy*, 35, 411-414. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.08.051
- Mande, S. (2009). Thermo chemical conversion of biomass. In: KISHORE, V. V. N. (Ed.). *Renewable energy engineering and technology*. New Delhi: The Energy and Resources Institute: 705-728.
- Moya, R. & Tenorio, C. (2013). Características de combustibilidad de diez especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 10(24), 2215-2504.
- Poddar, S., Kamruzzaman, M., Sujan, S. M. A., Hossain, M., Jamal, M. S., Gafur, M. A., & Khanam, M. (2014). Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value. *Fuel*, 131, 43-48. doi:10.1016/j.fuel.2014.04.061
- Purohit, A.N., & Nautiyal, A.R. (1987). Fuelwood value index of Indian mountain tree species. *International Tree Crops Journal*, 4 (2-3), 177-182. doi: 10.1080/01435698.1987.9752821
- Senelwa, K., & Sims, R. E. (1999). Fuel characteristics of short rotation forest biomass. *Biomass and Bioenergy*, 17(2), 127-140. doi:10.1016/S0961-9534(99)00035-5
- Shankar, T., Sokhansanj, S., Hess, R., Wright, C. & Boardman, R. (2011). Proximate and ultimate compositional changes in corn stover during thermogravimetric analyzer and microwaves. *Industrial Biotechnology*, 7(5), 384-401.
- Telmo, C., & Lousada, J. (2011). Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy*, 35, 2634-2639. doi:10.1016/j.biombioe.2011.02.043
- Tenorio, C., & Moya, R. (2012). Evaluation of different approaches for the drying of lignocellulose residues. *BioResources*: 7(3), 3500-3514. doi: 10.15376/biores.7.3.3500-3514
- Tenorio, C., Moya, R., Tomazello-Filho, & M., Valaert, J. (2015). Application of the X-ray densitometry in the evaluation of the quality and mechanical properties of biomass pellets. *Fuel Processing Technology*, 132, 62-83. doi: 10.1016/j.fuproc.2014.12.040
- Tumuluru, J.S., Sokhansanj, S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Boardman, R. D. (2011). A review on biomass torrefaction process and product properties. In S-1041 Symposium on Thermochemical Conversion, Oklahoma State University, Stillwater.
- Van der Stelt, M., Gerhauser, H., Kiel, J., & Ptasinski, K. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review. *Biomass Bioenergy*, 35, 3748-3762. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.06.023
- Wu, M., Schott, D. & Lodewijks, G. (2011). Physical properties of solid biomass. *Biomass Bioenergy*, (35), 93 - 105. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.02.020