

Evaluación de la **combustión de comprimidos cilíndricos** fabricados con cultivos forestales y agrícolas en Costa Rica utilizando un **quemador doméstico**

Roger Moya-Roque<sup>1</sup>  
Ana Rodríguez-Zúñiga<sup>2</sup>  
Carolina Tenorio<sup>3</sup>  
Juan Valdez<sup>4</sup>  
Jorret Valaert<sup>5</sup>

## Resumen

Se presenta la evaluación de la combustión de pellets fabricados con dos cultivos forestales y ocho cultivos agrícolas en Costa Rica utilizando un quemador doméstico de 50 Kw/h. Se evaluó las características de la biomasa, las temperaturas en la salida del quemador y en la chimenea, las emisiones ( $O_2$ ,  $CO_2$ , CO, NO,  $NO_2$ ,  $NO_x$  y  $SO_2$ ), las pérdidas de calor y la eficiencia. La temperatura de salida en el quemador varió entre 400 °C y 613 °C y la temperatura en la chimenea estuvo desde los 205 a 322 °C, la temperatura más baja correspondió a *Phyllostachys aurea* y la mayor al residuo de la palma de aceite. *Tectona grandis* presentó la mayor variación de la temperatura, mientras que *Cupressus lusitanica* obtuvo la menor variación. Los dos cultivos forestales presentaron los menores valores de emisiones. En la eficiencia en combustión el mejor cultivo fue *Gynerium*

## Abstract

**Evaluation of the combustion of wood pellets made from tropical-climate agricultural and forestry crops of Costa Rica with a domestic stove**

The present study shows the results of the evaluation of the combustion of pellets made from two forestry crops and eight agricultural crops in Costa Rica by employing a 50 Kw/h domestic stove. The following variables were evaluated: biomass characteristics, flame outlet and flue gas temperatures, emissions ( $O_2$ ,  $CO_2$ , CO, NO,  $NO_2$ ,  $NO_x$  and  $SO_2$ ), heat loss and efficiency. Flame outlet temperature varied from 400 to 623 °C and flue gas temperature varied from 205 to 322 °C, where the lowest temperature corresponds to *Phyllostachys aurea* and the highest to the oil palm residue. *Tectona grandis* showed the highest variation in temperature, while *Cupressus lusitanica* showed the lowest variation. The measurement

1. Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica; [rmoya@itcr.ac.cr](mailto:rmoya@itcr.ac.cr)

2. Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica; [ana.rodriguez@itcr.ac.cr](mailto:ana.rodriguez@itcr.ac.cr)

3. Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica; [ctenorio@itcr.ac.cr](mailto:ctenorio@itcr.ac.cr)

4. Universidad Nacional de Costa Rica, Facultad de Química, Laboratorio de Química Atmosférica; [juanvalde@gmail.com](mailto:juanvalde@gmail.com)

5. Agrep Forestal S. A.; San Carlos, Costa Rica; [jorre@agrep.com](mailto:jorre@agrep.com)

Recibido: 24/06/2015  
Aceptado: 08/07/2015

*sagittatum*, mientras que las especies forestales presentaron una eficiencia intermedia entre los cultivos analizados.

**Palabras clave:** comprimidos cilíndricos de biomasa, combustión, emisiones.

## Introducción

Los problemas ambientales, la creciente demanda de energía y la menor disponibilidad de combustibles fósiles, han fomentado la necesidad de desarrollar tecnologías sostenibles basadas en materias primas renovables (Bringezu, 2014). La biomasa es una de las fuentes energéticas más prometedoras ya que es una alternativa a las fuentes convencionales de energía tales como petróleo y el gas natural. Entre las ventajas que tiene el uso de la biomasa está principalmente que es un producto limpio y renovable, lo cual contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la dependencia de los combustibles fósiles (Monteiro, Mantha, & Rouboa, 2012, Daioglou, Wicke, Faaij y Vuuren, 2014). En este sentido la búsqueda de biomasa provenientes de los cultivos agrícolas o de residuos forestales ha tomado un importante desarrollo en los últimos años (Hauk, Knoke, Wittkopf, 2014).

Sin embargo, para manipular esta biomasa se requiere de un gran consumo energético (Monteiro et al., 2012, Hauk et al., 2014) debido a su alta humedad, sus formas y tamaños irregulares, y su baja densidad aparente, lo que hace de la biomasa un material difícil de transportar, almacenar y utilizar en su forma original (Hauk et al., 2014). Convertir esta biomasa en comprimidos cilíndrico de madera (pellets), reduce significativamente los costos de almacenamiento y transporte (Monteiro et al., 2012). Además, la biomasa procesada en pellets posee una alta densidad, es más homogénea y posee un mayor potencial energético (Dwivedi, Khanna, Bailis, & Ghilardi, 2014).

Las materias primas utilizadas hoy en día para la producción de pellets son muy variadas en los países de clima templado (Kuparinen, Heinimö y Vakkikainen, 2014). Pero en el caso de países tropicales, como Costa Rica, pocos cultivos, tanto agrícolas como forestales, han sido utilizados para la fabricación de pellets (Virmond, Rocha, Moreira, y José, 2013, Searle y Malins, 2014).

Los estudios con pellets en especies de clima templado se concentran en diversos aspectos como: la evaluación del proceso de combustión (Roy, Dutta, Corscadden y Havard, 2011) y de sus emisiones (Lee, Ryu, Lee y Park, 2011, Abuelnuor et al., 2014). Al respecto dichos

of emissions in the two forestry crops shows the lowest values. Regarding efficiency in combustion *Gynerium sagittatum* was the leading crop, while forestry species show intermediate efficiency among the crops analysed.

**Keywords:** biomass pellet, combustion, emissions.

autores señalaron que el conocimiento del potencial de combustión de las materias primas permite establecer las mejores condiciones para la generación de calor (Roy et al., 2011).

En el caso de la biomasa el alto contenido de materiales volátiles (4-8 veces del carbono fijo contenido en el material) y la presencia de hidrocarburos pesados, hacen necesaria una adecuada mezcla y reacción durante la combustión para lograr la máxima eficiencia posible (McKendry, 2002). Una reacción poco eficiente incrementa las concentraciones de CO y una alta producción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (Johansson et al., 2004). Otro aspecto también importante en una adecuada combustión es la poca generación de material residual (cenizas, escoria y material sin combustionar) ya que este se acumula en el horno y pueden causar problemas de eficiencia y operación en los equipos de quemado (Ståhl y Wikström, 2009).

La eficiencia en el proceso de combustión está relacionada con los diferentes tipos de biomasa (McKendry, 2002) que producen diferentes calidades de pellet. De ahí que en la actualidad muchos estudios se concentran en la eficiencia de la combustión de los diferentes tipos de biomasa (García-Maraver, Zamorano, Fernandes, Rabaçal y Costa, 2014). Una baja calidad del pellet y problemas en los equipos durante la combustión, pueden traer consigo altos niveles de gases de combustión, entre los que destacan monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) y nitratos (NO<sub>x</sub>) (Carvalho et al., 2013). Por otro lado, muchos estándares desarrollados en países europeos han establecido estándares permitidos para los gases de combustión de la biomasa (Verma et al., 2011), los cuales deben ser cumplidos por los distintos tipos de biomasa.

En Costa Rica, así como en otros países de América Latina, los pellets han ganado popularidad ya que algunas industrias buscan trasladarse de fuentes fósiles a fuentes de carácter renovable en lo que a la producción de calor se refiere; para así alcanzar el carbono neutral (Aragón-Garita, Moya, Varlet, & Tomazello, 2015). En la actualidad, se conocen las adaptaciones tecnológicas al proceso de producción de pellets para muchos cultivos agrícolas tropicales (Aragón-Garita et al., 2015), la evaluación de

algunos aspectos de la calidad del pellet (Tenorio, Moya, Tomazello, y Valaert, 2015a) y la información sobre la caracterización física, química o energética (Tenorio, Moya, Tomazello, & Valaert, 2015b). No obstante, el comportamiento de estos cultivos en algunos equipos como quemadores domésticos de pellet, su eficiencia energética y las emisiones producidas es poco conocida.

El siguiente trabajo tiene como objetivo general conocer el comportamiento de los pellets producidos con diez diferentes tipos de cultivos agrícolas y forestales de Costa Rica (*Arundo donax*, *Cupressus lusitanica*, *Elaeis guineensis*, *Gynerium sagittatum*, *Pennisetum purpureum*, *Phyllostachys aurea*, *Saccharum officinarum*, *Sorghum bicolor* y *Tectona grandis*), y los objetivos específicos de medir el consumo de biomasa, las temperaturas que se producen, las emisiones de gases, las pérdidas de calor y la eficiencia de combustión de la biomasa con un quemador doméstico.

## Material y métodos

### Biomasa utilizada para fabricar pellets

Se utilizaron pellets de diez tipos de biomasa provenientes de cultivos producidos en Costa Rica (Cuadro 1). Los pellets fueron fabricados por la empresa PELLETICS S.A. (<http://pelletics.com/>), ubicada en San Carlos en la provincia de Alajuela (Costa Rica). El detalle de las condiciones de fabricación es mostrado en Tenorio et al. (2015a, 2015b) y Aragón-Garita et al. (2015).

### Parámetros medidos en la biomasa

Se determinó la fracción de carbono (C), contenido de nitrógeno (N), máximo poder calorífico (MPC), contenido de ceniza, contenido de humedad en el pellet ( $CH_{\text{pellet}}$ ), porcentaje de volátiles e índice de combustibilidad (ICO) para cada uno de los cultivos. Las fracciones de carbono (C) y nitrógeno (N) fueron medidas por triplicado y determinadas mediante el equipo Elementar Analysen systeme, modelo Vario Macro Cube. El MPC fue determinado en ausencia de humedad (MC = 0 %) con una bomba calorimétrica marca Parr, de acuerdo con lo estipulado en la norma ASTM D-5865-04 (2003a). Para determinar el contenido de cenizas, se seleccionaron al azar diez muestras de 2 g de pellet y se procedió como lo indica la norma ASTM 1102-84 (2013b). El  $CH_{\text{pellet}}$  fue determinado usando una balanza de humedad modelo MB45, de la marca comercial OHAUS (USA). Para determinar el porcentaje de volátiles, se utilizaron 10 muestras de pellets de 3 g cada una, y se siguió el procedimiento señalado por la norma ASTM D1762-84 (2013c). El ICO fue calculado usando el MPC, la densidad, y el contenido de cenizas (ecuación 1), basado en la metodología propuesta por Purohit y Nautiyal (1987).

$$\text{Índice de combustibilidad} = \frac{\text{MPC} \left( \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \right) \times \text{densidad} \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)}{\text{Porcentaje de cenizas}(\%) \times \text{humedad}(\%)} \quad (1)$$

### Quegador de pellet

El quemador utilizado para evaluar la combustión de los pellets es de marca Bmax Technology model B-Half con una capacidad de 34-50 Kw/h, promedio de consumo energético de 60 W, tensión de 230 V, potencia de encendido de 400 W, nivel de ruido de 40 dB. Las dimensiones generales del quemador son detalladas en la figura 1a-c. La capacidad corresponde a un quemador utilizado en calefacción de casa habitación. Los pellets son introducidos dentro del quemador por medio de un tornillo alimentador que es colocado en el recipiente con los pellets (Figura 1d). Un abanico impulsa el calor y la llama a través del conducto de combustión (Figura 1c), la cual incide directamente en el equipo que utilizará el calor. El material residual en la región de quemado fue desplazado hacia la salida del conducto (Figura 1c).

### Condiciones de uso del quemador

Fue construido un horno de ladrillo refractario de 74 cm de ancho, 73 cm de profundidad y de 30 cm de alto (Figura 1e). En una parte del extremo fue colocado el quemador de tal manera que el conducto de salida de la llama quedara centrado con respecto a la altura del horno (Figura 1d). El recipiente con los pellets fue colocado sobre una balanza con la finalidad de establecer la masa de pellet consumida durante la prueba. Por otro lado en la parte interna del horno fue colocado un recipiente para recolectar el material residual (cenizas, escoria y el material que no fue quemado) durante la prueba. Además, se usaron sensores de temperatura a la salida de la llama (6 cm donde la llama terminaba) y a 30 cm del inicio de la chimenea, llamadas como temperatura de llama y temperatura de flujo de gas, respectivamente. Así mismo en este punto (30 cm del inicio de la chimenea) se colocaron los sensores para medir los gases de combustión.

### Prueba experimental

Para cada uno de los diez cultivos, se realizaron tres pruebas de quemado con una duración de una hora cada una de ellas. Durante la prueba, la masa de pellets consumida por el quemador fue pesada en el tanque de almacenamiento de pellet (Figura 1c) antes y después de la hora de funcionamiento del quemador. Al inicio de la prueba se esperaron cinco minutos hasta que el quemador de pellet estabilizará la llama. Posteriormente, el quemador se apagó por dos horas para que todo el sistema de quemado de pellet alcanzará nuevamente la temperatura ambiente. Durante la hora de la prueba se monitoreó la temperatura de llama y temperatura de flujo de gas utilizando dos sondas tipo "J" conectadas

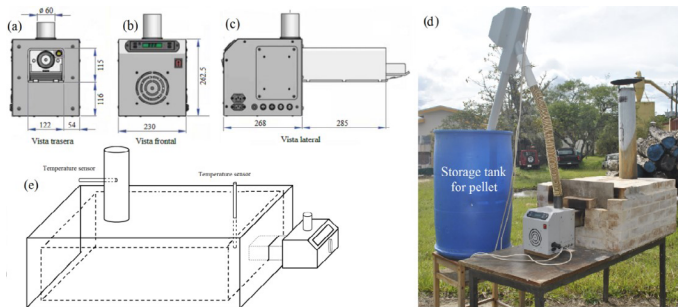


Figura 1. Esquema del sistema experimental del horno construido para la evaluación energética de los pellets.

Figure 1. Scheme of the experimental furnace system constructed for the energy evaluation of pellets.

a un data logger, marca TESTO modelo 177-T4. Se programaron los registros de ambas temperaturas cada minuto (60 mediciones en total por cada prueba de quemado), para promediar estos valores y luego utilizarlo en la Ecuaciones 2-4.

En la determinación del material residual (contenido de cenizas, escoria y material no combustionado), el recipiente de recolección de este material se colocó al iniciar la prueba de quemado y luego de finalizar se recogió y se esperó que tomará la temperatura ambiente. En esa condición fue pesado y se tomaron tres muestras para determinar el CH que presentaba este material utilizando la norma ASTM D-5865 04 (2003a). También fueron extraídas tres muestras para determinar el porcentaje de cenizas real que contenía el material residual, según la norma ASTM 1102-84 (2013b). Dichos parámetros se llamaron CH de material residual, contenido de ceniza, escoria y material sin combustionar luego del quemado del pellet.

### Medición de emisiones

En el caso de las emisiones, estas fueron determinadas utilizando un analizador de gases marca Testo, modelo 350, el cual fue colocado luego de 15 minutos de iniciado la prueba y manteniendo la medición por otros 15 minutos, durante ese periodo fueron tomados 3 registros diferentes. Las emisiones que fueron determinadas fueron oxígeno (O<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos nitrosos (NO, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) y dióxido de sulfuro (SO<sub>2</sub>).

### Análisis de combustión de la biomasa

El análisis de combustión se realizó desde dos aspectos: un primer aspecto relacionado con las características generales de la combustión de la biomasa que contempló los siguientes parámetros: flujo de masa de pellet, el cual representa la masa consumida del pellet en el tiempo (kgmasa de pellet/hora), material residual y contenido de cenizas luego del quemado del pellet, CH de la ceniza,

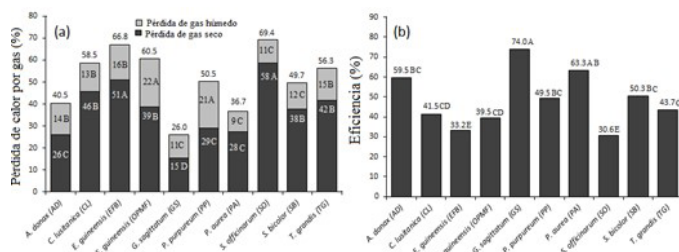


Figura 2. Pérdidas de calor en los gases de chimenea en base seca y húmeda (a) y eficiencia en quemado (b) de pellets de 10 cultivos de Costa Rica.

Figure 2. Heat losses in flue gases in dry and wet base (a) and efficiency burned (b) of pellet from 10 crops of Costa Rica.

temperatura de la llama y temperatura de flujo de gas. El segundo aspecto de la combustión que fue evaluado fue el análisis térmico, en el cual se evaluó las pérdidas de calor en el flujo de gas seco (Ecuación 2) y húmedo (Ecuación 3), así como las pérdidas totales de calor, para finalmente establecer la eficiencia en combustión de los pellet (Figura 4). Es importante aclarar que los datos que se obtienen en el sistema diseñado para el calor producido por los pellets no fue utilizado, si no que este fluyó directamente por la chimenea. En el caso de las pérdidas de calor, se utilizó el método ASME PTC-4 (ASME, 2011), el cual es catalogado como indirecto y calcula las siguientes pérdidas:

$$\text{Pérdida en el flujo gas seco} = \frac{\text{Masa}_{\text{seca}} \times C_p \times (T_g - T_a)}{\text{MPC}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Pérdida en el flujo gas húmedo} = \frac{\text{Masa}_{\text{humedad}} \times h_g - h_f \times (H_g - T_g)}{\text{MPC}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Eficiencia} = 100 - (\text{Pérdida flujo gas seco} + \text{Pérdida flujo gas húmedo})$$

Donde:

Masaseca: es la masa del gas de chimenea seco en kg de gas/kg del combustible, el cual es determinado por la suma de los gases de combustión de los pellets. Los gases presentes en la chimenea los cuales corresponde a O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> medidos durante las emisiones.

Masahumedad: Suma del vapor de agua producido por el hidrógeno presente en el combustibles, su humedad y la humedad presente en el ambiente presentado en kg de gas/kg de combustible.

Cp: Calor específico del gas, el cual corresponde a la capacidad calorífica del aire, en kJ kg<sup>-1</sup> C<sup>-1</sup>.

Tg: temperatura salida de los gases de chimenea en °C,

Ta: Temperatura ambiente en °C

hg: Entalpía del vapor a la temperatura de salida kJ kg<sup>-1</sup>

hf: Entalpía del agua a temperatura ambiente kCal/kg

MPC: Máximo poder calorífico en kJ/kg.

### Análisis estadístico

Se usó un análisis descriptivo con el cálculo de la mediana, desviación estándar, y valores máximos y mínimos

**Cuadro 1.** Tipos de biomasa en Costa Rica utilizadas para fabricar pellets.

**Table 1.** Types of biomass in Costa Rica used to make pellets.

Cultivos	Nombre científico	Abreviación
Caña grande	<i>Arundo donax</i>	AD
Residuos de aserrín de ciprés	<i>Cupressus lusitanica</i>	CL
Cáscara del fruto de la palma aceitera	<i>Elaeis guineensis</i>	EFB
Mesocarpio del fruto de la palma aceitera	<i>Elaeis guineensis</i>	OPMF
Caña Brava	<i>Gynerium sagittatum</i>	GS
Zacate gigante	<i>Pennisetum purpureun</i>	PP
Bambú	<i>Phyllostachys aurea</i>	PA
Caña de azúcar	<i>Saccharum officinarum</i>	SO
Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i>	SB
Residuos de aserrín de teca	<i>Tectona grandis</i>	TG

**Cuadro 2.** Condiciones de uso del quemador de pellets Bmax Technology model B-Half.

**Table 2.** Terms of use of pellet burner Bmax Technology model B-Half.

Descripción	Unidades	Parámetros
Tiempo de operación del tornillo sin fin	Segundos	3
Potencia del ventilador	watts	300
Tiempo sin fin recarga	Segundos	3
Tiempo sin fin estabilizado	Segundos	70
Tiempo ciclo sin fin	Segundos	55
Tiempo carga inicial	Segundos	3
Tiempo sin fin arranque	Segundos	2
Tiempo sin fin limpieza	Segundos	1
Ventilador arranque	Watts	70
Ventilador carga inicial	Watts	300
Ventilador arranque	Watts	300
Ventilador limpieza	Watts	300
Ciclo carga	Segundos	70

**Cuadro 3.** Caracterización de los pellets fabricado con 10 cultivos de Costa Rica.

**Table 3.** Characterization of pellets manufactured with 10 crops of Costa Rica.

Cultivos	Máximo poder calorífico (MJ/kg)	Índice de combustibilidad	Volátiles (%)	CH en el pellet (%)	C (% w/w)	N (% w/w)
<i>Arundo donax</i> -AD	15,93 <sup>BC</sup>	163D	70,5DE	12,0A	40,87D	0,57D
<i>Cupressus lusitanica</i> -CL	16,81 <sup>B</sup>	2803A	76,7AB	7,5E	46,40A	0,26F
<i>Elaeis guineensis</i> -EFB	14,18 <sup>D</sup>	349CD	71,7CD	9,0D	44,49B	0,68C
<i>Elaeis guineensis</i> -OPMF	15,83 <sup>BC</sup>	340CD	72,4C	9,2CD	42,79C	1,69A
<i>Gynerium sagittatum</i> -GS	18,75 <sup>A</sup>	491C	75,1B	9,7CD	43,70C	0,29E
<i>Pennisetum purpureun</i> -PP	16,98 <sup>B</sup>	244CD	69,2E	12,1A	41,72C	0,67C
<i>Phyllostachys aurea</i> -PA	19,92 <sup>A</sup>	1039B	75,3B	6,7E	44,27B	0,24F
<i>Saccharum officinarum</i> -SO	12,15 <sup>E</sup>	212CD	78,0A	9,7CD	43,60C	0,36E
<i>Sorghum bicolor</i> -SB	16,91 <sup>B</sup>	273CD	72,6C	12,6A	42,84C	0,84B
<i>Tectona grandis</i> -TG	15,26 <sup>CD</sup>	463CD	75,9B	12,1A	45,19AB	0,28E

Legenda: CH=contenido de humedad, C: contenido de carbono y N=contenido de nitrógeno. Letras diferentes para cada parámetro representan las diferencias estadísticas entre cultivos (significancia del 95 %).

para las siguientes variables: MPC, ICO, porcentaje de volátiles, CH del pellet, contenido de C y N, flujo másico del pellet, masa residual, contenido de cenizas, temperatura de la flama, temperatura del flujo de gas, parámetro de emisiones ( $O_2$ ,  $CO_2$ , CO, NO,  $NO_2$ ,  $NO_x$  y  $SO_2$ ), pérdida de calor (seco y húmedo) y la eficiencia de combustión del pellet. Asimismo, se determinó si los valores cumplieron con las características de distribución normal utilizando la prueba Kolmogorov-Smirnov, la homogeneidad en las varianzas, así como la presencia de valores extremos. Un análisis de varianza se aplicó para verificar si habían o no diferencias significativas dentro de los promedios de las variables ( $p < 0.05$ ). Un test de Tukey se llevó a cabo para determinar las diferencias estadísticas entre los cultivos, para el valor principal de cada uno de los parámetros mencionados anteriormente.

## Resultados

### Caracterización de la biomasa

El Cuadro 3 muestra la caracterización de la biomasa de los 10 cultivos. El MPC varió de 12,15 MJ/kg a 19,92 MJ/kg. Cuatro grupos fueron creados basados en las diferencias estadísticas del MPC: (i) PA y GS, con los valores más altos, (ii) seguidos por SB, CL, AD, PP y OPMF, (iii) después por TG y EFB, y finalmente (iv) el grupo con el valor más bajo, compuesto por SO. La evaluación del ICO determinó que CL tuvo el mayor ICO, seguido por PA; el resto de los cultivos (PLP, EFB, OPMF, CA, GS, PP, SO, SB, y TG) tuvo estadísticamente valores iguales de ICO, mientras que AD tuvo el valor más bajo. El porcentaje de volátiles para los diez cultivos varió entre el 69,2 % y el 78,0 %, y los cultivos fueron agrupados en cuatro categorías: (i) SO y CL, los cuales presentan los valores más altos, (ii) seguido por TG, PA, y GS, (iii) SB, OPMF y EFB, y por último (iv) formado por AD, CA y PP, los cuales representan los valores de cenizas más bajos.

El CH para los diez cultivos estuvo entre 6,7 % y 12,6 %, y nuevamente se establecieron cuatro grupos según sus tendencias: (i) cultivos con el mayor CH fueron SB, PP, TG y AD, (ii) seguido por CA, (iii) después por SO, OPMF, y EFB, y finalmente (iv) formado por CL y PA, con el valor más bajo. En la evaluación del C nuevamente cuatro grupos fueron formados: un primer grupo formado por CL y TG, seguido de EFB y PA, luego un grupo con la mayoría de los cultivos (OPMF, GS, PP, SO y SB) y un último grupo formado solamente por AD. El nitrógeno fue estadísticamente el más alto en OPMF, seguido de SB, luego un tercer grupo compuesto de EFB y PP. El cuarto grupo fue formado por AD, luego por GS, OS y TG y finalmente el contenido de nitrógeno más bajo fue para CL y PA (Cuadro 3).

### Emisiones de gases

En el caso de emisiones de gases (Cuadro 4), se encontró que nuevamente hay una alta variación entre los cultivos. En el caso de  $O_2$  este varió de 12,3 a 19,7 %, siendo los valores más altos en las especies SO, PP, OPMF y los valores más bajos en GS. En el gas  $CO_2$ , la variación fue de 8,1 % a 2,3 %, siendo GS el de mayor valor y SO el de menor valor. En la emisión de CO, la madera CL presentó el valor más bajo y SB el valor más alto. En tanto que OPMF, GS y SB presentaron emisiones sobre 150 ppm en NO, pero las emisiones de  $NO_2$  y  $SO_2$  fueron casi nulas en todos los cultivos. En las emisiones de  $NO_x$ , las especies EFB, OPMF, GS y PS presentaron emisiones sobre 120 ppm (Cuadro 4).

### Eficiencia y pérdidas

En la evaluación de las pérdidas de calor se encontró que varió de 26 a 69 % (Figura 2a), siendo la especie GS las de menor pérdida. Las especies SO, EFB, CL, PP, SO y TG con pérdidas sobre 50 % y el resto de las especies con valores intermedio a los anteriores grupos (Figura 2a). En todos los cultivos, las pérdida de calor en el gases de chimenea en base seca fueron menores a las pérdidas en base húmeda (Figura 2a). En el caso de las pérdidas en base húmeda, las más altas se presentaron en EFB y SO, luego se forma un segundo grupo compuesto por CL, OPM, FSB y TG, en tanto que las especies AD, PP y PA forma un grupo de valores bajos, junto GS (Cuadro 4). En tanto que las mayores pérdidas por flujo de gas húmedo se presentaron en OPMF y PP y las menores pérdidas se presentaron en GS, PA, SO y SB (Figura 2a). Consecuentemente la eficiencia fue mayor en GS y PA, seguido por AD, PP y SB. La menor eficiencia se presentó en EFB y SO y el resto de las especies presentan eficiencias intermedias (Figura 2b).

### Relación entre los parámetros de combustión con las emisiones y parámetros energéticos

Los coeficientes de correlación entre los diferentes tipos de parámetros medidos (Cuadro 5) mostraron que los dos tipos de temperaturas (de la llama a la salida del quemador y en el flujo de aire en la chimenea) presentaron los mismos coeficientes de correlación. Estas temperaturas fueron negativamente correlacionadas ( $\alpha < 0,01$ ) con las emisiones de CO y el  $CH_{\text{pellet}}$  y positivamente correlacionadas ( $\alpha < 0,05$ ) con MPC,  $SO_2$ , y ICO, los cuales son detallados en el cuadro 5. El flujo de calor seco fue negativamente correlacionado con  $CO_2$ ,  $CH_{\text{pellet}}$  y MPC, en tanto que el  $O_2$  y C afectaron positivamente con el flujo de calor seco. En el caso del flujo de calor húmedo fue negativamente correlacionado con contenido de volátiles y MPC, y positivamente correlacionado con  $O_2$  y N. Finalmente la eficiencia es positivamente correlacionada con las emisiones de  $CO_2$  y MPC y negativamente solo por  $O_2$  (Cuadro 5).

Cuadro 4. Emisiones producidas por pellets fabricados con 10 cultivos de Costa Rica quemados en un quemador doméstico.

Table 4. Emissions from pellet manufactured with 10 Costa Rica crops burned in a domestic burner.

Cultivos	Oxígeno (%)	CO <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	NO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	NOx (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)
<i>Arundo donax</i> -AD	15,1 <sup>C</sup>	6,0 <sup>B</sup>	888 <sup>E</sup>	84,0 <sup>D</sup>	0,0 <sup>A</sup>	84,0 <sup>C</sup>	0,0 <sup>A</sup>
<i>Cupressus lusitanica</i> -CL	16,4 <sup>B</sup>	4,4 <sup>C</sup>	190 <sup>A</sup>	55,3 <sup>D</sup>	0,0 <sup>A</sup>	55,7 <sup>D</sup>	2,7 <sup>B</sup>
<i>Elaeis guineensis</i> -EFB	17,0 <sup>AB</sup>	4,0 <sup>C</sup>	622 <sup>E</sup>	142,0 <sup>B</sup>	0,3 <sup>A</sup>	142,3 <sup>B</sup>	0,0 <sup>A</sup>
<i>Elaeis guineensis</i> -OPMF	18,2 <sup>A</sup>	5,2 <sup>BC</sup>	1441 <sup>D</sup>	175,5 <sup>A</sup>	1,5 <sup>A</sup>	175,5 <sup>B</sup>	0,0 <sup>A</sup>
<i>Gynerium sagittatum</i> -GS	12,3 <sup>D</sup>	8,1 <sup>A</sup>	1702 <sup>C</sup>	155,0 <sup>AB</sup>	0,7 <sup>A</sup>	182,7 <sup>A</sup>	0,0 <sup>A</sup>
<i>Pennisetum purpureum</i> -PP	19,7 <sup>A</sup>	3,5 <sup>C</sup>	3268 <sup>B</sup>	121,3 <sup>C</sup>	0,0 <sup>A</sup>	121,3 <sup>B</sup>	0,0 <sup>A</sup>
<i>Phyllostachys aurea</i> -PA	16,7 <sup>AB</sup>	3,8 <sup>C</sup>	205 <sup>F</sup>	69,0 <sup>D</sup>	0,0 <sup>A</sup>	72,3 <sup>C</sup>	1,0 <sup>B</sup>
<i>Saccharum officinarum</i> -SO	18,2 <sup>A</sup>	2,3 <sup>D</sup>	1312 <sup>D</sup>	52,3 <sup>D</sup>	0,0 <sup>A</sup>	52,3 <sup>D</sup>	0,0 <sup>A</sup>
<i>Sorghum bicolor</i> -SB	17,5 <sup>AB</sup>	3,0 <sup>CD</sup>	4287 <sup>A</sup>	155,0 <sup>AB</sup>	0,0 <sup>A</sup>	156,0 <sup>AB</sup>	0,0 <sup>A</sup>
<i>Tectona grandis</i> -TG	17,6 <sup>AB</sup>	3,3 <sup>C</sup>	2685 <sup>B</sup>	59,0 <sup>D</sup>	0,0 <sup>A</sup>	59,0 <sup>D</sup>	0,0 <sup>A</sup>

Leyenda: Letras diferentes para cada parámetro representan las diferencias estadísticas entre cultivos (significancia del 95 %).

Cuadro 5. Matriz de correlación entre los parámetros mediciones durante la combustión con las emisiones, y parámetros energéticos de pellets de 10 tipos de cultivos en Costa Rica.

Table 5. Correlation matrix between measurement parameters during combustion emissions and energy parameters of pellets from 10 types of crops in Costa Rica.

Parámetro	Temperatura de llamas	Temperatura de flujo de gas	Pérdida de color gas seco	Pérdida de color gas húmedo	Eficiencia
O <sub>2</sub>	-0,11 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>	0,57 <sup>**</sup>	0,54 <sup>**</sup>	-0,70 <sup>**</sup>
CO <sub>2</sub>	0,22 <sup>ns</sup>	0,22 <sup>ns</sup>	-0,72 <sup>**</sup>	-0,04 <sup>ns</sup>	0,68 <sup>**</sup>
CO	-0,48 <sup>**</sup>	-0,48 <sup>**</sup>	-0,12 <sup>ns</sup>	0,25 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>
NO	0,07 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	-0,25 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>
NO <sub>2</sub>	0,27 <sup>ns</sup>	0,27 <sup>ns</sup>	-0,14 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>
NOx	0,05 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	-0,32 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>
SO <sub>2</sub>	0,36 <sup>*</sup>	0,36 <sup>*</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	-0,19 <sup>ns</sup>	-0,02 <sup>ns</sup>
N	0,40 <sup>*</sup>	0,40 <sup>*</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>**</sup>	-0,25 <sup>ns</sup>
C	0,23 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	0,42 <sup>*</sup>	-0,30 <sup>ns</sup>	-0,30 <sup>ns</sup>
CH <sub>pellet</sub>	-0,62 <sup>**</sup>	-0,62 <sup>**</sup>	-0,37 <sup>*</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,33 <sup>ns</sup>
ICO	0,42 <sup>*</sup>	0,42 <sup>*</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	-0,22 <sup>ns</sup>	-0,03 <sup>ns</sup>
Contenido de volátiles	0,18 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>	0,28 <sup>ns</sup>	-0,62 <sup>**</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>
MPC	0,49 <sup>**</sup>	0,49 <sup>**</sup>	-0,51 <sup>**</sup>	-0,49 <sup>**</sup>	0,63 <sup>**</sup>

Leyenda: CH: contenido de humedad, ICO: índice de combustibilidad; MPC: Máximo poder calórico.

## Discusión

### Caracterización de la biomasa

Los valores obtenidos de MPC en los cultivos evaluados variaron entre 12,15 MJ/kg a 19,92 MJ/kg (Cuadro 3), rango que en las especies CL, GS, PP, PA y SB concuerda con las especies maderables de rápido crecimiento en Costa Rica, los cuales varían de 16,50 MJ/kg a 20,60 MJ/kg (Moya y Tenorio, 2013). Pero AD, TG, EFB, OPMF, SO y TG mostraron valores de MPC inferiores a los presentados para las especies maderables. Los valores del ICO para los diez cultivos variaron de 163 a 2803 (Cuadro 3) valores similares a los reportados por Moya y Tenorio (2013) para especies maderables en Costa Rica se tiene que AD, PP y SO, poseen ICO menores al rango

reportado para la maderas (de 337 a 6390). La variación del porcentaje de volátiles en este estudio fue de 69,24 % a 77,96 % (Cuadro 3), valores más altos que los presentados por Kataki y Konwer (2002) para especies maderables del noreste de India, los cuales reportaron valores desde 13,53 % a 40,08 %. En relación con los valores de CH<sub>pellet</sub>, se señalan varias opiniones acerca del CH<sub>pellet</sub> que deben presentar los pellets para un buen desempeño, normalmente los pellets contienen un CH de entre 8 % y 12 % (Lehtikangas, 2001; Kaliyan y Morey, 2009). Para el CH<sub>pellet</sub> de los pellets fabricados en este estudio se encuentra que solamente CL y PA poseen CH<sub>pellet</sub> inferiores a 8 % (Cuadro 3). Los valores de contenido de carbono, de 40,87 a 46,20 %, y nitrógeno (de 0,26 a 1,69 %) son comunes en las diferentes tipos de biomasa (Abuelnuor et al., 2014).

## Emisiones

Las emisiones de CO<sub>2</sub> menores a 8,1 %. Sin embargo en AD, OPMF y GS, las emisiones de CO<sub>2</sub> deben ser manejadas más cuidadosamente ya que se presentan valores entre 5-8 %, altas para este tipo de material (García-Maraver et al., 2014). En el caso de las emisiones de O<sub>2</sub> encontradas fueron en promedio de 17 % (Cuadro 4), valor considerado alto ya que este ser aproximadamente 10 % (García-Maraver et al., 2014). Lo cual indica que es necesario ajustar el diseño fabricado de horno con la finalidad de controlar el exceso de O<sub>2</sub> durante la combustión.

En tanto que en las emisiones de CO, los datos obtenidos para las diferentes especies fueron son muy variables (Cuadro 4). Algunos autores (García-Maraver et al., 2014, Verma et al., 2012, Rabaçal, Fernandes, y Costa, 2013) reportan valores inferiores a 2000 ppm en 17 % de O<sub>2</sub>, valores que presentan AD, CL, EFB, OPMF, GS, PA y SO, por lo que estos cultivos se encuentran dentro del rango normal. Pero PP, SB y TG, presentan valores sobre 2680 ppm, considerados como altos. Los altos valores en las emisiones de CO son producto de malos diseños de la cámara donde se realizada la combustión (tiempo que permanecen los gases en la cámara, temperatura de la cámara, turbulencia/mezcla, exceso de aire, entre otros) o bien por las características propias del pellet, como la especie o humedad del pellet (García-Maraver, Popov y Zamorano, 2014).

En el caso de NO y NO<sub>x</sub>, los valores encontrados fueron también muy variables entre especies, siendo nuevamente estos comparables con los estudios realizados por García-Maraver et al. (2014), Verma et al. (2012) y Rabaçal et al. (2013). Así mismo Limousy et al. (2013) cataloga como bajos valores de emisiones inferiores a 100 ppm, por lo que en el caso de los cultivos AD, CL, PA, SO y TG estos son catalogados de bajas emisiones para este tipo de gases. Las altas emisiones de NO y NO<sub>x</sub>, como los presentados en EFB, OPMF, GS, PP, SB y TG, son atribuidas al contenido de nitrógeno en la biomasa (Limousy et al., 2013). En el caso de las biomasa analizada se presenta ligeramente esta tendencia, ya que los cultivos con bajos contenidos de N, entre 0,24 a 0,36 % (Cuadro 3), son los cultivos de bajas emisiones de NO y NO<sub>x</sub> (Cuadro 4). Sin embargo, AD es la única excepción, ya que presenta un alto contenido de N pero bajas emisiones de los anteriores gases.

## Pérdidas y eficiencia

Las pérdidas de calor en el flujo de gas seco, como era de esperar, son más altas que las pérdidas de calor en el flujo de gas húmedo (Figura 2a), ya que los pellets fabricados presentan baja humedad (10-12 %). Dicho comportamiento coincide con los resultados reportados por Roy et al. (2011). Sin embargo, una diferencia entre las pérdidas totales del presente estudio con las

presentadas por Roy et al. (2011) es que las del presente estudio fueron más altas. En el presente estudio las pérdidas variaron de 26 a 69 % (Figura 2a), pero Roy et al. (2011) reporta 37 % para pellets de madera. Las altas diferencias o alta variación en las pérdidas de calor en el flujo de gas seco son atribuidas a que durante las pruebas de combustión el calor producido no fue utilizado en ningún tipo de trabajo, por lo que gran parte de este va a fluir por la chimenea, y por tanto se obtienen pocas diferencias entre los dos puntos de medición que son referencia para calcular las pérdidas de calor en el flujo de gas seco (Ecuación 2).

Las diferencias en las pérdidas de calor en el flujo de gas seco y gas húmedo en la chimenea son atribuidas a factores en el proceso de combustión mismo y a las características de los pellets. En el caso del flujo de gas seco las variaciones fueron atribuidas a las emisiones de O<sub>2</sub> durante la combustión (factor relacionado al proceso de combustión) y el CH y el MPC de los pellets como factores relacionados a las características del pellet. En el caso de las emisiones de CO<sub>2</sub>, el CH y el MPC presentan una relación negativa estadísticamente con las pérdidas de calor en el flujo de gas seco (Cuadro 5), indicando que el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH y MPC disminuyó las pérdidas de calor en el flujo de gas seco. Pero en el caso de O<sub>2</sub> presentó una relación positiva (Cuadro 5), por tanto el incremento de las emisiones de O<sub>2</sub> aumenta las pérdidas en el flujo de gas seco en la chimenea.

En el caso del flujo de gas húmedo en la chimenea, la cantidad de O<sub>2</sub> (factor relacionado al proceso de combustión) y la cantidad de nitrógeno presentes en la biomasa (característica de pellet) aumentaron las pérdidas de calor en el flujo de gas húmedo ya que fueron positivamente correlacionados (Cuadro 5). En tanto que la cantidad de volátiles y MPC (factores relacionados al pellet) afectaron negativamente las pérdidas de calor (Cuadro 5), por lo que un aumento en la cantidad de volátiles o MPC disminuyó las pérdidas en el flujo de gas húmedo.

Finalmente la combustión de los diferentes tipos de pellets es derivada de las pérdidas en el flujo de gas seco y gas húmedo (Ecuación 4) en la chimenea. Como se explicó anteriormente no se presentó aprovechamiento del calor generado durante el experimento por lo que las pérdidas fueron muy altas, por lo tanto se presentaron bajos valores en la eficiencia, entre 30 % y 75 % (Figura 2b). No obstante al considerar estos valores relativos las especies más eficientes fueron son GS y PA, seguido por AD, PP y SB, los de menor eficiencia son EFB y SO y el resto de las especies no obtuvieron intermedias (Figura 2b).

Estas diferencias en los valores de la eficiencia son explicadas por las diferentes características intrínsecas



de los pellets y su diferente comportamiento durante la combustión. Específicamente la matriz de correlación mostró que la eficiencia es afectada positivamente por las emisiones de CO y el MPC (Cuadro 5), pero negativamente por las emisiones de O<sub>2</sub>. Un indicador de la buena combustión son las emisiones de CO y MPC (Carvalho et al., 2013), concordante en la relación positiva con la eficiencia en este estudio (Cuadro 5). Pero un bajo contenido de O<sub>2</sub> indica que el proceso de combustión se está realizando adecuadamente (Abuelnuor et al., 2014) y por tanto hay un incremento de la eficiencia.

## Conclusiones

Las emisiones de gases durante la combustión presentaron una alta variación entre los cultivos:

El O<sub>2</sub> varió de 12,3 a 19,7 %, el CO<sub>2</sub> de 8,1 % a 2,3 %, el CO de 190 a 4287 ppm, las emisiones de NO fueron de 84 a 175 ppm, NO<sub>x</sub> de 55 a 182 ppm y las emisiones de NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> fueron casi nulas en los diferentes tipos de pellet.

En el caso de las emisiones de O<sub>2</sub> se debe hacer más eficiente el proceso de combustión en el quemador de pellets utilizado.

Se deben disminuir las emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y óxidos nitrosos, para algunos cultivos como AD PP, SB, AD y TG.

Las pérdidas de calor en el flujo de gas seco fueron más altas que las pérdidas de calor en el flujo de gas húmedo. Las pérdidas de calor en el flujo de gas seco fueron atribuidas a las emisiones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> durante la combustión (factor relacionado al proceso de combustión) y el CH y el MPC del pellet (factores relacionados a las características del pellet).

El flujo de gas húmedo fue positivamente correlacionado con el contenido de volátiles y MPC, y positivamente correlacionado con O<sub>2</sub> y N.

La eficiencia varió de 30 % y 75 %, siendo los valores más eficientes en GS y PA, seguido por AD, CL, PP y SB, los de menor eficiencia son EFB y SO y el resto de las especies presentaron eficiencias intermedias. Estas diferencias en los valores de la eficiencia entre cultivos fueron afectadas positivamente por las emisiones de CO<sub>2</sub> y MPC y negativamente por O<sub>2</sub>.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, PELLETICS S.A., y todas las industrias que brindaron materiales para la fabricación de los pellets.

## Referencias

- Abuelnuor, A. A. A., Wahid, M. A., Hosseini, S. E., Saat, A., Saqr, K. M., Sait, H. H., & Osman, M. (2014). Characteristics of biomass in flameless combustion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 363-370.
- Aragón-Garita, S., Moya, R., Varlet, J., & Tomazello Filho, M. (2015). Production and quality analysis of pellets manufactured from five potential agricultural lignocellulosic crops in the Northern region of Costa Rica. *Biomass Bioenerg.* (submitted).
- ASTM D-5865-04. (2013a). Standard test method for gross calorific value of coal and coke American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D-1102-84. (2013b). Standard test method for ash in wood. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM D-1762-84. (2013c). Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASME (American Society of Mechanical Engineers). (2011). ASME PTC-4 Indirect method: stack loss method. New York, 3 p. Recuperado de [http://www.arb.ca.gov/cc/capandtrade/allowanceallocation/boiler\\_efficiency\\_calc.pdf](http://www.arb.ca.gov/cc/capandtrade/allowanceallocation/boiler_efficiency_calc.pdf)
- Bringezu, S. (2014). Carbon Recycling for renewable materials and energy supply. *Journal of Industrial Ecology*, 18(3), 327-340.
- Carvalho, L., Wopienka, E., Pointner, C., Lundgren, J., Verma, V. K., Haslinger, W. & Schmidl, C. (2013). Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. *Applied Energy*, 104, 286-296.
- Daioglou, V., Wicke, B., Faaij, A. P. & Vuuren, D. P. (2014). Competing uses of biomass for energy and chemicals: Implications for long-term global CO<sub>2</sub> mitigation potential. *GCB Bioenergy*.
- Dwivedi, P., Khanna, M., Bailis, R. & Ghilardi, A. (2014). Potential greenhouse gas benefits of transatlantic wood pellet trade. *Environmental Research Letters*, 9(2), 024007.
- García-Maraver, A., Zamorano, M., Fernandes, U., Rabaçal, M. & Costa, M. (2014). Relationship between fuel quality and gaseous and particulate matter emissions in a domestic pellet-fired boiler. *Fuel*, 119, 141-152.
- García-Maraver, A., Popov, V. & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for pellet quality. *Renewable Energy*, 36(12), 3537-3540.
- Hauk, S., Knoke, T. & Wittkopf, S. (2014). Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 435-448.
- Johansson, L. S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C. & Potter, A. (2004). Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric environment*, 38(25), 4183-4195.
- Kaliyan, N. & More, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337-359

- Kataki, R. & Konwer, D. (2002). Fuelwood characteristics of indigenous tree species of north-east India. *Biomass and Bioenergy*, 22(6), 433-437.
- Kuparinen, K., Heinimö, J. & Vakkilainen, E. (2014). World's largest biofuel and pellet plants—geographic distribution, capacity share, and feedstock supply. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8(6), 747-754.
- Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, 20(5), 351-360.
- Lee, Y. W., Ryu, C., Lee, W. J. & Park, Y. K. (2011). Assessment of wood pellet combustion in a domestic stove. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 13(3), 165-172.
- Limousy, L., Jeguirim, M., Dutournié, P., Kraiem, N., Lajili, M. & Said, R. (2013). Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. *Fuel*, 107, 323-329.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46.
- Monteiro, E., Mantha, V. & Rouboa, A. (2012). Portuguese pellets market: Analysis of the production and utilization constrains. *Energy Policy*, 42, 129-135.
- Moya, R. & Tenorio, C. (2013). Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. *Biomass and Bioenergy*, 56, 14-21.
- Purohit, A. N. & Nautiyal, A. R. (1987). Fuelwood value index of Indian mountain tree species. *International Tree Crops Journal*, 4(2-3), 177-182.
- Rabaçal, M., Fernandes, U. & Costa, M. (2013). Combustion and emission characteristics of a domestic boiler fired with pellets of pine, industrial wood wastes and peach stones. *Renewable Energy*, 51, 220-226.
- Roy, M. M., Dutta, A., Coruscadden, K. & Havard, P. (2011). Co-combustion of Biosolids with Wood Pellets in a Wood Pellet Stove. *International Journal of Engineering & Technology*, 11, 7-15.
- Searle, S. Y. & Malins, C. J. (2014). Will energy crop yields meet expectations?. *Biomass and Bioenergy*, 65, 3-12.
- Ståhl, M. & Wikström, F. (2009). Swedish perspective on wood fuel pellets for household heating: A modified standard for pellets could reduce end-user problems. *Biomass and Bioenergy*, 33(5), 803-809.
- Tenorio, C., Moya, R., Tomazello Filho, M. & Valaert, J. (2015a). Application of the X-ray densitometry in the evaluation of the quality and mechanical properties of biomass pellets. *Fuel Processing Technology*, 132, 62-73.
- Tenorio, C., Moya, R., Tomazello-Filho, M. & Valaert, J. (2015b). Quality of Pellets Made from Agricultural and Forestry Crops in Costa Rican Tropical Climates. *BioResources*, 10(1), 482-498.
- Verma, V. K., Bram, S., Delattin, F., Laha, P., Vandendael, I., Hubin, A. & De Ruyck, J. (2012). Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance. *Applied Energy*, 90(1), 17-23.
- Verma, V. K., Bram, S., Vandendael, I., Laha, P., Hubin, A. & De Ruyck, J. (2011). Residential pellet boilers in Belgium: standard laboratory and real life performance with respect to European standard and quality labels. *Applied Energy*, 88(8), 2628-2634.
- Virmond, E., Rocha, J. D., Moreira, R. F. P. M. & José, H. J. (2013). Valorization of agroindustrial solid residues and residues from biofuel production chains by thermochemical conversion: a review, citing Brazil as a case study. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30(2), 197-230.