

Características de *combustibilidad de diez especies* de plantaciones de rápido crecimiento en *Costa Rica*

Roger Moya-Roque¹
Carolina Tenorio-Monge²

Resumen

El objetivo de este estudio fue investigar las características de combustibilidad (poder calórico e índice de combustibilidad) de diez especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. También fue evaluada la influencia de los componentes químicos (celulosa, lignina, cenizas, cantidad de carbono y nitrógeno) y algunas propiedades físicas (contenido de humedad, densidad verde y peso específico) sobre estas características de combustibilidad. Los resultados mostraron que el poder calórico máximo varió de 16500 a 20594 kJ/kg para la albura y de 16258 a 20119 kJ/kg para el duramen. No fue posible determinar cuál tipo de madera (albura o duramen) que presenta el mayor valor de poder calórico. En el caso del índice de combustibilidad, se presentaron grandes variaciones, con valores entre 337 y 6390. Al evaluar los efectos de la humedad se encontró un efecto lineal sobre el poder calórico (modelo $Y = \beta_0 * X + \beta_1$) y muestra que el efecto de la humedad en el poder calórico es diferente para cada especie o tipo de madera (duramen o albura). La única conífera

Abstract

Fuelwood characteristics of ten fast-growth species in Costa Rica

The aim of this study was to investigate the fuelwood characteristics (calorific value and fuelwood value index) of ten species utilized in commercial reforestation in Costa Rica. It was evaluated too the chemical characteristics (cellulose, lignin, ash, carbon and nitrogen) and physical properties (moisture content, green density and specific gravity) on these species. The results showed that the maximum calorific value ranged from 16500 to 20594 kJ/kg for sapwood and from 16258 to 20119 kJ/kg for heartwood. It was not possible to establish if heartwood has best fuelwood characteristics in relation to sapwood. The fuelwood value index presented large variations, from 337 to 6390. The effect of moisture content on the calorific value was linear and can be modeled by $Y = \beta_0 * X + \beta_1$. This relationship varied for each species or type of wood (heartwood or sapwood). Just *Cupressus lusitanica* between 10

1. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica; moya@itcr.ac.cr; (506) 2550-9092

2. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica; ctenorio@itcr.ac.cr; (506) 2550-2531

evaluada (*Cupressus lusitanica*) fue la especie con mayor potencial energético debido a sus altos valores de índice de combustibilidad, poder calórico y su bajo contenido de cenizas. Las otras especies de plantación, a pesar de que no presentan los valores energéticos de *C. lusitanica*, poseen un potencial importante debido a los altos volúmenes de desechos o residuos que se obtienen en las distintas industrias.

Palabras clave: poder calórico, índice de combustibilidad, contenido de humedad, albura, duramen, plantaciones, combustibilidad de la madera, especies de plantaciones, Costa Rica.

Introducción

Costa Rica es un país pequeño que ha introducido una gran cantidad de especies para la reforestación, orientadas principalmente a la producción de madera aserrada (Moya 2004). Sin embargo, solo unas pocas especies nativas y exóticas han adquirido importancia comercial en diversos proyectos de reforestación, debido principalmente al conocimiento limitado de sus procesos genéticos, reproductivos y de manejo (Murillo *et al.* 2001).

Especies de relativo rápido crecimiento (con períodos de rotación de menos de 25 años) como *Terminalia amazonia*, *Terminalia oblonga*, *Vochysia guatemalensis*, *Bombacopsis quinata*, *Alnus acuminata*, y *Swietenia macrophylla* (especies nativas) y *Tectona grandis*, *Cupressus lusitanica*, *Acacia mangium* y *Gmelina arborea* (especies exóticas), han demostrado excelentes resultados como especies de reforestación en plantaciones forestales (Murillo *et al.* 2001; Pérez & Kanninen 2001; Petit & Montagnini 2004; Moya 2004). Su amplia utilización se debe no solo a la calidad de su madera y a su rápido crecimiento, sino también a que poseen la capacidad de prosperar en sitios degradados por otras actividades económicas, benefician la fertilidad del suelo y se pueden utilizar además en sistemas agroforestales y plantaciones mixtas (González & Fisher 1998; Piotto *et al.* 2003; Alice *et al.* 2004; Petit & Montagnini 2004).

En los últimos años, con los problemas asociados al medio ambiente y al calentamiento global del planeta, amplias investigaciones se han llevado a cabo para encontrar fuentes de energía fiables y renovables para sustituir los combustibles fósiles. En los procesos de transformación y aserrío de la madera se genera una enorme cantidad de residuos que pueden ser usados como fuentes de energía renovables (Andersen *et al.* 2005; Pang & Li 2006; Velázquez 2006; Offerman *et al.* 2011). Sin embargo, es importante indicar que una de las limitantes más grandes es que, en el caso de Costa Rica, no se cuenta con un proceso industrial que verdaderamente haga utilización de dichos residuos (Ulloa *et al.* 2004); de forma tal que, para el medio

studied species, presented the greatest fuel potential due to its high fuelwood value index, calorific value and low ash content. Others reforestation species, although not exhibit same fuelwood values than *C. lusitanica*, they have a significant energy potential due to the high volumes of waste obtained from different industries.

Key words: calorific value, fuelwood value index, moisture content, sapwood, heartwood.

costarricense, y para algunos países en vías de desarrollo, la utilización de estos residuos como fuentes de energía constituiría una alternativa novedosa de uso secundario.

No obstante, para verdaderamente dar una utilidad a los residuos forestales como fuentes de energía calórica es necesario conocer las propiedades de combustión de las especies utilizadas en reforestación. Por ejemplo se ha mencionado que el poder calórico neto de las maderas varía de 17600 a 18700 kJ por kg de materia seca. Sin embargo, este valor depende de muchos factores (Reuter 2011), entre los que se destaca la humedad presente en el residuo, por lo que se ha establecido una forma general de calcular el poder calórico para diferentes valores de humedad: $PC_{CH} = PC_{máximo} (1 - CH \cdot 100^{-1})$, donde PC_{CH} representa el poder calórico al contenido de humedad deseado, $PC_{máximo}$ el poder calórico máximo (de 17600 a 18700 kJ por kg) y el contenido de humedad en base húmeda a la que se desea determinar.

Por otra parte, las maderas tropicales en general poseen proporciones diferentes de carbono, oxígeno e hidrógeno (Sjöström 1993). Pero a pesar de esta diferencia, los valores de poder calórico, así como de otros parámetros importantes en los valores energéticos, y la influencia de otras características propias de las maderas, han sido tomados de estudios realizados para especies de clima templados, lo cual puede traer consigo problemas en los cálculos energéticos en el momento de aprovechar las especies o en el momento de la utilización de los residuos en los aserraderos.

Actualmente, en Costa Rica se produce energía con residuos ligno-celulósicos a base de madera, aunque no se cuenta con información detallada sobre las características de combustión de las especies de mayor uso comercial, por lo que se requiere de investigaciones que determinen estos parámetros energéticos. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo determinar los principales parámetros energéticos (poder calórico e índice de combustibilidad) de las diez especies más utilizadas en plantaciones forestales en el país. Se pretende que esta información colabore a dar un uso integral a la materia prima generada en las plantaciones.

Metodología

Material utilizado y muestreo

Se evaluaron las características de combustibilidad de diez especies forestales de rápido crecimiento, en un rango de edades de las plantaciones de 6 a 21 años. Las especies evaluadas fueron *Terminalia amazonia*, *Terminalia oblonga*, *Vochysia guatemalensis*, *Bombacopsis quinata*, *Alnus acuminata*, y *Swietenia macrophylla* (especies nativas) y *Tectona grandis*, *Cupressus lusitanica*, *Acacia mangium* y *Gmelina arborea* (especies exóticas). El cuadro 1 presenta la densidad y las condiciones dasométricas de las plantaciones muestreadas.

En cada plantación se seleccionaron tres árboles con un diámetro cercano al promedio del rodal, de buena forma y libres de daños por ataques de insectos u hongos. De la base de cada árbol se extrajo una troza de un metro de largo, la cual fue pintada en sus extremos con el fin de disminuir la pérdida de humedad.

En cada troza fueron cortadas secciones transversales de aproximadamente 5 cm. Seguidamente cada sección transversal fue cortada por la mitad, y se extrajeron cinco astillas de aproximadamente 6 cm de ancho y de 1 cm de espesor. Dichas astillas fueron utilizadas para determinar el contenido de humedad (CHg), el peso específico (PE) y la densidad en condición verde (DV). La cantidad total de astillas fue de 135 por especie y por tipo de madera (en el caso de que la muestra presentara albura y duramen).

Para la determinación del poder calórico (PC), el porcentaje de cenizas, el porcentaje de carbono (C), nitrógeno (N) y la relación carbono/nitrógeno, se extrajo aserrín del proceso de aserrío de las trozas de cada especie, el cual fue tamizado en mallas de 0,25 mm y 0,42 mm. De igual forma que con las astillas si las especies presentaban albura y duramen, se extrajo el aserrín para cada uno de estos tipos de madera.

Características de combustión

Para la determinación del porcentaje de Carbono (C), Nitrógeno (N) y la relación C/N se utilizaron cuatro muestras de 8 gr del aserrín tamizado, mediante el uso del Elementar Analysen Systeme, modelo Vario Macro Cube. También fue determinado el índice de combustibilidad (IC) que toma como referencia el poder calórico neto, la densidad y el porcentaje de cenizas, utilizando la ecuación 1, de acuerdo con la metodología propuesta por Purohit y Nautiyal (1987).

$$\text{Índice combustibilidad} = \frac{(\text{Poder calórico} * \text{Densidad})}{\text{Porcentaje cenizas} * 100} \quad (1)$$

Determinación del poder calórico

El poder calórico (PC) fue determinado para la variación del contenido de humedad desde condición verde (al momento de corte, la cual fue diferente para cada especie) hasta la condición sin presencia de agua (seca al horno). Se utilizó el aserrín tamizado de entre 0,25 mm y 0,42 mm. Se obtuvo aproximadamente 100 gramos de material tamizado. Luego este material fue esparcido sobre una superficie plana para que se fuera secando a temperatura ambiente, período que tardó en promedio alrededor de 15 horas para todas las especies. Durante este período, cada 30 minutos fueron extraídas 3 muestras de aproximadamente 8 gramos, con el fin de obtener material para los diferentes contenidos de humedad y así tener la variación del PC con el contenido de humedad. Posteriormente, las muestras de 8 gramos fueron divididas en dos partes: 1 gramo para la determinación del contenido de humedad y tres muestras de 2 gramos para la determinación del PC (el resto fue desechado). El PC se basa en la determinación de la cantidad de energía total que un material orgánico emite, en este caso se determinó usando la prueba calorimétrica de Parr's mediante la norma ASTM D-5865 (ASTM 2003a).

Cuadro 1. Características dasométricas de las plantaciones muestreadas.

Especies	Edad de la plantación (años)	Densidad (árboles/ha)	Altura total (m)	Diámetro referencia (cm)
<i>Alnus acuminata</i>	11	338	20,99	27,90
<i>Acacia mangium</i>	6	800	11,89	17,87
<i>Bombacopsis quinata</i>	14	265	22,89	36,99
<i>Cupressus lusitanica</i>	18	400	17,60	33,65
<i>Gmelina arborea</i>	6	1000	15,90	20,60
<i>Swietenia macrophylla</i>	21	21	9,49	18,15
<i>Tectona grandis</i>	9	509	14,99	20,50
<i>Terminalia amazonia</i>	12	378	18,54	21,48
<i>Terminalia oblonga</i>	20	221	14,35	23,48
<i>Vochysia guatemalensis</i>	10	641	21,83	23,07

Determinación del contenido de humedad en verde, peso específico y densidad

El cálculo del contenido de humedad (CHg) está referido a la humedad que presenta la madera en el momento del corte, comúnmente denominado como humedad en verde. Las astillas fueron pesadas en el momento del corte y fueron colocadas por 24 horas en un horno de circulación de aire forzado a una temperatura de 103 °C, acorde con la norma ASTM D-4442 (ASTM 2003b). Luego de ese período se volvió a pesar, para obtener el peso seco. Finalmente se aplicó la ecuación 2.

$$\text{CHg} = \frac{(\text{Peso verde} - \text{Peso seco})}{\text{Peso verde}} \times 100 \quad (2)$$

Para la determinación del peso específico básico (PE) y la densidad verde (DV), el volumen de la astilla fue determinado por desplazamiento de volumen de agua sobre una balanza. Para el PE (peso seco/volumen verde) se utilizó la norma ASTM-143 (ASTM 2003c). Para la DV se utilizó la relación peso verde/volumen verde.

Determinación de las propiedades químicas

Se determinó el contenido de cenizas, así como las cantidades de celulosa y de lignina. En la determinación del contenido de cenizas se siguió la norma ASTM D-1102-84 (ASTM 2003d), en la determinación de celulosa se siguió el procedimiento seguido por Seifert (1960) y en la cuantificación de lignina se utilizó el método TAPPI T222 om-02 (TAPPI 2002). Para cada procedimiento se utilizaron muestras diferentes.

Análisis estadístico

Se desarrolló un análisis descriptivo (media, desviación estándar, valores máximos y mínimos) para todas las variables de respuesta. Una vez comprobados los supuestos de la normalidad en la distribución de los residuos y de la homogeneidad de las varianzas, se realizó un análisis de varianza mediante el procedimiento GLM de SAS (SAS Institute 1997) para estimar la significancia de las fuentes de variación. La comparación de promedios del poder calórico máximo y del poder calórico verde, del contenido de humedad, el peso específico, la densidad verde, el contenido de cenizas, carbono, nitrógeno, la relación C/N, lignina y celulosa fue verificada mediante pruebas de Tukey ($P < 0,05$). Se realizó un análisis de regresión lineal en orden de establecer la relación entre el contenido de humedad y el poder calórico.

Resultados

Parámetros calorimétricos

Los valores de los parámetros energéticos (poder calórico e índice de combustibilidad) para cada especie, se muestran en la Figura 1. Los valores de PC máximo (poder calórico a 0 % de CH) fluctuaron entre 16500 a 20594 kJ/kg para la albura y de 16258 a 20119 kJ/kg para el duramen (Figura 1a). *B. quinata*, *A. mangium*, *G. arborea* y *A. acuminata* presentaron los valores más altos en albura, y *G. arborea* y *S. macrophylla* en duramen.

Para aquellas especies que presentaron albura y duramen, no se observó una tendencia entre el tipo de madera (albura y duramen) y los valores de PC. En *A. mangium* y *T. grandis* la madera de albura presentó mayor PC que la madera de duramen. Por el contrario, en *C. lusitanica* y *S. macrophylla*, el duramen presentó valores más altos de PC que la madera de albura. En *G. arborea* no se presentó diferencia entre los dos tipos de madera (Figura 1).

En el caso del índice de combustibilidad (IC), se presentaron grandes variaciones entre las especies (Figura 1b). *C. lusitanica* mostró un valor muy superior al resto de las especies. Posteriormente se observó un grupo de especies con valores próximos a 3000, compuesto por *T. amazonia*, *S. macrophylla*, *A. mangium*, *A. acuminata* y *T. grandis*. Finalmente, cuatro especies (*G. arborea*, *T. oblonga*, *V. guatemalensis* y *B. quinata*) presentaron IC bajos.

Variación del poder calórico (PC) con el contenido de humedad

Como era de esperar, los valores del PC fueron inversamente proporcionales a los de CHg. En las especies que presentaron tanto madera de albura como de duramen no se observó una tendencia clara para decir que un tipo de madera presentó mayor PC que otro. En *C. lusitanica*, *S. macrophylla* y *G. arborea* se observó valores de PC más altos en la madera de duramen, en comparación con la madera de albura (Figuras 2d, e, f). *A. mangium* presentó un comportamiento similar, aunque a valores de CHg menores a 10 % la albura presentó PC mayores al duramen (Figura 2a). En *T. grandis*, el duramen mostró valores de PC más bajos que la albura (Figura 2g).

Para las diez especies, se encontró que el PC puede ser modelado con respecto a la disminución del CHg por una relación lineal de tipo $Y = \beta_0 * X + \beta_1$. En la Figura 2 se muestran los diferentes coeficientes del modelo, así como los coeficientes de determinación (R^2). El intercepto de las ecuaciones (parámetro β_1), en este modelo representa el valor estimado del PC a un CHg de 0 % y sus valores variaron de 17040 a 21301 kJ/kg

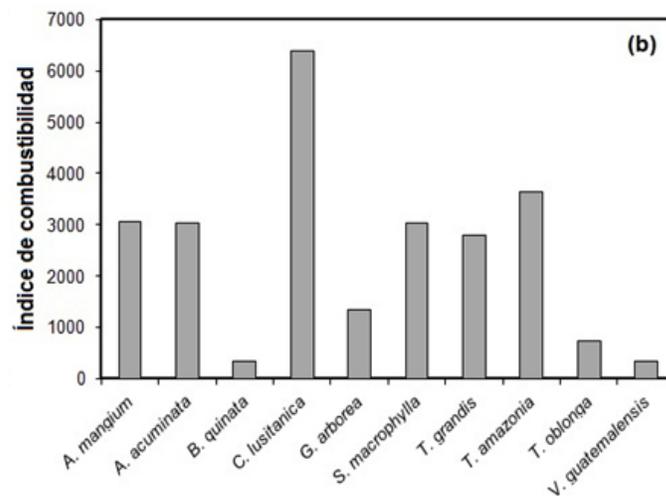
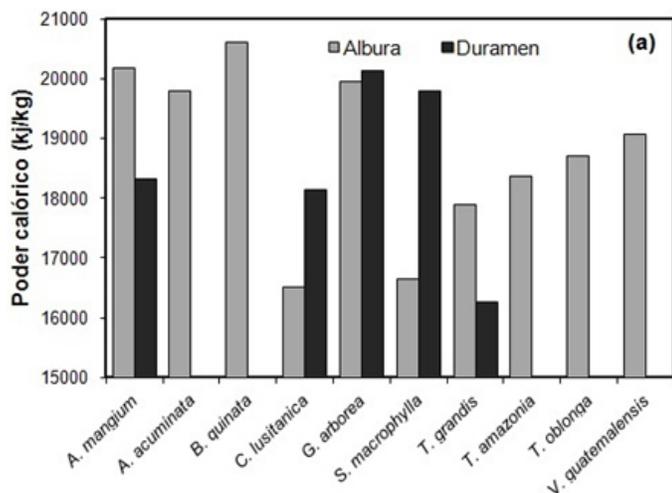


Figura 1. Poder calórico a 0 % de contenido de humedad (a) e índice de combustibilidad (b) para diez especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales en Costa Rica.

en el duramen y de 16194 a 19899 kJ/kg en la albura. En este caso *S. macrophylla* y *G. arborea* presentaron los valores más altos, con 21301 y 20078 kJ/kg, ambos en el duramen. Los valores más bajos los presentó la albura de *C. lusitanica* (16194 kJ/kg) y el duramen de *T. grandis* (17040 kJ/kg). La pendiente de la ecuación representa el cambio del PC para cada 1 % de aumento en el CHg. *S. macrophylla* (-253,53 kJ/ % CHg) fue la especie que perdió mayor PC conforme aumentó en un 1 % el CHg. Por el contrario *C. lusitanica* fue la especie que menos

PC perdió al aumentar el CHg, con -109,17 kJ/ % CHg. El resto de las especies se encontraron en el rango de -194,35 a -118,87 kJ/ % CHg.

Propiedades físicas y químicas

Los valores de las propiedades físicas y químicas obtenidas para las diez especies se muestran en el Cuadro 2. Con relación a las propiedades físicas se encontró que: (i) la variación de la densidad verde (DV) fue

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas para diez especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales en Costa Rica.

Especie	Densidad verde (g/cm ³)	Peso específico básico	Contenido humedad verde (%)	Cenizas (%)	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	Relación Carbono-Nitrógeno	Celulosa (%)	Lignina (%)
<i>Acacia mangium</i>	1,08 ^b (0,04)	0,37 ^g (0,06)	66,72 ^a (4,89)	0,58 ^{efg} (0,09)	48,48 ^b (0,12)	0,28 ^{ab} (0,04)	175,20 ^b (24,03)	49,31 ^{ab} (2,00)	31,43 ^d (3,80)
<i>Alnus acuminata</i>	0,67 ^g (0,07)	0,36 ^g (0,04)	46,48 ^d (1,79)	0,38 ^g (0,06)	47,74 ^c (0,09)	0,30 ^{ab} (0,01)	159,70 ^b (8,04)	43,19 ^{de} (1,37)	33,01 ^{cd} (1,79)
<i>Bombacopsis quinata</i>	0,86 ^e (0,05)	0,32 ^h (0,04)	63,34 ^b (4,45)	3,99 ^a (0,51)	48,68 ^b (0,10)	0,26 ^{bc} (0,02)	187,97 ^{ab} (14,40)	49,58 ^a (3,80)	39,92 ^b (1,44)
<i>Cupressus lusitanica</i>	0,75 ^f (0,07)	0,42 ^e (0,04)	44,50 ^e (7,31)	0,19 ^g (0,04)	50,18 ^a (0,21)	0,27 ^{abc} (0,01)	185,56 ^{ab} (10,25)	46,00 ^{bcd} (1,53)	46,77 ^a (1,76)
<i>Gmelina arborea</i>	0,91 ^d (0,14)	0,39 ^f (0,04)	56,97 ^c (5,90)	0,96 ^e (0,08)	48,39 ^b (0,14)	0,20 ^c (0,05)	249,79 ^a (74,39)	47,41 ^{abc} (1,48)	24,20 ^e (1,66)
<i>Swietenia macrophylla</i>	0,94 ^{cd} (0,04)	0,54 ^b (0,03)	41,81 ^f (2,73)	0,64 ^{ef} (0,04)	48,75 ^b (0,25)	0,24 ^{bc} (0,00)	199,53 ^{ab} (3,09)	43,15 ^{de} (0,88)	30,96 ^d (2,28)
<i>Tectona grandis</i>	1,12 ^a (0,02)	0,49 ^d (0,04)	56,43 ^c (3,82)	2,81 ^c (0,13)	49,77 ^a (0,15)	0,20 ^c (0,01)	249,11 ^a (16,21)	44,45 ^{cd} (0,78)	21,95 ^e (2,58)
<i>Terminalia amazonia</i>	0,87 ^e (0,08)	0,51 ^c (0,04)	41,66 ^f (2,07)	0,41 ^{fg} (0,07)	47,83 ^c (0,18)	0,27 ^{abc} (0,02)	176,84 ^b (10,98)	45,81 ^{bcd} (1,64)	31,36 ^d (1,20)
<i>Terminalia oblonga</i>	0,95 ^c (0,07)	0,60 ^a (0,07)	37,16 ^g (3,62)	1,84 ^d (0,07)	47,69 ^c (0,28)	0,31 ^{ab} (0,05)	154,86 ^b (20,56)	40,07 ^e (1,45)	38,31 ^{bc} (2,18)
<i>Vochysia guatemalensis</i>	0,75 ^f (0,08)	0,26 ⁱ (0,03)	65,32 ^a (2,29)	3,47 ^b (0,46)	46,38 ^d (0,06)	0,34 ^a (0,04)	138,49 ^b (15,08)	43,83 ^d (2,09)	48,39 ^a (6,54)

Nota: letras diferentes para cada una de las características significan diferencias estadísticas a un 95 %, de acuerdo con la Prueba de Tukey.

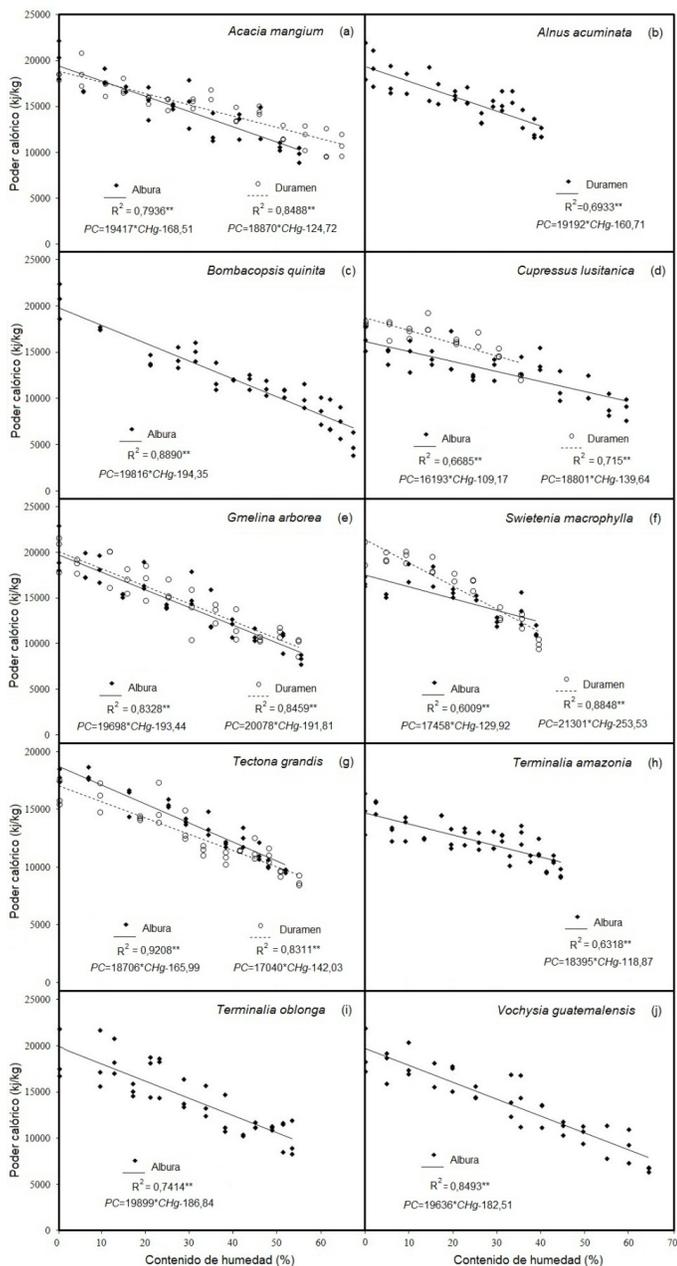


Figura 2. Poder calórico de acuerdo con el contenido de humedad para diez especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales en Costa Rica.

** estadísticamente significativo a $\alpha = 0,01$, PC = poder calórico, CHg = contenido de humedad verde.

de 0,67 a 1,12 g/cm³, siendo posible separar las especies en cinco grupos estadísticamente diferentes. El primer grupo lo conformó *T. grandis* y *A. mangium*, con DV mayor a 1 g/cm³. El segundo grupo, con valores de 0,91 a 0,95 g/cm³, compuesto por *G. arborea*, *S. macrophylla* y *T. oblonga*. El tercer grupo lo componen *T. amazonia* y *B. quinata*, con 0,87 y 0,86 g/cm³ respectivamente. *C. lusitanica* y *V. guatemalensis* conforman el cuarto grupo ambas con 0,75 g/cm³. Finalmente *A. acuminata* con 0,67 g/cm³, valor estadísticamente diferente a todos los anteriores. (ii) En el PE se presentó una variación de 0,26 a 0,60. La comparación de medias mostró que

solamente en *A. mangium* (0,37) y *A. acuminata* (0,36) los valores no presentaron diferencias estadísticas. A diferencia del resto de las especies donde se presentaron valores de PE estadísticamente diferentes ($p < 0,05$). (iii) Para el CHg, se observó que los valores más altos se presentaron en *A. mangium* y *V. guatemalensis* y los más bajos en *T. oblonga*. Seguidamente *G. arborea* y *T. grandis* presentaron CHg con valores intermedios (entre 41,81 % y 63,34 %) y luego de ellas, con valores de CHg estadísticamente menores *S. macrophylla* y *T. amazonia*. En tanto que el resto de las especies fueron diferentes entre ellas y con los grupos anteriores.

Con relación a la composición química (ver Cuadro 2), se determinó que: (i) *B. quinata* y *V. guatemalensis* presentaron los porcentajes de cenizas más altos, pero con diferencias estadísticas entre ellos, mientras que *C. lusitanica*, *A. acuminata* y *T. amazonia* (0,41 %) presentan los valores más bajos. El resto de las especies presentaron diferencias estadísticas entre ellas, con valores que van de 0,58 % a 2,81 %. (ii) Para el porcentaje de C se encontró que *C. lusitanica* y *T. grandis* presentaron los porcentajes más altos, seguido por *A. mangium*, *B. quinata*, *G. arborea* y *S. macrophylla*. En un segundo grupo, y *T. amazonia*, *A. acuminata* y *T. oblonga*, en un tercer grupo. Finalmente *V. guatemalensis* presenta el contenido de C más bajo y es estadísticamente diferente al resto de las especies. (iii) El porcentaje de N fue el parámetro donde se presentó la menor cantidad de diferencias estadísticas entre especies. *V. guatemalensis*, *T. oblonga*, *A. acuminata*, *C. lusitanica* y *T. amazonia*, con valores entre 0,27 % a 0,34 %, *B. quinata* y *S. macrophylla* con contenidos de N menores a 0,26 % y finalmente *G. arborea* y *T. grandis*, con los porcentajes más bajos (0,20 %). (iv) La relación C/N presentó valores que varían de 138,49 a 249,79. Las especies se concentraron en dos grupos, el primero corresponde a las especies con los valores más altos (de 185,56 a 249,79) e incluye a *G. arborea*, *T. grandis*, *S. macrophylla*, *B. quinata* y *C. lusitanica* y el segundo (de 138,49 a 185,56) que incluye al resto de las especies. (v) El porcentaje de celulosa varió de 40,07 % a 49,58 %. *B. quinata*, *A. mangium* y *G. arborea* fueron las especies con los porcentajes de celulosa más altos (superiores a 47 %), *V. guatemalensis*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *C. lusitanica*, con valores intermedios (de 43,83 % a 46,00 %) y finalmente *A. acuminata*, *S. macrophylla* y *T. oblonga* con los valores más bajos (de 40,07 % a 43,19 %). (vi) El contenido de lignina presentó valores que van de 21,95 % a 48,39 %. *V. guatemalensis* y *C. lusitanica* presentaron los valores estadísticamente más altos con 48,39 % y 46,77 % respectivamente. *B. quinata* y *T. oblonga* presentaron un contenido de lignina de 39,92 % y 38,31 %. *A. acuminata*, *A. mangium*, *T. amazonia* y *S. macrophylla* mostraron valores que varían de 30,96 % a 33,01 %. *T. grandis* y *G. arborea* presentaron los valores más bajos, con 21,95 % y 24,20 %, respectivamente.

Discusión

El rango de variación (16500 a 20594 kJ/kg) encontrado en PC máximo de las diez especies de plantación de rápido crecimiento de Costa Rica (Figura 1a) concuerda con los valores encontrados para otras especies tropicales, pero creciendo en la India (Kumar *et al.* 2011; Katakai & Konwer 2002).

Algunos autores (Shanavas & Kumar 2003; White 1987; Katakai & Konwer 2001) han encontrado que en ciertas especies la albura presenta mayor PC que el duramen, pero para otras especies fue lo contrario, la madera de duramen presentó un PC más alto. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en el presente estudio, puesto que en *A. mangium* y *T. grandis* la albura presentó mayor PC que la madera de duramen, pero en *C. lusitanica*, *G. arborea* y *S. macrophylla*, el duramen presentó mayor PC que la albura (Figura 1a).

Algunos estudios, como los llevados a cabo por Singh y Khanduja (1984) y Goel y Behl (1996) señalan que las especies con alto PEy alta DV poseen los valores de PC más altos, y además presentan un lento quemado, haciéndolas más deseables como combustibles. Pero la capacidad de combustión que posee una especie también depende de su CHg (Senelwa & Sims 1999; Jain 1993; Jain & Singh 1999), sobre todo porque un alto valor de CHg hace menos eficiente a la madera como combustible, debido a que el valor del poder calórico neto es reducido.

El contenido de cenizas en la madera es una característica importante que afecta de igual forma la capacidad de combustión. Una alta cantidad de cenizas hace a la madera menos deseable como combustible (Kumar *et al.* 2010; Kumar *et al.* 2009; Katakai & Konwer 2002; Jain & Singh 1999). De acuerdo con lo anterior especies como *B. quinata* y *V. guatemalensis* que presentaron los porcentajes de cenizas más altos (Cuadro 2), serían menos deseables como combustibles, mientras que especies como *C. lusitanica*, *A. acuminata* y *T. amazonia*, cuyos porcentajes de cenizas fueron los más bajos, serían las más adecuadas.

Con relación al índice de combustibilidad (IC), que es uno de los mejores parámetros para comparar el potencial energético de las especies (Purohit & Nautiyal 1987), la variación encontrada de 348 a 6390 (Figura 1b) nuevamente coincide con valores reportados por otros autores (Kumar *et al.* 2011; Katakai & Konwer 2002; Jain & Singh 1999). Así mismo, un aspecto importante de destacar es que *C. lusitanica*, una especie caracterizada como suave, presentó el valor más alto. Al respecto White (1987), menciona que las especies de coníferas presentan un mayor potencial calórico debido a la alta presencia de resinas y extractivos.

La figura 2 muestra el efecto lineal ($Y = \beta_0 * X + \beta_1$) del CHg en el PC, donde se observan claramente los beneficios que posee el secado de la biomasa antes de su combustión. Así mismo esto coincide con otros estudios llevados a cabo en *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* (Senelwa & Sims 1999). La humedad no contribuye al PC, pero reduce el calor disponible para combustión. Al respecto Senelwa & Sims (1999) señalan los siguientes aspectos importantes: (i) la humedad reduce el PC inicial de la madera y (ii) la humedad reduce la eficiencia de la combustión ya que el calor se absorbe en la evaporación de agua en las etapas iniciales de combustión, lo que reduce tanto la temperatura de la llama como la transferencia de calor.

Los diferentes gradientes de la pendiente (parámetro β_0) en los modelos de variación del poder calórico con la disminución del CH encontrados entre la albura y el duramen en las especies con estos dos tipos de madera (en *C. lusitanica* y *S. macrophylla* el gradiente de la pendientes es mayor en el duramen, pero en *A. mangium* and *T. grandis* la pérdida de calor es mayor en la albura, en tanto que *G. arborea* no hay diferencia en los dos tipos de tejidos), indican que la influencia del CH en el PC es diferente en cada tipo de madera, por lo que probablemente diferentes mecanismos durante la combustión están ocurriendo, o bien los extractivos de la madera están influyendo en esta variación.

Conclusiones

Los parámetros energéticos presentaron variaciones entre las especies de rápido crecimiento en plantaciones. La única conífera (*C. lusitanica*), entre las diez especies estudiadas, fue la especie con mayor potencial energético debido a sus altos valores de IC, PC y sus bajos contenidos de cenizas; por lo que es necesario determinar los rangos de crecimiento y productividad de esta especie, así como establecer su óptimo desempeño en plantaciones orientadas a la producción de energía. No obstante, las otras especies de plantación, a pesar de que no presentan los valores energéticos de *C. lusitanica*, poseen un potencial energético importante debido a los altos volúmenes de desechos o residuos que se obtienen en las distintas industrias.

Como era de esperar, el CH presentó un efecto lineal sobre el PC de la madera; sin embargo, la influencia del CH en el PC es diferente para cada especie o tipo de madera (duramen o albura). Esto sugiere que diferentes mecanismos durante la combustión están ocurriendo, como la influencia de los extractivos de la madera.

Referencias

- Alice, F; Montagnini, F; Montero, M. 2004. Productividad en plantaciones puras y mixtas de especies forestales nativas en la Estación Biológica La Selva, Sarapiquí, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28(2): 61-71.
- Andersen, R; Towers, W; Smith, P. 2005. Assessing the potential for biomass energy to contribute to Scotland's renewable energy needs. *Biomass and Bioenergy* 29(2):73-82.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003a. 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. 12 p.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003b. D 4442-92 Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-based materials. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10. 6 p.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003c. D 143-94 Standard test methods for small clear specimens of timber. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10. 31 p.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, US). 2003d. D-1102-84 Standard test method for ash in wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2 p.
- Goel, VL; Behl, HN. 1996. Fuelwood quality of promising tree species for alkaline soil sites in relation to tree age. *Biomass and Bioenergy* 10(1):57-61.
- González, E; Fisher, R. 1998. Variation in selected wood properties of *Vochysia guatemalensis* from four sites in Costa Rica. *Forest Science* 44:185-191.
- Jain, RK. 1993. Fuelwood characteristics of some tropical trees of India. *Biomass and Bioenergy* 4(6):461-64.
- Jain, RK; Singh, B. 1999. Fuelwood characteristics of selected indigenous tree species from central India. *Bioresource Technology* 68(3):305-308.
- Kataki, R; Konwer, D. 2001. Fuelwood characteristics of some indigenous woody species of north-east India. *Biomass and Bioenergy* 20(1):17-23.
- Kataki, R; Konwer, D. 2002. Fuelwood characteristics of indigenous tree species of north-east India. *Biomass and Bioenergy* 22:433-437.
- Kumar, JIN; Patel, K; Kumar, RN; Kumar, R. 2009. An assessment of Indian fuelwood with regards to properties and environmental impact. *Asian Journal on Energy and Environmental* 10:99-107.
- Kumar, R; Pandey, KK; 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.
- Kumar, JIN; Patel, K; Kumar, RN; 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.
- Moya-Roque, R. 2004. Wood of *Gmelina arborea* in Costa Rica. *New Forests* 28:299-317.
- Murillo, O; Obando, G; Badilla, J; Sánchez, S. 2001. Perspectivas en las zonas altas de Costa Rica. *Biocenosis* 15(1-2):66-71.
- Offerman, R; Seidenberger, T; Thrän, D; Kaltschmitt, M; Zinoviev, S; Miertus, S. 2011. Assessment of global bioenergy potentials. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 16:103-115.
- Pang, S; Li, J. 2006. BIGCC (Biomass Integrated Gasification Combined Cycle) system for New Zealand: An overview and perspective. *New Zealand Journal of Forestry* 51(2):7-12.
- Pérez, D; Kanninen, M. 2001. Stand growth scenarios for *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. *Forests Ecology and Management* 177:427-439.
- Petit, B; Montagnini, F. 2004. Growth equations and rotation ages of ten native tree species in mixed and pure plantations in the humid neotropics. *Forests Ecology and Management* 199:243-257.
- Piotto, D; Montagnini, F; Ugalde, L; Kanninen, M. 2003. Performance of forest plantations in small and medium sized farms in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 175:195-204.
- Purohit, AN; Nautiyal, AR. 1987. Fuelwood value index of Indian mountain tree species. *The International Tree Crops Journal* 4:177-182.
- Reuter, MA. 2011. Limits of design for recycling and "sustainability": A Review. *Waste Biomass Valorization* 2:183-208.
- Seifert, K. 1960. Zur frage der Cellulose-Schnellbestimmung nach der Acetylaceton-Methode. *Papier* 14:104-106.
- Senelwa, K; Sims, REH. 1999. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. *Biomass and Bioenergy* 17:127-40.
- Shanavas, A; Kumar, M. 2003. Fuelwood characteristics of tree species in homegardens of Kerala, India. *Agroforestry Systems* 58:11-24.
- Singh, B; Khanduja, SD. 1984. Wood properties of some firewood shrubs of northern India. *Biomass* 4:235-238.
- Sjöström, E. 1993. Wood chemistry, fundamentals and applications. 2nd ed. New York, US, Academic Press. 293 p.
- TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, US). 2002. Tappi T 222 om-02 revised 2002. Standart test for acid-insoluble lignin in wood and pulp. Parkway South Norcross, US, TAPPI. 4 p.
- Ulloa, JB; Weerd, JH; Huisman, EA; Verreth, JAJ. 2004. Tropical agricultural residues and their potential uses in fish feeds: The Costa Rica situation. *Waste Management* 24:87-97.
- Velázquez, B. 2006. Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. *Ecosistemas* 15:77-86.
- White, RH. 1987. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood and Fiber Science* 19(4):446-452.