

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CARBONIZACIÓN Y LAS
CARACTERÍSTICAS DEL BIOCHAR DE 16 ESPECIES
CRECIENDO EN PLANTACIONES DE RÁPIDO
CRECIMIENTO EN COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

VÍCTOR BALAGUER BENLLIURE

CARTAGO, COSTA RICA, 2019



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CARBONIZACIÓN Y LAS
CARACTERÍSTICAS DEL BIOCHAR DE 16 ESPECIES
CRECIENDO EN PLANTACIONES DE RÁPIDO
CRECIMIENTO EN COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

VÍCTOR BALAGUER BENLLIURE

CARTAGO, COSTA RICA, 2019

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CARBONIZACIÓN Y LAS CARACTERÍSTICAS DEL BIOCHAR DE 16 ESPECIES CRECIENDO EN PLANTACIONES DE RÁPIDO CRECIMIENTO EN COSTA RICA

Víctor Balaguer-Benlliure ¹

RESUMEN

En la actualidad hay un marcado interés en buscar procesos para aumentar la densidad energética de los materiales ya existentes y el proceso por pirólisis es uno de esos. El presente estudio determinó el rendimiento en producción de carbón y las características físico-químicas (densidad, dureza, contenido de humedad, poder calorífico, cenizas y volátiles y componentes químicos mediante un análisis elemental de contenido en carbono, nitrógeno, hidrógeno, azufre y oxígeno) del carbón producido a partir de 16 maderas de especies de rápido crecimiento utilizadas para reforestación en Costa Rica. Los resultados mostraron que el rendimiento varió entre 40.73% (*Enterolobium cyclocarpum*) y 23,88% (*Acacia mangium*). Por otro lado, en las propiedades del carbón se determinó que el poder calorífico varió de 24,30 MJ/kg a 32,10 MJ/kg, mientras que las densidades del carbón variaron entre 0,15 g/cm³ y 0,40 g/cm³. En el contenido de humedad del carbón se observó valores de 2,66% a 7,92%. Para la resistencia en compresión paralela a fibra se determinó que la más baja fue de 19,07 kg/cm² y el valor más alto fue de 82,92 kg/cm². Las cenizas obtenidas variaron de 0,26% a 6,36%, mientras que para el contenido de la fracción de volátiles fue de 24,16% a 33,34%. Finalmente, el índice de combustibilidad fue el resultado con mayor variación de valores, oscilando entre 41,00 y 4 225,21. *Cupressus lusitanica* resultó ser la especie con el mayor potencial energético por su relación entre alto poder calorífico y densidad, y su bajo porcentaje en cenizas y contenido de humedad. Se concluyó que teniendo en cuenta las propiedades físico-químicas del carbón producido

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica; victorbalaguerb@hotmail.com

este se puede considerar como una alternativa para la comercialización de los residuos de las especies utilizada en la reforestación comercial en Costa Rica.

Palabras claves: Biomasa, bioenergía, cambio climático, carbón vegetal, Costa Rica, energías renovables, pirólisis.

ABSTRACT

At present there is a marked interest in looking for processes to increase the energy density of existing materials and the process by pyrolysis is one of those. In the present study, it determined the yield in coal production and the physical-chemical characteristics (density, hardness, moisture content, calorific value, ash and volatiles and chemical components through an elemental analysis of carbon, nitrogen, hydrogen, sulfur and oxygen) of the coal produced from 16 woods of fast-growing species used for reforestation in Costa Rica. The results showed that the yield varied between 40.73% (*Enterolobium cyclocarpum*) and 23.88% (*Acacia mangium*). On the other hand, in the properties of coal it was determined that the calorific value varied from 24.30 MJ / kg to 32.10 MJ / kg, while the coal densities ranged from 0.15 g/cm³ to 0.40 g/cm³. In the moisture content of the coal, values from 2.66% to 7.92% were observed. For the compression strength parallel to the fiber was determined that the lowest was 19.07 kg / cm² and the highest value was 82.92 kg / cm². The ashes obtained varied from 0.26% to 6.36%, while for the content of the volatile fraction it was from 24.16% to 33.34%. Finally, the combustibility index was the result with the greatest variation in values, ranging from 41.00 to 4.225.21. *Cupressus lusitanica* was the species with the highest energy potential due to its relationship between high calorific value and density, and its low percentage of ash and moisture content. It was concluded that taking into account the physico-chemical properties of the carbon produced this can be considered as an alternative for the commercialization of the waste of the species used in commercial reforestation in Costa Rica.

Keywords: Biomass, bioenergy, climate change, charcoal, Costa Rica, renewable energies, pyrolysis.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución No Comercial Sin Derivadas 4.0 Internacional.

Balaguer Benlliure, Víctor. 2019. Evaluación del proceso de carbonización y las características del biochar de 16 especies creciendo en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. (Tesis de Licenciatura.) Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por Dr. Roger Moya Roque, M.BA. Diego Camacho Cornejo y M.Sc, Cynthia Salas Garita como requisito parcial para optar por el grado el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



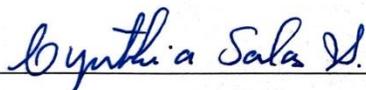
Roger Moya Roque Dr.

Director de tesis



Diego Camacho Cornejo M.B.A.

Profesor Lector



Cynthia Salas Garita M.Sc.

Profesora Lectora



Dorian Carvajal Vanegas, M.Sc.

Coordinador de Trabajos Finales
de Graduación



Víctor Balaguer Benlliure

Estudiante

AGRADECIIENTOS

A toda mi familia, a los que están y a los que ya no están, que sin su apoyo incondicional nada de esto hubiera sido posible, en especial a mi madre Carmen Benlliure Morales y a mi padre Antonio Balaguer Ferrer por ser mi inspiración y mi modelo a seguir, por guiarme y motivarme durante todos estos años.

A Roger Moya, por ser mi tutor y guiarme y ayudarme durante este proyecto.

Mi más sincero agradecimiento a todo el personal del Instituto Tecnológico de Costa Rica que me han ayudado en todo lo posible, especialmente al personal del CIF: Robert Cubero, Johanna Gaitán, Freddy Muñoz, Carlos Olivares, Didier Tencio y Carolina Tenorio.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE FIGURAS	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIAL Y MÉTODOS	4
2.1. Material utilizado	4
2.2. Aserrío de las trozas	5
2.3. Características de la materia prima	9
2.4. Proceso de carbonización	10
2.5. Determinación del rendimiento de carbonización	10
2.6. Características del carbón	11
2.7. Análisis estadísticos	15
3. RESULTADOS	16
3.1. Características de la materia prima	16
3.2. Proceso de producción del carbón vegetal	18
3.3. Proceso de carbonización	19
3.4. Características del carbón	21
3.5. Parámetros de calidad de las propiedades	27
4. DISCUSIÓN	29
4.1. Características de la materia prima	29
4.2. Proceso de producción de carbón vegetal	29
4.3. Características del carbón	30
6. CONCLUSIONES	33
5. BIBLIOGRAFÍA	34

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Procedencia geográfica de las plantaciones muestreadas. Fuente: Tomado de Moya et al., 2010 [17].	4
Cuadro 2. Condiciones dasométricas y manejo aplicado a las plantaciones muestreadas de las 16 especies maderables de plantaciones forestales de Costa Rica para la producción de carbón. Fuente: Tomado de Moya et al., 2010 [17]	5
Cuadro 3. Tiempos y procesos durante el proceso de pirólisis en laboratorio para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica.	18
Cuadro 4. Condensados y contenido de otros materiales obtenidos de la materia prima para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica.	20
Cuadro 5. Contenidos de humedad, resistencia a compresión paralela a la fibra, contenido en cenizas y volátiles para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, agrupado en sus respectivos grupos estadísticos.	23
Cuadro 6. Propiedades químicas (C, H, N, S, O) para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, ordenados en sus respectivos grupos estadísticos.	27
Cuadro 7. Comparación de los parámetros más relevantes obtenidos, con el estándar de calidad estadounidense DIN EN 1860-2 [23] para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica.	28

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Esquema de los principales componentes que conforman el reactor.	7
Figura 2. Esquema general del proceso de carbonización y condensación paralelo.	8
Figura 3. Contenido de humedad inicial de la materia prima para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, agrupado en sus respectivos grupos estadísticos.	16
Figura 4. Densidad inicial de la materia prima para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, agrupado en sus respectivos grupos estadísticos.	17
Figura 5. Rendimiento en el proceso de carbonización de la materia prima para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica.	19
Figura 6. Densidad del carbón para dieciséis especies de rápido crecimiento situadas en plantaciones forestales de Costa Rica, agrupado en sus respectivos grupos estadísticos.	21
Figura 7. Poder calorífico del carbón para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, agrupado en sus respectivos grupos estadísticos.	24
Figura 8. Índice de combustibilidad para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica.	25

1. INTRODUCCIÓN

La sustitución de los combustibles fósiles por productos derivados de la biomasa que interrumpan el aumento del dióxido de carbono de la atmósfera y mitiguen el incremento del efecto invernadero, ha sido uno de los principales objetivos medioambientales de la gran mayoría de países durante los últimos años [1]. En este sentido la producción de biomasa permite la sustitución parcial de los combustibles fósiles importados de los países productores de petróleo, por una producción nacional por medio de esta biomasa, que aparte del beneficio medioambiental, supone un aumento del Producto Interior Bruto (PIB) [2].

No obstante, las características de la biomasa pueden ser en la gran mayoría de casos inadecuada para su utilización directa como la combustión, y es necesario someterla a un proceso previo de transformación fisicoquímica [3]. En la actualidad existen diferentes procesos para ello, pero es posible clasificarlos en dos grandes grupos: (i) Procesos bioquímicos, donde la biomasa se degrada mediante el uso de diferentes microorganismos. (ii) Procesos termoquímicos, donde se aplican altas temperaturas y diferentes condiciones de oxígeno, como la combustión (exceso de oxígeno), gasificación (oxígeno limitado) o la pirólisis (ausencia total de oxígeno) [2].

El proceso de pirólisis, consiste en aplicar altas temperaturas a la biomasa con el fin de producir su descomposición en ausencia total de oxígeno e incrementar el poder calorífico de esta y obtener combustibles gaseosos, líquidos o productos sólidos [4]. En la actualidad los procesos de pirólisis son de los más apreciados mundialmente, ya que es posible producir una amplia variedad de biocombustibles, no produce emisiones a la atmósfera y todos los subproductos es posible reutilizarlos como combustibles o para otros procesos industriales más complejos [2].

Los productos sólidos obtenidos de la pirólisis, quizás unos de los productos más importantes, están formados por alquitranes, cenizas y carbones. Estos últimos son conocidos como carbón vegetal, se caracterizan por presentar un poder calorífico de

25 MJ/kg a 30 MJ/kg, un bajo contenido en azufre y cenizas, además de una baja densidad [5]. Muchos diferentes tipos de biomásas pueden ser utilizados para la producción de carbón, desde especies perenes (plantas, arbustos, o árboles) hasta otros tipos de biomásas como desechos de frutos [6]. Entre las fuentes de materia prima más importante se encuentra los residuos de madera de la industria de la primera y segunda transformación, ya que se trata de materiales más homogéneos, de mejor calidad y se encuentran concentrados en las empresas, lo que facilita y abarata las labores logísticas de obtención y abastecimiento [5]. En este sentido, en el caso del carbón vegetal de especies maderables tropicales reportan para las principales características del carbón valores de entre un 60% y 85% de carbón fijo [7], un contenido de volátiles del 32% al 12% [8] y un contenido en cenizas por debajo del 8% [9] [10].

Por otro lado, en Costa Rica se usan especies de reforestación de rápido crecimiento con períodos de rotación menores a los 25 años como *Acacia mangium*, *Alnus acuminata*, *Bombacopsis quinata*, *Cordia alliodora*, *Cupressus lusitanica*, *Dipterix panamensis*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Gmelina arborea* (especie exótica), *Hieronyma alchorneoides*, *Samanea saman*, *Swietenia macrophylla* (especies nativas), *Tectona grandis*, *Terminalia amazonia*, *Terminalia oblonga*, *Vochysia ferruginea*, *Vochysia guatemalensis* han demostrado excelentes resultados como especies de reforestación en plantaciones forestales de Costa Rica [11] [12] [13] [14].

Los usos de la madera de estas especies en Costa Rica han sido sumamente importantes en la industria primaria, en la construcción y en la manufactura secundaria [15]. En el caso de la madera de las especies nativas creciendo en plantaciones se usan principalmente en la industria del aserrío, con fines para la construcción o como productos derivados de la madera [15]. En la producción de madera aserrada de la materia prima en las plantaciones forestales, aproximadamente 25% de lo que se produce en plantaciones es aprovechable [16], evidenciando el problema de la poca eficiencia en la producción, pero hay un gran porcentaje de residuos que se producen del aprovechamiento de las plantaciones en Costa Rica [15]. Los residuos son un parte

muy importante del proceso de manufacturación de la madera, ya que representan una gran cantidad de aserrín y otros materiales que pueden ser utilizados y mejorar con ellos los rendimientos, por lo que existe un gran interés por desarrollar usos para dichos recursos [15].

Como se indicó, en Costa Rica la industria maderera tiene rendimientos muy bajos y es necesario su renovación mediante la valorización y utilización de los residuos generados en sus procesos, para la producción de energía eléctrica y calórica, cogeneración, producción de carbón y leña para cocinar, producción de abono orgánico, etc. [15]. Un porcentaje de los estos residuos pueden ser utilizadas como leña para producción de energía en la industria y en residencias, mientras que en las zonas rurales se podría desarrollar una industria de carbón vegetal a partir de los residuos generados en el aprovechamiento de las plantaciones forestales [15].

Actualmente en Costa Rica, aunque se dispone de información sobre las características de la madera de plantaciones forestales [17] [18], no se dispone de datos sobre las propiedades y características físico-químicas y energéticas del carbón (densidad, dureza, contenido de humedad, poder calorífico, cenizas y volátiles y composición químicas) procedente de las principales especies de crecimiento rápido empleadas para reforestación. Por este motivo, en el presente estudio se pretende determinar las propiedades energéticas del carbón producido de la madera de dieciséis especies de rápido crecimiento utilizadas para reforestación en Costa Rica, después de someterlas a un proceso de pirólisis, con el fin de comparar y evaluar el carbón obtenido como fuente viable de energía renovable.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Material utilizado

Para el presente estudio se emplearon madera de 16 especies tropicales de plantaciones forestales de rápido crecimiento de Costa Rica (Cuadro 1), con rango de edades de la plantación de entre 9 a 15 años. Las especies fueron: *Acacia magnium* (acacia), *Alnus acuminata* (jaúl), *Bombapcosis quinata* (pochote), *Cordia alliodora* (laurel), *Cupressus lusitanica* (ciprés), *Dipterix panamensis* (almendro), *Enterolobium cyclocarpum* (guanacaste), *Gmelina arborea* (melina), *Hieronyma alchorneoides* (pilón), *Samanea saman* (cenízaro), *Swietenia macrophylla* (caoba), *Tectona grandis* (teca), *Terminalia amazonia* (amarillón), *Terminalia oblonga* (surá), *Vochysia ferruginea* (botarrama) y *Vochysia guatemalensis* (cebo). El Cuadro 2 detalla la densidad, las características dasométricas de las plantaciones y su manejo.

Cuadro 1. Procedencia geográfica de las plantaciones muestreadas. Fuente: Tomado de Moya et al., 2010 [17].

Zona geográfica	Especie
Parte central del país	<i>Alnus acuminata</i>
	<i>Cupressus lusitanica</i>
Región con clima tropical seco, el Pacífico Norte	<i>Swietenia macrophylla</i>
	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>
	<i>Samanea saman</i>
	<i>Bombapcosis quinata</i>
	<i>Terminalia oblonga</i>
Regiones con clima tropical húmedo a muy húmedo, en el Pacífico Norte, Sur y Central de Costa Rica	<i>Acacia magnium</i>
	<i>Hieronyma alchorneoides</i>
	<i>Tectona grandis</i>
	<i>Gmelina arborea</i>
	<i>Terminalia amazonia</i>
	<i>Vochysia ferruginea</i>
<i>Vochysia guatemalensis</i>	

2.2. Aserrío de las trozas

En diferentes plantaciones fueron muestreados 3 árboles escogidos aleatoriamente dentro de la plantación con un diámetro próximo al diámetro promedio a la altura del pecho (Cuadro 2). De cada árbol seleccionado fue cortada una troza de 1,3 metros de largo entre la base del árbol y la altura del pecho. Estas trozas fueron aserradas utilizando el patrón típico para madera de diámetro pequeño en Costa Rica, que consiste en el aserrío de bloque central de 7,5 cm de ancho y luego se aserra en tablas de 2,5 cm de espesor. Por lo que las dimensiones de la madera aserrada son de 7,5 cm de ancho x 2,5 cm de espesor [15]. Las tablas fueron secadas al aire, por lo que el proceso de producción de carbón fue realizado con madera seca al aire o al 12% de contenido de humedad.

Cuadro 2. Condiciones dasométricas y manejo aplicado a las plantaciones muestreadas de las 16 especies maderables de plantaciones forestales de Costa Rica para la producción de carbón. Fuente: Tomado de Moya et al., 2010 [17]

Especie	Edad (años)	Densidad (árboles/hectárea)	Altura total (m)	Diámetro altura de pecho (cm)	Manejo
<i>Acacia mangium</i>	9	556	17,1	20,5	Raleo del 50% de los árboles existentes a la edad de 4 años.
<i>Alnus acuminata</i>	9	338	19	26,7	Limpiezas anuales de la vegetación arbustiva y a las edades de 3 y 6 años se ejecutaron raleos de mantenimiento.
<i>Bombapcosis quinata</i>	15	240	24,5	31,3	Raleo sanitario y un raleo del 50% a la edad de 7 años.
<i>Cordia alliodora</i>	14	439	14,6	14	Raleo sanitario y un raleo del 50% a la edad de 8 años.
<i>Cupressus lusitanica</i>	18	408	19,24	28,02	Limpiezas anuales de la vegetación arbustiva y a las edades de 6 y 10 años se

Especie	Edad (años)	Densidad (árboles/hectárea)	Altura total (m)	Diámetro altura de pecho (cm)	Manejo
					ejecutaron raleos de mantenimiento.
<i>Dipterix panamensis</i>	13	458	20,4	15,6	Raleo del 50% a la edad de 7 años.
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	20	122	14,8	35,4	Limpiezas anuales de la vegetación arbustiva y a las edades de 6 y 10 años se ejecutaron raleos de mantenimiento.
<i>Gmelina arborea</i>	12	320	20,4	26,12	Raleo sanitario y un raleo de 50% a la edad de 4 y 8 años.
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	12	332	24,8	35,4	Raleo sanitario y un raleo de 50% a la edad de 6 años.
<i>Samanea saman</i>	20	148	16,3	22,8	Limpiezas anuales de la vegetación arbustiva y a las edades de 6 y 10 años se ejecutaron raleos de mantenimiento.
<i>Swietenia macrophylla</i>	10	480	16,7	21,5	Raleo sanitario y un raleo del 50% a la edad de 8 años.
<i>Tectona grandis</i>	13	475	21,85	30.20	Recibieron las primeras prácticas de mantenimiento (raleos y podas) a la edad de 6 años.
<i>Terminalia amazonia</i>	14	452	21,4	22.59	Raleo sanitario y dos raleos del 50% a la edad de 5 y 9 años.
<i>Terminalia oblonga</i>	10	495-575	20,7	18,5	Raleo sanitario y un raleo del 50% a la edad de 8 años.
<i>Vochysia ferruginea</i>	8	309	16,9	25,3	Raleo sanitario y un raleo de 50% a la edad de 5 años.
<i>Vochysia guatemalensis</i>	8	515	22,7	18.,50	A la edad de 4 años se aplicó un raleo del 50% de los árboles existentes.

Proceso de producción del carbón vegetal

Muestras: Para la producción del carbón vegetal se preparó dos corridas por especie de 13 muestras cada una, con unas dimensiones de 12 cm x 4 cm x 2 cm (largo x ancho x espesor). Una vez preparadas las muestras e identificadas, se inició el proceso de producción del carbón, conocido como pirólisis.

Equipo utilizado: El proceso de producción de carbón se hizo utilizando un reactor cilíndrico de 12 cm de diámetro y una longitud de 30 cm, dando una capacidad de 3 litros. El reactor está provisto de una doble pared donde se sitúa la resistencia de 2000 watts, y la introducción de gas nitrógeno se hizo por la válvula 1 mientras que los gases de pirólisis salieron por la válvula 2 (Figura 1).

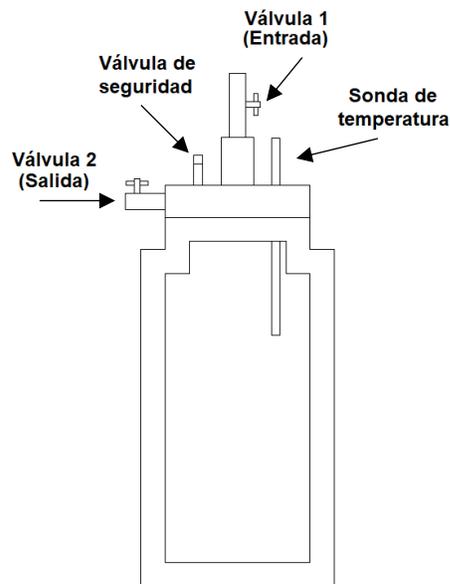


Figura 1. Esquema de los principales componentes que conforman el reactor.

Para condensar los gases se conectó la válvula 2 (salida) del reactor con un condensador refrigerado por agua. En el condensador, los gases pasaron por dos tubos condensadores de Allihn o de bulbos conectados en serie y refrigerados por un circuito cerrado de agua movido por una pequeña bomba. Al final de estos tubos se recogieron los condensados de los gases en un balón de dos cuellos. Los gases no condensados salieron por el segundo cuello del balón hacia un extractor. El esquema general de todo el proceso explicado anteriormente se resume en la Figura 2.

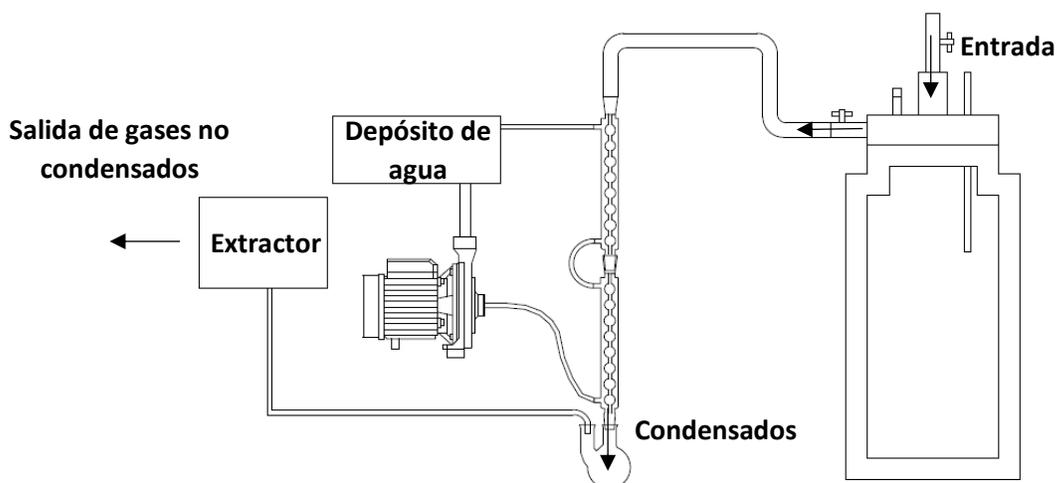


Figura 2. Esquema general del proceso de carbonización y condensación paralelo.

Condiciones de pirolisis: Las muestras se introdujeron en el reactor del laboratorio y una vez cerrado se inyectó nitrógeno a una presión de 2 MPa, a través de las válvulas para expulsar el oxígeno libre dentro del reactor, cerrando las válvulas de entrada y salida una vez se han alcanzado las condiciones deseadas. Se inició el calentado a una velocidad de 12,5 °C/min. El proceso de carbonización comenzó cuando se alcanzó la temperatura de 280°C, cuando las muestras de madera empezaron a fraccionarse produciendo carbón, vapor de agua, ácido acético y compuestos químicos más complejos, fundamentalmente en la forma de alquitranes y gases no condensables [19]. En este punto se abrió la válvula de salida de los gases hacia un condensador de agua para poder cuantificar los condensados de cada especie. Para conocer el tiempo de carbonización de las especies fueron tomados los tiempos de cada final de etapa, o sea: (i) Tiempo de salida de los primeros gases, (ii) Tiempo de pirolisis y tiempo de finalización de la pirolisis. Estos tiempos consisten en (i) el período que transcurrió desde que se enciende el reactor con las muestras, hasta que se abrió la llave de salida (250°C) para liberar los gases que éstas han empezado a producir y (ii) determina el período de tiempo que estuvo produciéndose la pirolisis dentro del reactor, y terminó cuando el reactor deja de liberar gases, lo que indica el fin de la pirolisis. La temperatura máxima alcanzada fue de 450°C, momento en el que la materia carbonizada ya se considera carbón vegetal.

2.3. Características de la materia prima

Para la caracterización de la materia prima empleada en la producción de carbón se tuvo en cuenta el contenido de humedad inicial y la densidad inicial.

Determinación del contenido de humedad inicial de la materia prima: El contenido de humedad inicial (CHI) indica la humedad que presenta la madera en el momento en el que se va a utilizar para carbonizar. Para ello se utilizaron las muestras testigo, que se pesaron en el estado en que se recibieron y en estado seco. Para su secado se calentaron al aire a 105°C durante 24 horas en un horno para determinar la masa pérdida por la muestra. El contenido de humedad expresado como porcentaje en masa, se calcula mediante la ecuación 1.

$$CHI = \frac{Pi - Ps}{Pi} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

CHI = Contenido de humedad inicial (%)

Pi = Peso inicial (g)

Ps = Peso seco, después de 24 horas en horno (g)

Determinación de la densidad inicial: Para la determinación de la densidad inicial, el volumen fue determinado por las dimensiones iniciales de las muestras de madera y el peso de las mismas, con la ecuación 2.

$$\rho_{inicial} = \frac{Pi}{Vi} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

$\rho_{inicial}$ = Densidad inicial de la materia prima (g/cm³)

Pi = Peso inicial (g)

Vi = Volumen inicial de la materia prima

2.4. Proceso de carbonización

En este proceso fue evaluado diferentes parámetros: el tiempo de inicio, tiempo de apertura a 250 °C y cierre. El tiempo de inicio fue determinado por el instante en el que se encendió el reactor con las muestras y las condiciones de ausencia de oxígeno en el interior. El tiempo de apertura a 250 °C se estableció en el momento exacto en el que el interior del reactor alcanzó dicha temperatura y fue necesario abrir la válvula 2 (Salida) para liberar la presión producida por los gases que fueron condensados en el siguiente tramo del circuito. El tiempo de cierre se determinó en cada corrida por el instante en que se observó la ausencia de gases de salida del reactor por la válvula 2 y se completó con el apagado de la resistencia de 2000 watts y el cierre de la válvula 2 para impedir el retorno de gases dentro del reactor.

2.5. Determinación del rendimiento de carbonización

Para la determinación del rendimiento de carbonización, las muestras fueron pesadas antes y después de la pirólisis. De este modo se determinó el grado de carbonización que experimentó cada especie utilizando la ecuación 3.

$$Rendimiento = \frac{P_{carb}}{P_i} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

P_{carb} = Peso de la muestra ya carbonizada (g)

P_i = Peso de la madera inicial (g)

Determinación de los condensados: El contenido de condensados se determinó a partir de la relación entre la masa de condensados obtenida durante la pirólisis por el condensador de agua al pasar los gases calientes a través de los dos tubos condensadores de Allihn o de bulbos, y el peso inicial de la madera mediante la ecuación 4.

$$Condensados = \frac{P_{cond}}{P_i} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

P_{cond} = Peso de los condensados obtenidos (g)

P_i = Peso de la madera inicial (g)

Determinación de otros materiales: Se determinó el contenido de otros materiales una vez fueron conocidos los porcentajes en carbón y condensados, siguiendo la ecuación 5.

$$Otros\ materiales = 100 - (Carbón + Condensados) \quad (5)$$

Donde:

$Carbón$ = Material carbonizado durante la pirólisis (%)

$Condensados$ = Contenido de condensados (%)

2.6. Características del carbón

Las características físicas del carbón obtenido se determinaron mediante poder calorífico, índice de combustibilidad, la densidad del carbón, contenido de humedad del carbón, dureza, cenizas y volátiles. Finalmente, las características químicas se determinaron mediante un análisis del contenido en carbono, nitrógeno, hidrógeno, azufre y oxígeno.

Determinación de la densidad del carbón: Para la determinación de la densidad del carbón, se cortaron las muestras carbonizadas para obtener 20 muestras de 2,5 cm x 2,5 cm x 2 cm por especie. El volumen fue determinado por las dimensiones de estas muestras de carbón y el peso mediante una balanza analítica de precisión. El cálculo a realizar se efectuó mediante la ecuación 6.

$$\rho_{carbón} = \frac{P_c}{V_c} \times 100 \quad (6)$$

Donde:

$\rho_{carbón}$ = Densidad del carbón (g/cm³)

P_c = Peso del carbón (g)

V_c = Volumen del carbón (cm³)

Determinación del contenido de humedad del carbón: El contenido de humedad del carbón (CHc) indica la humedad que presentó el carbón después de la pirólisis. Para ello se utilizaron las muestras recortadas de 2,5 cm x 2,5 cm x 2 cm, pesadas en el estado en que se recibieron después de la pirólisis, y en estado seco. Para su secado se calentó el aire a 103°C durante 24 horas para determinar la masa perdida por la muestra. El contenido de humedad expresado como porcentaje en masa, se calculó mediante la ecuación 7 según lo establecido en la norma ASTM D1762-84 [20].

$$CHc = \frac{P_i - P_s}{P_i} \times 100 \quad (7)$$

Donde:

CHc = Contenido de humedad del carbón (%)

P_i = Peso inicial (g)

P_s = Peso seco, después de 24 horas en horno (g)

Resistencia a la compresión: Para la determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra de las piezas carbonizadas se prepararon 20 muestras carbonizadas por especie de 2 cm x 2 cm x 5 cm. En ellas se aplicaron ensayos de compresión paralela a la fibra con una velocidad de carga de 0.3 mm/min hasta rotura completa en una máquina universal de ensayos Tinius Olsen, de 1000 kg de capacidad. Los resultados obtenidos por el programa informático son la resistencia a compresión en kg/cm².

Determinación de cenizas y volátiles: El contenido de volátiles es la parte que se transformó en gas durante el proceso de combustión. La determinación de materiales volátiles se calculó según la norma ASTM D1762-84 [20] por la diferencia de masa de las muestras tras ser calentadas a 950°C durante 6 minutos. Se pesó aproximadamente 2 gramo de material carbonizado que se introdujo en un crisol. Los crisoles fueron introducidos en el horno donde se debió garantizar una temperatura uniforme para todos los crisoles de 900±10°C. Finalmente se sacaron y se dejaron enfriar para pesar su masa final. El procedimiento para calcular el peso de los volátiles como porcentaje se realizó mediante la ecuación 8.

$$Volátiles = 100 - \frac{PC3 - PC1}{PC2 - PC1} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

$PC1$ = Peso del crisol vacío (g)

$PC2$ = Peso del crisol con la muestra antes de incinerarse (g)

$PC3$ = Peso del crisol y de las cenizas después de la incineración (g)

El contenido en cenizas es el porcentaje de materiales inorgánicos no combustibles respecto a la materia de carbón. La determinación del contenido de cenizas se realizó según la norma ASTM D1762-84 [20] midiendo la diferencia de peso de una muestra tras su incineración según se expone en la ecuación 9.

$$Cenizas = \frac{PC3 - PC1}{PC2 - PC1} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

$PC1$ = Peso del crisol vacío (g)

$PC2$ = Peso del crisol con la muestra antes de incinerarse (g)

$PC3$ = Peso del crisol y de las cenizas después de la incineración (g)

Determinación del poder calorífico: La determinación del poder calorífico se realizó siguiendo la norma ASTM D5865-13 [21] en un calorímetro semimicro-calorimétrica marca Parr modelo 6725, donde se produce una combustión de la muestra en un recipiente cerrado herméticamente de 300 ml, que se llenó con oxígeno a 3 MPa de presión y está sumergido en agua a una temperatura conocida. En el interior del recipiente, mediante un alambre se unen dos electrodos por los que se hizo circular corriente durante el proceso. Esta corriente produjo el calor necesario para activar la reacción, provocando la ignición de la muestra y el aumento de la temperatura que fue registrada por el calorímetro.

Determinación del índice de combustibilidad: La determinación del índice de combustibilidad (IC) es la relación entre el poder calorífico y la densidad de la muestra, y el contenido de cenizas y la humedad de la muestra de carbón. Fue calculado según la metodología de Purohit y Nautiyal [22] con la ecuación 10.

$$IC = \frac{PC - \rho_{carbón}}{Ce - CHc} \quad (10)$$

Donde:

IC = Índice de combustibilidad

PC = Poder calorífico de la muestra (Kj/kg)

$\rho_{carbón}$ = Densidad del carbón (g/cm³)

Ce = Porcentaje contenido de cenizas (%)

CHc = Contenido de humedad del carbón (%)

Determinación de los principales elementos: La determinación del porcentaje en peso de los principales elementos (Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Azufre y Oxígeno) en las muestras de carbón obtenidas para las dieciséis especies, se realizó mediante un sistema de análisis elemental a alta temperatura (1200 °C) durante 10 minutos por muestra, mediante ensayos preprogramados informáticamente, dependiendo de la tipología de la muestra y la cantidad.

2.7. Análisis estadísticos

En el presente trabajo se realizó un análisis descriptivo previo (media, desviación estándar) para todas las variables de respuesta. En el análisis estadístico se comprobó la normalidad de los datos y se realizó un análisis de varianza mediante el procedimiento GLM del programa estadístico SAS (SAS Institute 1997) para comprobar el grado de significatividad de las variables de respuesta. A través de pruebas de Tukey ($P < 0,05$), se enfrentaron y comprobaron los promedios del contenido de humedad inicial de la madera, la densidad inicial de la madera, contenido de humedad del carbón, la resistencia a compresión, densidad del carbón, el poder calorífico, el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre.

3. RESULTADOS

3.1. Características de la materia prima

En el caso del contenido de humedad inicial (CHI) se puede observar en la Figura 3 que varió de 3,27% a 44,05%, siendo *A. mangium* y *T. amazonia* las únicas que no presentaron valores estadísticamente diferentes entre sí y diferentes al resto de las especies. Mientras que para las demás especies se pudo agrupar en cinco grupos, basados en sus medias, que en algunos casos las especies se repiten entre grupos (Figura 3): un primer grupo (A) lo constituyó *D. panamensis*, *G. arborea*, *H. alchorneoides* y *T. grandis*. El segundo grupo (B) lo conformó *A. acuminata*, *B. quinata*, *C. alliodora*, *C. lusitanica*, *E. cyclocarpum*, *S. saman* y *V. guatemalensis*. El tercer grupo (C) lo constituyó *G. arborea*, *S. macrophylla*, *T. oblonga* y *V. ferruginea*. El cuarto grupo (D) lo formaron *A. acuminata*, *C. alliodora*, *C. lusitanica*, *D. panamensis*, *E. cyclocarpum*, *H. alchorneoides*, *S. saman* y *T. grandis*.

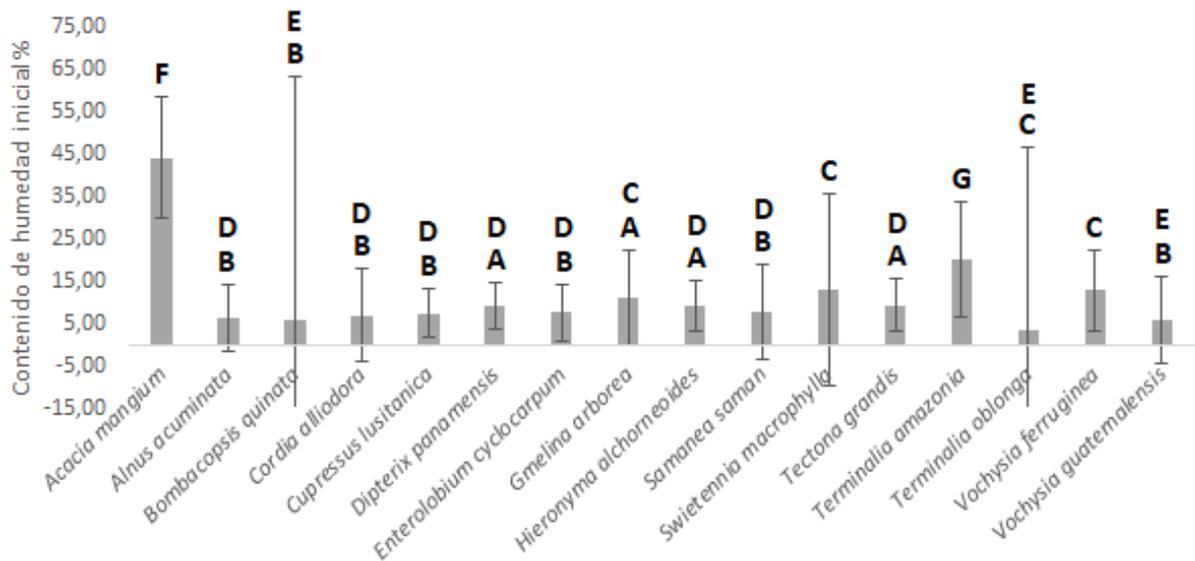


Figura 3. Contenido de humedad inicial de la materia prima para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, agrupado en sus respectivos grupos estadísticos.

En lo referente a la densidad inicial de la madera de las 16 especies se obtuvo que la más baja fue de 0,36 g/cm³ para *V. guatemalensis* y el valor más alto fue de 0,95 g/cm³ para *D. panamensis*. Se establecieron ocho grupos estadísticamente diferentes como se muestra en la Figura 4. El primer grupo (A) lo formaron *H. alchorneoides* y *T. grandis*. El segundo grupo (B) lo conformó *C. lusitanica*, *E. cyclocarpum* y *G. arborea*. El tercer grupo (C) lo conformó *A. acuminata* y *B. quinata*. El cuarto grupo (D) lo constituyó *C. alliodora*, *V. ferruginea* y *V. guatemalensis*. El quinto grupo (E) lo conformó *H. alchorneoides*, *S. saman*, *S. macrophylla* y *T. oblonga*. El sexto grupo (F) lo formaron *C. lusitanica* y *T. grandis*. El séptimo grupo (G) lo conformó *B. quinata*, *E. cyclocarpum* y *G. arborea*. El octavo grupo (H) lo conformó *A. acuminata*, *C. alliodora* y *V. ferruginea*. Mientras que *A. mangium* y *D. panamensis* las únicas que no presentaron valores estadísticamente significativos.

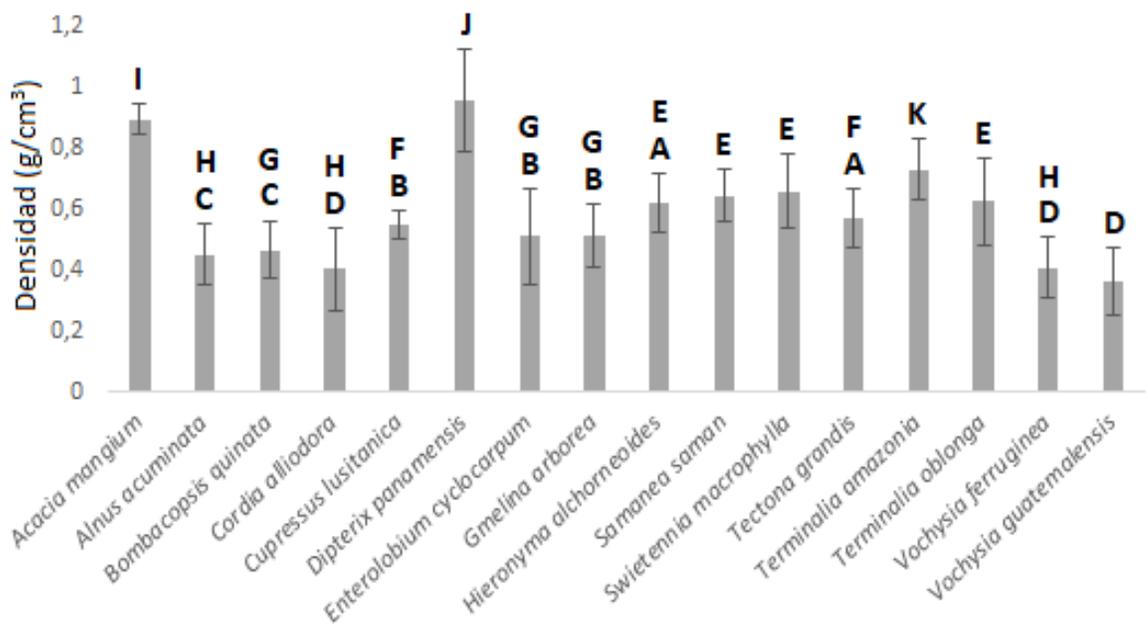


Figura 4. Densidad inicial de la materia prima para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, agrupado en sus respectivos grupos estadísticos.

3.2. Proceso de producción del carbón vegetal

Tiempo de pirólisis: El tiempo de pirólisis determinó el grado de carbonización de las muestras de las dieciséis especies. En el presente estudio se pretendió conseguir una carbonización completa de las muestras y para ello se emplearon dos corridas. Los tiempos de la primera corrida fueron iguales o inferiores a los de la segunda corrida (Cuadro 3), ya que si se observó una carbonización parcial o incompleta se aumentó el tiempo de pirólisis para garantizar la completa carbonización. En algunos casos debido al poco grado de carbonización obtenido de la corrida 1 se duplicó el tiempo de pirólisis (*S. macrophylla*). En general el tiempo de pirólisis varió de 01:00:00 hora para *G. arborea* a 03:00:00 horas para *A. mangium*, *S. macrophylla*, *T. amazonia* y *T. oblonga*. En cuanto al tiempo de apertura a 250 °C, *C. lusitanica* fue la especie que más rápido alcanzó dicha temperatura a una velocidad de 25 °C/minuto, mientras que *D. panamensis* fue la especie que más tardó en alcanzar los 250 °C a una velocidad de 8,92 °C/minuto. *A. acuminata*, *S. saman* y *S. macrophylla* presentaron tiempos de apertura a 250°C similares con una velocidad promedio de calentamiento de 16,66 °C/minuto, *C. alliodora*, *G. arborea*, *H. alchorneoides* y *T. oblonga* presentaron tiempos de apertura a 250°C similares con una velocidad promedio de calentamiento de 12,50 °C/minuto y *A. mangium*, *E. cyclocarpum*, *T. amazonia* y *V. guatemalensis* presentaron una velocidad de calentamiento similar de 20 °C/minuto.

Cuadro 3. Tiempos y procesos durante el proceso de pirólisis en laboratorio para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica.

<i>Especie</i>	<i>Corrida 1</i>			<i>Corrida 2</i>		
	Tiempo de inicio	Tiempo de apertura a 250 °C	Cierre	Tiempo de inicio	Tiempo de apertura a 250 °C	Cierre
<i>Acacia mangium</i>	00:00:00	+ 00:25:00	+ 02:33:00	00:00:00	+ 00:20:00	+ 03:00:00
<i>Alnus acuminata</i>	00:00:00	+ 00:15:00	+ 01:15:00	00:00:00	+ 00:20:00	+ 01:30:00
<i>Bombacopsis quinata</i>	00:00:00	+ 00:13:00	+ 02:00:00	00:00:00	+ 00:20:00	+ 02:00:00
<i>Cordia alliodora</i>	00:00:00	+ 00:20:00	+ 01:20:00	00:00:00	+ 00:15:00	+ 01:16:00
<i>Cupressus lusitanica</i>	00:00:00	+ 00:10:00	+ 01:20:00	00:00:00	+ 00:11:00	+ 01:30:00
<i>Dipterix panamensis</i>	00:00:00	+ 00:28:00	+ 02:10:00	00:00:00	+ 00:19:00	+ 02:15:00

Especie	Corrida 1			Corrida 2		
	Tiempo de inicio	Tiempo de apertura a 250 °C	Cierre	Tiempo de inicio	Tiempo de apertura a 250 °C	Cierre
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	00:00:00	+ 00:25:00	+ 01:55:00	00:00:00	+ 00:20:00	+ 01:55:00
<i>Gmelina arborea</i>	00:00:00	+ 00:20:00	+ 01:00:00	00:00:00	+ 00:20:00	+ 01:20:00
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	00:00:00	+ 00:20:00	+ 01:40:00	00:00:00	+ 00:20:00	+ 02:20:00
<i>Samanea saman</i>	00:00:00	+ 00:15:00	+ 01:30:00	00:00:00	+ 00:20:00	+ 02:00:00
<i>Swietenia macrophylla</i>	00:00:00	+ 00:15:00	+ 01:55:00	00:00:00	+ 00:20:00	+ 03:00:00
<i>Tectona grandis</i>	00:00:00	+ 00:23:00	+ 01:40:00	00:00:00	+ 00:20:00	+ 02:19:00
<i>Terminalia amazonia</i>	00:00:00	+ 00:25:00	+ 02:35:00	00:00:00	+ 00:24:00	+ 03:00:00
<i>Terminalia oblonga</i>	00:00:00	+ 00:20:00	+ 03:00:00	00:00:00	+ 00:20:00	+ 03:00:00
<i>Vochysia ferruginea</i>	00:00:00	+ 00:23:00	+ 01:30:00	00:00:00	+ 00:21:00	+ 01:58:00
<i>Vochysia guatemalensis</i>	00:00:00	+ 00:25:00	+ 01:15:00	00:00:00	+ 00:20:00	+ 01:30:00

3.3. Proceso de carbonización

En lo referente a la carbonización se encontró que: (i) El rendimiento en carbón varió de 23,88% a 40,73%, siendo el máximo rendimiento para *E. cyclocarpum*, y el rendimiento más bajo para *A. mangium* (Figura 5). (ii) Los dos rendimientos más bajos correspondientes a *A. mangium* y *T. amazonia*, coinciden con las especies con un contenido de humedad inicial más alto (Figura 3). En el resto de las especies presentaron valores intermedios entre 32,82% y 38,73%.

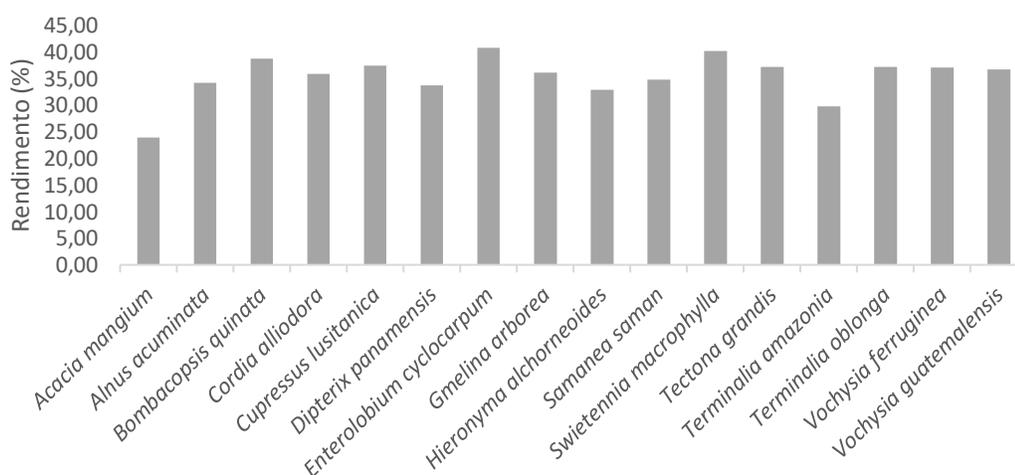


Figura 5. Rendimiento en el proceso de carbonización de la materia prima para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica.

Condensados durante la pirólisis y otros materiales: Los condensados obtenidos fueron de 23,84% para *A. mangium*, a 48,86% para *V. ferruginea*, mientras que el contenido de otros materiales fue de 14,08% para *V. ferruginea*, a 52,27% para *A. mangium*, como se muestra en el Cuadro 4. En el resto de las especies presentaron valores intermedios entre 25,58% y 43,65% para el caso de condensados, y entre 19,66% y 38,58 % para el caso de otros materiales.

Cuadro 4. Condensados y otros materiales obtenidos de la materia prima para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica.

Especie	Condensados (%)	Otros materiales (%)
<i>Acacia mangium</i>	23,84	52,27
<i>Alnus acuminata</i>	38,08	27,76
<i>Bombacopsis quinata</i>	33,91	27,37
<i>Cordia alliodora</i>	25,58	38,58
<i>Cupressus lusitanica</i>	36,97	25,65
<i>Dipterix panamensis</i>	43,65	22,62
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	32,96	26,31
<i>Gmelina arborea</i>	32,80	31,06
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	40,27	26,91
<i>Samanea saman</i>	40,36	24,82
<i>Swietenia macrophylla</i>	40,13	19,66
<i>Tectona grandis</i>	38,64	24,24
<i>Terminalia amazonia</i>	40,07	30,17
<i>Terminalia oblonga</i>	42,19	20,64
<i>Vochysia ferruginea</i>	48,86	14,08
<i>Vochysia guatemalensis</i>	36,34	26,98

3.4. Características del carbón

En lo que respecta a la densidad del carbón obtenido, se puede observar en la Figura 6 que varió de 0,16 g/cm³ para *V. ferruginea* a 0,40 g/cm³ para *D. panamensis*, siendo *D. panamensis* la única que no presentó valores estadísticamente diferentes entre sí y diferentes al resto de las especies. Mientras que para las demás especies se pueden agrupar en tres grupos, basados en sus densidades medias (Figura 6): un primer grupo (A) lo constituyó *A. mangium*, *H. alchorneoides*, *S. saman*, *S. macrophylla*, *T. amazonia* y *T. oblonga*. El segundo grupo (B) lo conformó *A. acuminata*, *B. quinata*, *C. lusitanica*, *E. cyclocarpum*, *G. arborea* y *T. grandis*. El tercer grupo (C) lo conformó *C. alliodora*, *V. ferruginea* y *V. guatemalensis*.

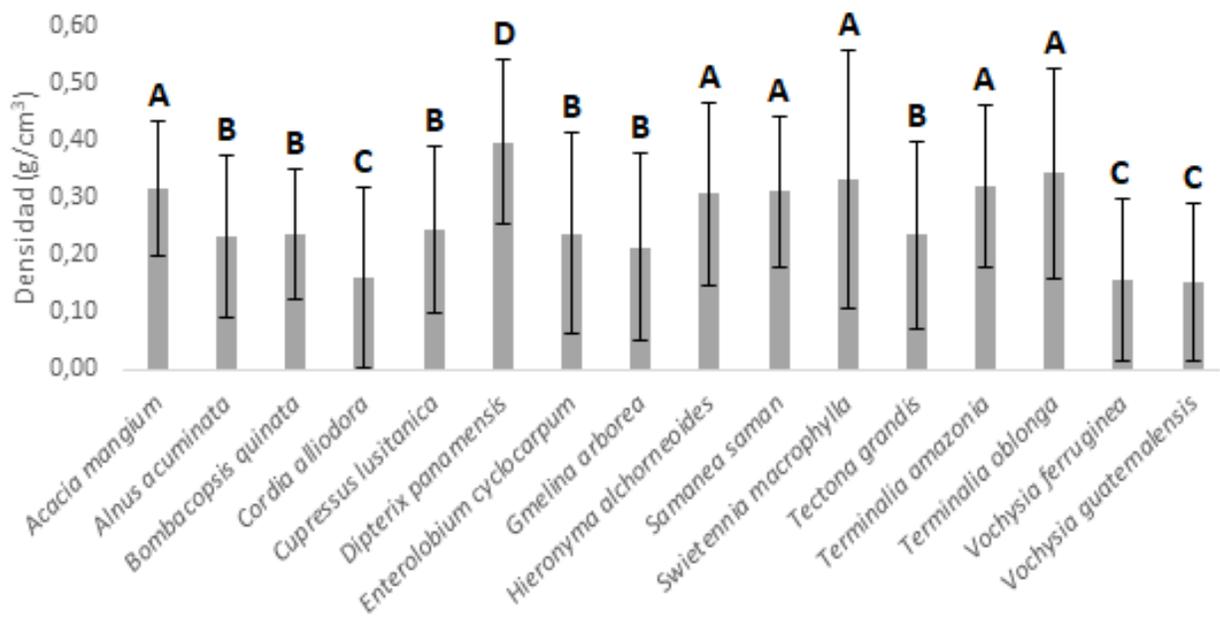


Figura 6. Densidad del carbón para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, agrupado en sus respectivos grupos estadísticos.

En el caso del contenido de humedad del carbón de las 16 especies se tuvo que la más baja fue del 2,66% para *T. oblonga* y el valor más alto fue de 7,92% para *V. ferruginea*. Se asignaron cuatro grupos estadísticamente diferentes, basados en sus medias, que en algunos casos las especies se repiten entre grupos (Cuadro 5): un primer grupo (A) lo constituyó *A. mangium*, *A. acuminata*, *C. alliodora*, *D. panamensis*, *G. arborea*, *H. alchorneoides*, *S. saman*, *T. grandis*, *T. amazonia*, *V. ferruginea* y *V. guatemalensis*. El segundo grupo (B) lo conformó *A. mangium*, *B. quinata*, *C. alliodora*, *D. panamensis*, *E. cyclocarpum*, *G. arborea*, *H. alchorneoides*, *S. saman*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia*, *V. ferruginea* y *V. guatemalensis*. El tercer grupo (C) lo formó *A. mangium*, *B. quinata*, *C. alliodora*, *D. panamensis*, *E. cyclocarpum*, *G. arborea*, *H. alchorneoides*, *S. saman*, *T. grandis*, *T. amazonia*, *T. oblonga*, *V. ferruginea* y *V. guatemalensis*. Mientras que *C. lusitanica* fue la única que no presentó valores estadísticamente significativos con las otras especies.

En lo que respecta a la resistencia a compresión paralela a fibra, de las 16 especies se tiene que la más baja fue de 23,32 kg/cm² para *V. ferruginea* y el valor más alto fue de 82,92 kg/cm² para *A. mangium*. En este caso se establecieron once grupos estadísticamente diferentes, basados en sus medias, que en algunos casos las especies se repiten entre grupos como se muestra en el Cuadro 5. El primer grupo (A) lo formó *C. alliodora*, *G. arborea*, *V. ferruginea* y *V. guatemalensis*. El segundo grupo (B) lo conformó *D. panamensis* y *V. guatemalensis*. El tercer grupo (C) lo constituyó *A. mangium*, *A. acuminata*, *B. quinata* y *V. guatemalensis*. El cuarto grupo (D) lo constituyó *A. mangium*, *C. lusitanica* y *S. macrophylla*. El quinto grupo (E) lo conformó *A. mangium*, *C. lusitanica*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga*. El sexto grupo (F) lo formó *A. mangium*, *C. lusitanica*, *S. saman*, *T. amazonia* y *T. oblonga*. El séptimo grupo (G) lo constituyó *A. mangium*, *C. lusitanica*, *E. cyclocarpum*, *T. amazonia* y *T. oblonga*. El octavo grupo (H) lo conformó *A. mangium*, *C. lusitanica*, *G. arborea*, *H. alchorneoides*, *T. amazonia* y *T. oblonga*. El noveno grupo (I) lo constituyó *A. mangium*, *C. lusitanica*, *H. alchorneoides*, *T. amazonia* y *T. oblonga*. El décimo grupo (J) lo conformó *A. mangium*, *C. lusitanica*, *H. alchorneoides*, *T. amazonia*, *T. oblonga* y *V.*

ferruginea. Por último, el undécimo grupo (K) lo formó *A. mangium*, *B. quinata*, *C. lusitanica*, *D. panamensis*, *H. alchorneoides*, *T. amazonia* y *T. oblonga*.

Las cenizas obtenidas fueron de 0,26 % para *C. lusitanica*, y 6,36 % para *B. quinata*, mientras que para el contenido de la fracción de volátiles se invirtió el resultado, ya que fue de 24,16 % para *B. quinata*, y 33,34 % para *C. lusitanica*, como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Contenidos de humedad, resistencia a compresión paralela a la fibra, contenido en cenizas y volátiles para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, agrupado en sus respectivos grupos estadísticos.

Especie	Contenido de humedad del carbón (%)	Dureza (kg/cm ²)	Cenizas (%)	Volátiles (%)
<i>Acacia mangium</i>	4,10 ^{ABC} (13,13)	82,92 ^{CDFGHIJK} (66,74)	2,34	25,28
<i>Alnus acuminata</i>	3,29 ^A (16,28)	42,55 ^C (36,11)	1,08	26,24
<i>Bombacopsis quinata</i>	3,84 ^{BC} (10,78)	51,96 ^{CK} (51,13)	6,36	24,16
<i>Cordia alliodora</i>	6,09 ^{ABC} (12,48)	24,39 ^A (42,88)	1,19	25,04
<i>Cupressus lusitanica</i>	3,38 ^D (13,36)	68,44 ^{DFGHIJK} (57,06)	0,26	33,34
<i>Dipterix panamensis</i>	4,92 ^{ABC} (14,49)	52,90 ^{BK} (71,03)	0,99	29,13
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	3,75 ^{BC} (15,74)	33,20 ^G (36,48)	2,79	24,55
<i>Gmelina arborea</i>	4,81 ^{ABC} (14,89)	29,90 ^{AH} (53,87)	3,16	27,16
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	5,96 ^{ABC} (13,19)	60,02 ^{AHIJK} (50,51)	1,57	29,45
<i>Samanea saman</i>	5,24 ^{ABC} (10,95)	33,49 ^F (54,82)	3,16	24,65
<i>Swietenia macrophylla</i>	2,97 ^B (17,31)	36,95 ^D (68,22)	1,57	30,91
<i>Tectona grandis</i>	6,42 ^{ABC} (13,49)	34,98 ^E (47,62)	3,98	29,25
<i>Terminalia amazonia</i>	4,41 ^{ABC} (13,33)	65,92 ^{EFGHIJK} (48,06)	0,99	25,22
<i>Terminalia oblonga</i>	2,66 ^C (18,68)	64,67 ^{EFGHIJK} (43,05)	7,81	22,45
<i>Vochysia ferruginea</i>	7,92 ^{ABC} (14,37)	23,32 ^{AJ} (43,28)	5,51	25,77
<i>Vochysia guatemalensis</i>	5,39 ^{ABC} (17,63)	19,07 ^{ABC} (51,57)	7,98	24,81

Notas:

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

Números entre paréntesis representan el coeficiente de variación (%).

En el caso de los valores energéticos del poder calorífico de las 16 especies, Figura 7, oscilaron desde los 24,30 MJ/kg en *V. guatemalensis*, a los 32,10 MJ/kg en *A. mangium*. Se establecieron tres grupos estadísticamente diferentes (Figura 7), basados en sus medias, lo que hizo que algunas especies se repitieran entre grupos: un primer grupo (A) lo constituyó *C. alliodora*, *D. panamensis*, *E. cyclocarpum*, *G. arborea*, *H. alchorneoides*, *S. saman*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. oblonga* y *V. ferruginea*. El segundo grupo (B) lo conformó *A. mangium*, *A. acuminata*, *C. lusitanica*, *D. panamensis*, *G. arborea*, *H. alchorneoides*, *S. saman*, *T. grandis*, *T. amazonia*, *T. oblonga* y *V. ferruginea*. El tercer grupo (C) lo constituyó *B. quinata*, *C. alliodora*, *E. cyclocarpum*, *S. macrophylla* y *V. guatemalensis*.

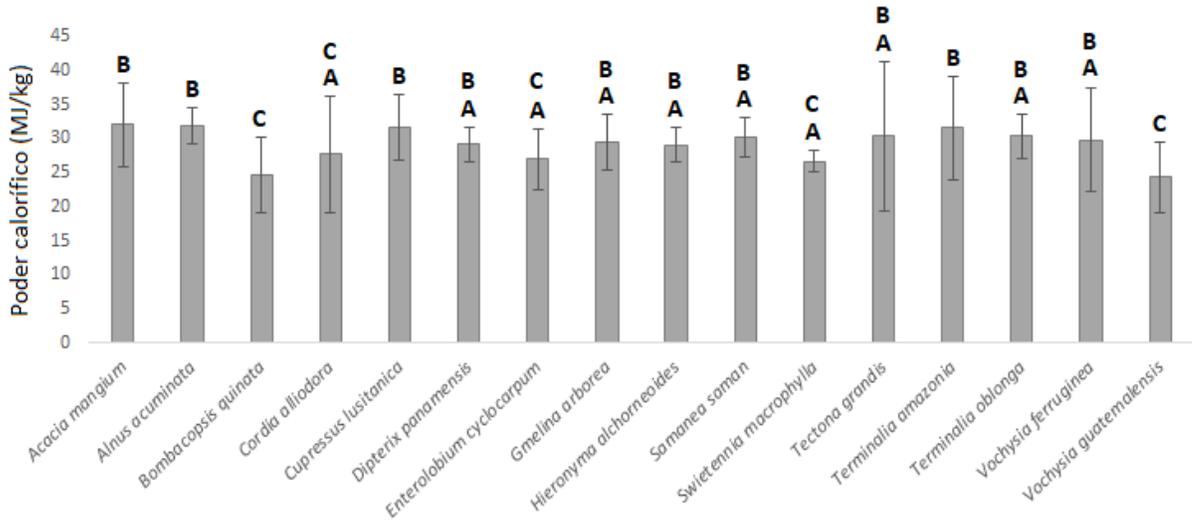


Figura 7. Poder calorífico del carbón para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, agrupado en sus respectivos grupos estadísticos.

Por último, los valores del Índice de combustibilidad oscilaron entre 85,83 para *V. guatemalensis*, y 8.806,80 para *C. lusitánica*, Figura 8.

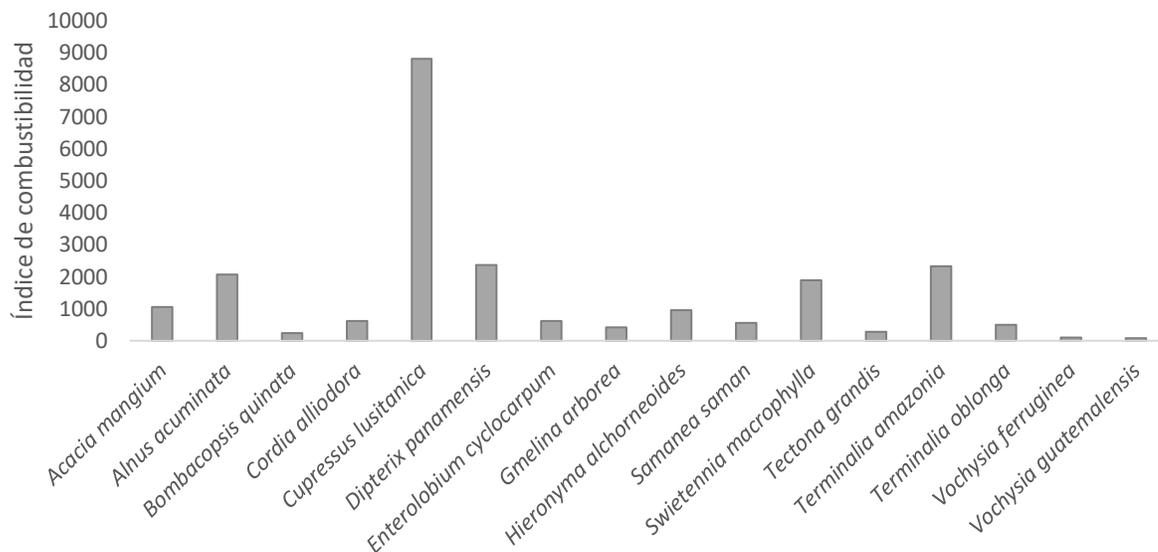


Figura 8. Índice de combustibilidad para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica.

Propiedades químicas: Respecto a las propiedades químicas que se obtuvieron para las dieciséis especies, se pudo observar (Cuadro 6) que respecto al contenido de carbono el valor más bajo fue de 69,43% para *T. oblonga* y el valor más alto de 78,51% para *C. alliodora*. Se establecieron siete grupos estadísticamente diferentes (Cuadro 6) basados en sus medias, que en algunos casos hizo que las especies se repitieran entre grupos: un primer grupo (A) lo constituyó *A. mangium*, *A. acuminata* y *D. panamensis*. El segundo grupo (B) lo conformó *C. lusitanica*, *E. cyclocarpum*, *G. arborea*, *H. alchorneoides*, *S. macrophylla*, *T. grandis* y *T. amazonia*. El tercer grupo (C) lo conformó *B. quinata*, *T. oblonga* y *V. ferruginea*. El cuarto grupo (D) lo constituyó *A. mangium*, *A. acuminata* y *C. alliodora*. El quinto grupo (E) lo conformó *E. cyclocarpum*, *G. arborea*, *H. alchorneoides*, *S. saman*, *S. macrophylla*, *T. grandis* y *T. amazonia*. El sexto grupo (F) lo formaron *C. lusitanica*, *D. panamensis* y *T. grandis*. Por último, el séptimo grupo (G) constituyó *B. quinata* y *S. saman*.

Respecto al contenido de hidrógeno presente en el carbón obtenido se tuvo que el contenido más bajo fue de 3,55% para *S. saman* y el valor más alto fue de 4,15% para *G. arborea*. Se establecieron seis grupos estadísticamente diferentes (Cuadro 6). El primer grupo (A) lo formaron *A. mangium*, *A. acuminata*, *C. lusitanica*, *D. panamensis*, *H. alchorneoides*, *T. grandis* y *V. ferruginea*. El segundo grupo (B) lo conformó *B. quinata*, *C. alliodora* y *S. macrophylla*. El tercer grupo (C) lo formaron *G. arborea* y *T. grandis*. El cuarto grupo (D) lo constituyó *A. acuminata*, *H. alchorneoides*, *S. macrophylla* y *V. ferruginea*. El quinto grupo (E) lo conformó *B. quinata*, *C. alliodora* y *T. amazonia*. El sexto grupo (F) lo formaron *B. quinata*, *E. cyclocarpum*, *S. saman*, *T. amazonia*, *T. oblonga* y *V. guatemalensis*.

En relación al contenido de nitrógeno presente en el carbón obtenido, se tiene que el contenido más bajo fue de 0,17% para *C. lusitanica* y *S. macrophylla*, y el valor más alto fue de 0,55% para *S. saman*. Se establecieron seis grupos estadísticamente diferentes como se muestra en el Cuadro 6. El primer grupo (A) lo formaron *A. mangium*, *B. quinata* y *C. alliodora*. El segundo grupo (B) lo conformó *D. panamensis*, *G. arborea*, *H. alchorneoides*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *V. ferruginea*. El tercer grupo (C) lo formó *S. saman* la única que presentó valores diferentes al resto de las especies. El cuarto grupo (D) lo constituyó *A. acuminata*, *C. alliodora* y *E. cyclocarpum*. El quinto grupo (E) lo conformó *A. mangium*, *B. quinata*, *G. arborea* y *T. grandis*. El sexto grupo (F) lo formaron *C. lusitanica*, *D. panamensis*, *G. arborea* y *S. macrophylla*.

En cuanto al contenido de azufre presente en el carbón obtenido, se tiene que el contenido más bajo fue de 0,1% para *A. mangium*, *A. acuminata*, *C. lusitanica*, *D. panamensis*, *E. cyclocarpum*, *H. alchorneoides*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *V. guatemalensis*, y el valor más alto fue de 0,9% para *C. alliodora*. En este caso se establecieron solo dos grupos estadísticamente diferentes como se muestra en el Cuadro 6. El primer grupo (A) lo formaron *C. alliodora*, la única que presentó valores diferentes al resto de las especies. El resto de las especies fueron agrupadas en el segundo grupo (B). Finalmente, el contenido de oxígeno presente en el carbón obtenido fue de 16,07% para *C. alliodora*, y 21,35% para *T. amazonia*.

Cuadro 6. Propiedades químicas para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, ordenados en sus respectivos grupos estadísticos.

Especie	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
<i>Acacia mangium</i>	77,87 ^{AD} (0,92)	3,97 ^A (1,50)	0,31 ^{AE} (1,79)	0,01 ^B (43,07)	15,50
<i>Alnus acuminata</i>	76,97 ^{AD} (1,49)	3,93 ^{AD} (0,89)	0,44 ^D (26,99)	0,01 ^B (20,79)	17,57
<i>Bombacopsis quinata</i>	71,10 ^{CG} (1,12)	3,67 ^{BEF} (1,29)	0,30 ^{AE} (8,89)	0,02 ^B (32,37)	18,55
<i>Cordia alliodora</i>	78,51 ^D (1,49)	3,76 ^{BE} (1,84)	0,38 ^{AD} (10,02)	0,09 ^A (90,07)	16,07
<i>Cupressus lusitanica</i>	75,02 ^{BF} (1,50)	3,99 ^A (1,94)	0,17 ^F (14,82)	0,01 ^B (16,11)	20,56
<i>Dipterix panamensis</i>	76,11 ^{AF} (1,16)	3,98 ^A (1,26)	0,21 ^{BF} (10,07)	0,01 ^B (30,62)	18,70
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	73,69 ^{BE} (0,81)	3,57 ^F (2,14)	0,42 ^D (3,23)	0,01 ^B (36,36)	19,53
<i>Gmelina arborea</i>	73,41 ^{BE} (1,27)	4,15 ^C (2,54)	0,22 ^{BEF} (19,10)	0,02 ^B (65,38)	19,05
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	73,60 ^{BE} (0,52)	3,92 ^{AD} (0,48)	0,21 ^{BF} (6,15)	0,01 ^B (43,79)	20,68
<i>Samanea saman</i>	72,82 ^{GE} (1,38)	3,55 ^F (2,19)	0,55 ^C (3,51)	0,03 ^B (29,40)	19,90
<i>Swietenia macrophylla</i>	74,13 ^{BE} (1,03)	3,78 ^{BD} (0,77)	0,17 ^F (4,16)	0,01 ^B (13,55)	20,34
<i>Tectona grandis</i>	74,39 ^{BEF} (1,00)	4,00 ^{AC} (0,84)	0,24 ^{BEF} (7,70)	0,01 ^B (69,40)	17,39
<i>Terminalia amazonia</i>	73,78 ^{BE} (1,19)	3,62 ^{EF} (2,99)	0,25 ^{BEF} (8,94)	0,01 ^B (75,42)	21,35
<i>Terminalia oblonga</i>	69,43 ^C (1,41)	3,61 ^F (2,64)	0,41 ^D (4,04)	0,03 ^B (19,80)	18,71
<i>Vochysia ferruginea</i>	70,51 ^C (0,83)	3,92 ^{AD} (0,50)	0,28 ^{BE} (3,57)	0,02 ^B (23,76)	19,77
<i>Vochysia guatemalensis</i>	69,59 ^C (0,54)	3,60 ^F (0,86)	0,25 ^{BEF} (7,48)	0,01 ^B (26,34)	18,57

Notas:

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

Números entre paréntesis representan el coeficiente de variación (%).

3.5. Parámetros de calidad de las propiedades

El carbón vegetal obtenido de las dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, se situó dentro de los estándares de calidad (Cuadro 7) según la norma DIN EN 1860-2 [23], salvo el parámetro de contenido en volátiles que no entró dentro del umbral tolerable por la norma estadounidense, y el parámetro carbono fijo donde algunas especies se encontraron en el límite exigido, como *B. quinata*, *E. cyclocarpum*, *G. arborea*, *H. alchorneoides*, *S. saman*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia*, *T. oblonga*, *V. ferruginea* y *V. guatemalensis*.

Cuadro 7. Comparación de los parámetros más relevantes obtenidos, con el estándar de calidad estadounidense DIN EN 1860-2 [23] para dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica.

	Carbono fijo (%)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Humedad (%)
<i>Acacia mangium</i>	77,87	25,28	2,34	4,10
<i>Alnus acuminata</i>	76,97	26,24	1,08	3,29
<i>Bombacopsis quinata</i>	71,10	24,16	6,36	3,84
<i>Cordia alliodora</i>	78,51	25,04	1,19	6,09
<i>Cupressus lusitanica</i>	75,02	33,34	0,26	3,38
<i>Dipterix panamensis</i>	76,11	29,13	0,99	4,92
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	73,69	24,55	2,79	3,75
<i>Gmelina arborea</i>	73,41	27,16	3,16	4,81
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	73,6	29,45	1,57	5,96
<i>Samanea saman</i>	72,82	24,65	3,16	5,24
<i>Swietenia macrophylla</i>	74,13	30,91	1,57	2,97
<i>Tectona grandis</i>	74,39	29,25	3,98	6,42
<i>Terminalia amazonia</i>	73,78	25,22	0,99	4,41
<i>Terminalia oblonga</i>	69,43	22,45	7,81	2,66
<i>Vochysia ferruginea</i>	70,51	25,77	5,51	7,92
<i>Vochysia guatemalensis</i>	69,59	24,81	7,98	5,39
DIN EN 1860-2	75,00	9,00	8,00	8,00

4. DISCUSIÓN

4.1. Características de la materia prima

Se observa que un contenido de humedad inicial alto (más del 10%), encontrado en las especies de *A. mangium*, *G. arborea*, *S. macrophylla*, *T. amazonia* y *V. ferruginea* del presente estudio (Figura 3), produce un efecto negativo en el rendimiento de la carbonización, ya que disminuye la consistencia y tiende a desmenuzarse, además puede producir carbonilla fina cuando se calienta en las fundiciones, lo que no es deseable en la producción de hierro en usos de metalurgia [19].

La densidad inicial de las especies empleadas (Figura 4) demuestran que especies de maderas con una densidad inicial más elevada, dan lugar a un carbón vegetal más denso y resistente a la compresión paralela a la fibra. Mientras que especies de maderas con una densidad inicial más baja, dan lugar a un carbón vegetal menos denso y menos resistente a la compresión paralela a la fibra. Sin embargo, la densidad suele ser un parámetro muy variable, ya que incluso dentro del mismo ejemplar depende de la zona anatómica que se emplee, así se obtiene una mayor o menor densidad [24]. Del mismo modo, también se producen variaciones de densidad dependiendo del área geográfica y el clima de la especie [25], por lo que el carbón producido depende de estas condiciones.

4.2. Proceso de producción de carbón vegetal

En el caso del tiempo de pirólisis (Cuadro 3), en el presente estudio se observa la relación entre un alto grado de carbonización de las muestras y un mayor tiempo de pirólisis. No obstante, el tiempo de pirólisis no tiene tanta incidencia en el rendimiento de producción y en la cantidad de volátiles obtenidos como en otros estudios [26].

En general el rendimiento de producción del carbón vegetal que se obtiene (de 23,88% a 40,73%) presenta una buena relación entre contenido de carbono y friabilidad. Ya que al aumentar la temperatura de carbonización aumenta el contenido de carbono fijo, pero este aumento también conlleva una mayor friabilidad, lo que supone una

mayor facilidad de disgregarse durante el proceso de carbonización reduciendo así el rendimiento [19]. Por otro parte el rendimiento en estas especies (Figura 5) es susceptible de variar dependiendo de múltiples factores, como el equipo empleado, los tiempos y temperaturas durante la pirólisis y el contenido de humedad de la madera [27].

En cuanto a los condensados durante la pirólisis y otros materiales (Cuadro 4), se observa que las muestras de carbón vegetal con un contenido de condensados más elevado, están relacionados con las maderas con una densidad inicial más elevada, salvo en el caso de *A. mangium* que presenta un bajo contenido en condensados (23,84%) y una alta densidad inicial (0,89 g/cm³), debido probablemente al alto contenido de humedad inicial que presenta (44,05%).

4.3. Características del carbón

La densidad obtenida del carbón (Figura 6) como era de esperar disminuye después de aplicar el proceso de pirólisis, ya que después de la descomposición térmica de la materia orgánica, se extraen los compuestos gaseosos y líquidos basados en carbono [28]. Sin embargo, no se observa ninguna relación entre el tiempo total de pirólisis, la densidad inicial de la materia prima y la densidad final del carbón vegetal.

El contenido de humedad (Cuadro 5), se relaciona directamente con las características mecánicas del carbón, siendo la resistencia a compresión paralela a la fibra la más desatada [29] [30]. Una muestra de carbón en un estado más seco tiene mejores propiedades de resistencia debido a la densificación y rigidización de las paredes celulares y el incremento de la materia por unidad de volumen. También influye directamente en parámetros importantes como la densidad y el poder calorífico del carbón [18]. Después del proceso de pirólisis se consigue reducir notablemente el contenido de humedad en las dieciséis especies debido a las altas temperaturas que facilitan la salida del agua libre y el agua atada. Se observa que el tiempo de pirólisis no influye en el contenido de humedad, debido a que la pérdida de agua (deshidratación de la materia) se produce en la primera fase de la pirólisis a los 120°C.

Del mismo modo, la resistencia a compresión (Cuadro 5) también está relacionada directamente con la densidad inicial de la madera. Maderas más densas producen carbón más denso, que a su vez da lugar a una mayor resistencia en el ensayo a compresión paralela a la fibra.

Uno de los aspectos clave que determina la calidad del carbón suele ser el contenido de ceniza (Cuadro 5). Un alto contenido de cenizas está relacionado con un menor poder calorífico y además puede producir la formación de escoria en el reactor, lo que implica más gasto en mantenimiento y, por el contrario, contenidos bajos de cenizas se relacionan con mejores condiciones de combustión [31] [32] [33] [34]. La especie más idónea según este parámetro es *C. lusitanica*. Otro aspecto importante es el contenido en volátiles (Cuadro 5), ya que, según algunos autores, carbones vegetales con un contenido en volátiles bajo resultan beneficioso, ya que producen una combustión más lenta y limpia [35].

Los valores de poder calorífico que se obtienen (Figura 7) de la carbonización para las dieciséis especies (24,30 a 32,10 MJ/kg) son superiores a los resultantes para las mismas especies de rápido crecimiento en Costa Rica en condiciones secas y sin carbonizar [18]. Se consigue, por tanto, duplicar el poder calorífico de estas especies mediante el proceso de carbonización. Este hecho se debe por una parte a la eliminación de los componentes gaseosos y líquidos que dificultan o retrasan la combustión y por otra a la conservación del carbono [36].

El índice de combustibilidad es el indicador preferido para determinar el mejor potencial energético entre las dieciséis especies [22], ya que tiene en cuenta cuatro parámetros muy importantes en las características del carbón vegetal (Poder calorífico, densidad del carbón, porcentaje en contenido de cenizas y contenido de humedad del carbón), siendo *C. lusitanica* la especie que presenta mejores resultados (Figura 8).

En comparación con otros carbones vegetales comerciales, en general el carbón vegetal obtenido de las dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica, se sitúa dentro de los estándares de calidad según la norma DIN EN 1860-2 [23], salvo en el caso de contenido en volátiles (Cuadro 7). Comparando algunos parámetros (contenido de humedad del carbón, contenido de cenizas, material volátil, carbón fijo y poder calorífico) del carbón vegetal comercial de algunas especies (Dakama, Wallaba, Kautaballi, Wallaba, Roble, cáscara de coco y *Eucalyptus saligna*) [19], se observa que en general el carbón vegetal que se obtiene está dentro de los valores de referencia de mercado y catalogado de bueno a excelente por sus características.

6. CONCLUSIONES

La especie *C. lusitanica* resulta ser la especie con mayor potencial energético entre las dieciséis especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales de Costa Rica. Sus elevados valores de poder calorífico y densidad, y sus bajos valores en contenido de cenizas y de humedad, determinan un alto índice de combustibilidad ampliamente superior al del resto de especies. De modo que es necesario evaluar y optimizar los resultados de crecimiento y productividad de las plantaciones de *C. lusitanica* en Costa Rica, con el fin de orientar su gestión a una completa producción energética.

Los resultados obtenidos para las dieciséis especies cumplen los estándares de calidad según la norma DIN EN 1860-2, lo que demuestra que es posible producir carbón vegetal de calidad a partir de las especies estudiadas y que compita por características fisicoquímicas con el carbón existente en el mercado, por lo que debería tomarse en cuenta como una alternativa para la comercialización de los residuos de las especies utilizada en la reforestación comercial en Costa Rica.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kullander, S. (2009). Energy from biomass. *The European Physical Journal Special Topics*, 176(1), 115-125. doi: 10.1140/epjst/e2009-01152-1.
- [2] Velázquez, B. (2017). *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético*. Editorial Universitat Politècnica de València. València: Reverté; Universitat Politècnica de València.
- [3] Chen, W., Peng, J., & Xiaotao, T.Bi. (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.
- [4] Somerville, M., & Jahanshahi, S. (2015). The effect of temperature and compression during pyrolysis on the density of charcoal made from Australian eucalypt wood. *Renewable energy*, 80, 471-478. doi: 10.1016/j.renene.2015.02.013.
- [5] Velázquez, B. (2006). Aprovechamiento de los residuos forestales para uso energético. Valencia: *Editorial UPV*.
- [6] McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource technology*, 83(1), 37-46. doi: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3.
- [7] Vafaenezhad, H., Zebarjad, S. M., & Khaki, J. V. (2013). Intelligent modeling using fuzzy rule-based technique for evaluating wood carbonization process parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(5-8), 1471-1478. doi: 10.1007/s00170-013-4935-8.
- [8] Nisgoski, S., Muñiz, G. I. B., Batista, F. R. R., & Mölleken, R. E. (2014). Influence of carbonization temperature on the anatomical characteristics of *Ocotea porosa* (Nees & Mart. Ex Nees) L. Barroso. *Wood science and technology*, 48(2), 301-309. doi: 10.1007/s00226-013-0602-3.
- [9] Saiz, G., Goodrick, I., Wurster, C. M., Zimmermann, M., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2014). Charcoal re-combustion efficiency in tropical savannas. *Geoderma*, 219, 40-45. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.12.019.
- [10] Valverde, J. C., Arias, D., Campos, R., & Guevara, M. (2018). Caracterización física y química del carbón de tres segmentos de fuste y ramas de *Eucalyptus camadulensis*

- proveniente de plantaciones dendroenergéticas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15, 14-22. doi: 10.18845/rfmk.v15i1.3774.
- [11] Murillo, O., Obando, G., Badilla, J., & Sánchez, S. (2001). Perspectivas en las zonas altas de Costa Rica. *Biocenosis*, 15(1-2), 66-71.
- [12] Piotto, D., Montagnini, F., Ugalde, L., & Kanninen, M. (2003). Growth and effects of thinning of mixed and pure plantations with native trees in humid tropical Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 427-439. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00445-0.
- [13] Petit, B., & Montagnini, F. (2004). Growth equations and rotation ages of ten native tree species in mixed and pure plantations in the humid neotropics. *Forest Ecology and Management*, 199(2-3), 243-257. doi: 10.1016/j.foreco.2004.05.039.
- [14] Moya, R. (2004). Wood of *Gmelina arborea* in Costa Rica. *New Forests*, 28(2-3), 299-307. doi: 10.1023/B:NEFO.0000040957.83398.e3.
- [15] Serrano, J. R., & Moya, R. (2011). Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 8(21), 1-12.
- [16] Espinosa, J., & Moya, R., (2013). Aprovechamiento e industrialización de dos plantaciones de *Gmelina arborea* de 15 años de edad en diferentes condiciones de pendiente. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y Ambiente*. 19(2), 237-248. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.09.067.
- [17] Moya, R., Muñoz, F., Salas, C., Berrocal, A., Leandro, L., & Esquivel, E. (2010). Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 7(18-19), pág. 1-208. Recuperado a partir de <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/383>.
- [18] Tenorio, C., Moya, R. 2013. Características de combustibilidad de 10 especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* K, 26-33.
- [19] FAO. (1983). Métodos simples para producir carbón vegetal. *ESTUDIO FAO MONTES*, 41. Roma, Italia. Recuperado de <http://normasapa.net/2017-edicion-6/>.

- [20] ASTM International. *ASTM D1762-84 Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal*. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2013. doi: doi.org/10.1520/Dc1762-84R13.
- [21] ASTM International. *ASTM D5865-13 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*. West Conshohocken, PA; ASTM International, 2013. doi: doi.org/10.1520/D5865-13.
- [22] 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.
- [23] EN. 2005. EN 1860-2. Appliances, solid fuels and firelighters for barbecuing - Part 2: Barbecue charcoal and barbecue charcoal briquettes- Requirements and test methods. The British Standards Institution European Norm. London, UK. 27 p.
- [24] Carmona, R.J., (2015): *Caracterización física, química y energética de biomasa leñosa como materia prima biocombustible*. Tesis doctoral. Universidad de Cordoba. Cordoba, España, 102 pp.
- [25] Ordóñez, J. A. B., Galicia, A., Venegas, N. J., Hernández, T., Ordóñez, M. D. J., & Dávalos, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y bosques*, 21, 77-216.
- [26] Schweingruber, F. H. (2007). *Wood structure and environment*. Springer Science & Business Media.
- [27] Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*. 31(2), 171-192. doi: 10.1016/j.pecs.2005.02.002.
- [28] Hill, C.A.S. (2006). *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. London: John Wiley & Sons Ltd. doi: 10.1002/0470021748.
- [29] 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.

- [30] Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Boardman, R. D., & Kremer, T. (2012). Proximate and ultimate compositional changes in corn stover during torrefaction using thermogravimetric analyzer and microwaves. In *2012 Dallas, Texas, July 29-August 1, 2012*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. doi: 10.13031/2013.41777.
- [31] Kumar, R; Pandey, KK; Chandrashekar, N; Mohan, S. 2010. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of Eucalyptushybrid. *Journal of Forestry Research* 21:514-516.
- [32] Kumar, J. I. N., Patel, K., Kumar, R. N., & Bhoi, R. K. (2009). An assessment of Indian fuelwood with regards to properties and environmental impact. *Asian journal on Energy and Environment*, 10(2), 99-107.
- [33] Kataki, R; Konwer, D. (2002). Fuelwood characteristics of indigenous tree species of north-east India. *Biomass and Bioenergy*. 22(6), 433-437. doi: 10.1016/S0961-9534(02)00026-0.
- [34] Jain, R. K., & Singh, B. (1999). Fuelwood characteristics of selected indigenous tree species from central India. *Bioresource Technology*, 68(3), 305-308. doi: 10.1016/S0960-8524(98)00173-4.
- [35] Heya, M. N., Pournavab, F. R., Carrillo-Parra, A., & Colin-Urieta, S. (2014). Bioenergy potential of shrub from native species of northeastern Mexico. *International journal of agricultural policy and research*, 2(12), 475-483. doi: 10.15739/IJAPR.020.
- [36] Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Boardman, R. D. (August of 2011). C. Wright. *A review on biomass torrefaction process and product properties*. Idaho National Laboratory (INL). United States.