

# Caracterización física y química del carbón de tres segmentos de fuste y ramas de *Eucalyptus camadulensis* Dehnh. proveniente de plantaciones dendroenergéticas

Physical and chemical characterization of the carbon of three segments of stem and branches of *Eucalyptus camadulensis* Dehnh. from dendroenergetic plantations

Juan Carlos Valverde<sup>1</sup>  • Dagoberto Arias<sup>1</sup>  • Roel Campos<sup>2</sup>  • Mario Guevara<sup>1</sup>

## Abstract

Charcoal is the product of lignin, cellulose, and hemicellulose decomposition and loss of extractables due to the exposure of wood at high temperatures and low oxygen concentration, generating complete combustion. This process can vary according to the species, tree section and even the carbonization technique used. Therefore, this work evaluated the charcoal obtained from three sections of stem (FB, FM and FS) in addition to the branches (RA) of juvenile trees of *Eucalyptus camadulensis*; the study assessed physical properties (weight loss, radial and tangential contraction) and chemical properties (ash, volatile, moisture content and physical carbon) under a process of carbonization that lasted 6 hours and with a maximum temperature of 600 °C. The results showed weight losses of 59 to 65% at 600 °C, with radial contractions of 22 to 28 % and tangential contractions of 5.6 to 7.6 %, with FB showing the highest values of contraction and loss and RA the minors. With the chemical properties, coal presented ash contents of (4.4 to 7.5) %, volatile (20.9 to 32.1) %, fixed coal of (54.6 to 63.5) % and moisture content of (5.0 to 6.1) % at a density of 0.20 to 0.26 g/cm<sup>3</sup>. These variations implied that cluster analysis provoke FS and RA to show a high closeness, followed by MB and FB which showed the greatest differentiation due to the development degree and structuring presented by the tree in the lower section regarding upper sections.

**Key words:** Charcoal, carbonization, chemical properties, physical properties, dendroenergetic plantation.

1. Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica; [jvalverde@tec.ac.cr](mailto:jvalverde@tec.ac.cr); [darias@tec.ac.cr](mailto:darias@tec.ac.cr); [maguevara@tec.ac.cr](mailto:maguevara@tec.ac.cr)

2. Escuela de Ingeniería en Agronegocios, Tecnológico de Costa Rica; cartago, Costa Rica; [rocampos@tec.ac.cr](mailto:rocampos@tec.ac.cr)

Recibido: 19/03/2018

Aceptado: 10/06/2018

Publicado: 19/09/2018

DOI: 10.18845/rfmk.v15i1.3774

## Resumen

El carbón vegetal es producto de la descomposición de la lignina, celulosa, hemicelulosa y de la pérdida de extraíbles producto de la exposición de la madera a altas temperaturas y baja concentración de oxígeno, generando combustión completa. Este proceso puede variar según la especie, sección del árbol e inclusive de la técnica de carbonización empleada. Por lo que en este trabajo se valoró el carbón obtenido de tres secciones de fuste (FB, FM y FS), además de las ramas (RA) de árboles juveniles de *Eucalyptus camaldulensis*; el estudio valoró propiedades físicas (pérdida de peso, contracción radial y tangencial) y propiedades químicas (cenizas, volátiles, contenido de humedad y carbón físico) bajo un proceso de carbonización que duró 6 horas y con una temperatura máxima de 600 °C. Los resultados mostraron pérdidas del peso del 59 al 65 % a 600 °C, con contracciones radiales de 22 a 28 % y tangenciales de 5,6 a 7,6 %, siendo FB las que mostraron los mayores valores de contracción y pérdida y RA las menores. Con las propiedades químicas, el carbón presentó contenidos de cenizas del (4,4 a 7,5) %, volátiles de (20,9 a 32,1) %, carbón fijo de (54,6 a 63,5) % y contenido de humedad de (5,0 a 6,1) % a una densidad de 0,20 a 0,26 g/cm<sup>3</sup>. Estas variaciones incidieron que los análisis de agrupación generaran que FS y RA mostraran una cercanía elevada, seguida a MB y FB que mostraron la mayor diferenciación debido al grado de desarrollo y estructuración que presentó el árbol en la sección inferior con respecto a las secciones superiores.

Palabras clave: Carbón vegetal, carbonización, propiedades químicas, propiedades físicas, plantaciones dendroenergéticas.

## Introducción

El proceso de carbonización consiste en una combustión directa que se realiza en un espacio a altas temperaturas y baja concentración de oxígeno, generando una transformación de la madera a carbón vegetal (Nisgoski et al., 2014). Durante la carbonización se desarrollan múltiples reacciones químicas que inciden en la estructura y composición del carbón final (Vafaenezhad et al., 2013). La implementación de este producto ha sido múltiple, destacando su uso energético (Strezov, 2006; Saiz et al., 2014), calórico (Antal y Mok, 1992), compostaje (Saiz et al., 2014) y recientemente en las áreas artística (Antal y Gronli, 2003; Strezov, 2006) y alimentaria (Samperio et al., 2015).

La carbonización es un proceso que consta de tres fases principales según mencionan Esteves y Pereira (2009); Rousset et al. (2011); Saiz et al. (2014); Somerville y

Jahanshahi (2015): (i) En la primera fase se da un secado en la madera a 100-130 °C, eliminando el agua libre y atada existente en la madera incidiendo en su contenido de humedad anhidro, además, se producen las mayores contracciones radiales y tangenciales en la madera producto de la reducción del peso. (ii) La segunda fase la madera alcanza temperaturas de 280 °C e inicia espontáneamente a fraccionarse, produciendo carbón, vapor de agua, ácido acético y compuestos químicos de tipo alquitranes y gases no condensables (principalmente hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono), al igual que se genera la degradación de hemicelulosa (170 a 240 °C). (iii) En la última fase comprendida de 290 y 600 °C es conocida como pirólisis y se produce la despolimerización de celulosa (de 240 a 310 °C) y lignina (de 320 a 400 °C) (Kwon et al., 2009; Xiao-jun y Guang-jie, 2009), además de la descomposición y volatilización de extraíbles de alto peso molecular (Kwon et al. 2009) y obteniendo como producto final el carbón vegetal.

El carbón vegetal de especies tropicales obtenido a 600 °C generalmente presenta un carbón fijo del 60 al 85 % (Vafaenezhad et al. 2013; Xiao-jun y Guang-jie, 2009), con una volatilización del 32 al 12 % (Kwon et al., 2009; Nisgoski et al., 2014) y menos del 8 % de cenizas (Saiz et al. 2014). Esta composición es producto de la eliminación de extraíbles y degradación total de la lignina, celulosa y hemicelulosa (Kwon et al., 2009, Vafaenezhad et al., 2013).

Entre los estudios que se han llevado a cabo para examinar las características del proceso de carbonización se destaca el de Nisgoski et al. (2014) que encontró que los intervalos de temperatura de descomposición de cada componente (celulosa, hemicelulosas y lignina) según las distintas velocidades de calentamiento, muestran que conforme la tasa de aumento de temperatura sea mayor, la resistencia a la despolimerización tiende a aumentar. Kotilainen et al. (2000) propuso nuevas técnicas de observación para el estudio anatómico de la madera con craqueado por carbonización; Kwon et al. (2009) investigaron las características morfológicas del carbón de *Quercus variabilis* de madera preparada de 400 a 1000 °C y Kurosaki et al. (2003) investigó la estructura química de la microestructura y la superficie de un residuo de carbono preparado por calentamiento lento a 700 y 800°C. Ante tal panorama en este experimento se planteó como objetivo caracterizar las propiedades químicas y físicas del carbón vegetal obtenido de distintos segmentos del fuste de *E. camaldulensis* procedente de plantaciones dendroenergéticas.

## Materiales y métodos

### Especie y sitio de estudio

Se analizaron cuatro árboles juveniles de *Eucalyptus camaldulensis* de 18 meses de edad, sembrados a una densidad de 10 000 árboles/ha; la plantación se localizó en Cartago, Costa Rica (9°50'57.91"N; 83°54'37.27"O) a una altitud de 1392 m, con temperatura media anual de 24 °C y precipitación anual de 2100 mm dispuesta en 7 meses lluviosos (IMN, 2015).

Los árboles seleccionados se caracterizaron por tener un rango de diámetro a 1,3 m sobre suelo de (19,6±6,9) mm con una altura total promedio de (372,2±38,1) cm, en cuanto a la posición sociológica del árbol dentro la plantación, esta se clasificó como suprimida (Synnott, 1991) debido a las limitaciones de crecimiento por la competencia de copas de los árboles, esta selección consideró las pruebas previas sobre la mayor cantidad de ramas.

### Segmentación del fuste y estandarización del material

Cada árbol seleccionado se cosechó y se segmentó en cuatro secciones (figura 1a): fuste bajo (FB), fuste medio (FM), fuste superior (FS) y ramas (RA), la partición se desarrolló con el principio de división proporcional de tercios para obtener longitudes de fuste homogéneos; en el caso de las ramas se implementó únicamente las ramas primarias, eliminando ramas secundarias y ramas muertas.

De cada segmento se cortaron piezas de 120 mm de longitud, eliminando las piezas con diámetros inferiores a 30 mm, cada pieza se codificó, pesó y midió el diámetro del lado menor de la pieza y se colocó en un horno a 105 °C por un periodo de 48 horas esto con el fin de eliminar el agua libre y homogeneizar el contenido de humedad de las piezas entre un 14 a 18 %, seguidamente se les evaluó el peso y se midió el diámetro menor con la finalidad de tener la pérdida de masa y contracción previa al proceso de carbonización.

### Proceso de carbonización implementado

Posterior a las 48 horas de secado de las probetas se procedió con la carbonización (figura 1b) mediante un horno marca Vulcan®, modelo 3-550; el proceso duró 420 minutos y constó de tres fases: (i) fase de aumento de temperatura de 120 a 240 °C con una tasa de aumento térmica de 1,0 °C/min por 120 minutos, (ii) fase de estabilización en 240 °C por 60 minutos y (iii) fase de aumento de temperatura de 240 a 600 °C por 240 min a una razón de aumento térmico de 1,5 °C/min. Posterior al proceso de carbonización, las piezas se dejaron dentro del horno por 400 minutos hasta que alcanzaran una temperatura ambiente, esto con el fin de evitar defectos de calidad por choque térmico.

Pruebas físicas: Se implementaron las prueba de densidad (p), contenido de humedad (CH) y contracción tangencial y radial (CT y CR respectivamente), en el Cuadro 1. se especifica el cálculo y la metodología

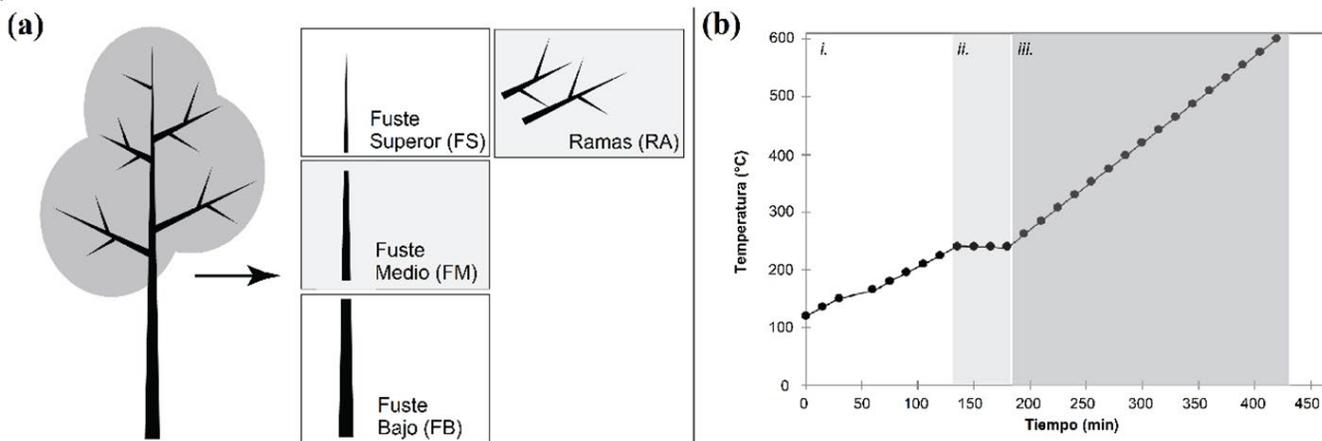


Figura 1. (a) Segmentación del fuste de los árboles de *E. camaldulensis* en los segmentos fuste bajo (FB), fuste medio (FM), fuste superior (FS) y Ramas (RA); (b) programa de carbonización implementado a las probetas de *E. camaldulensis*.

Figure 1. (a) Segmentation of the stem of *E. camaldulensis* trees in the segments of low stem (FB), middle stem (FM), upper stem (FS) and branches (RA); (b) carbonization program implemented to *E. camaldulensis* specimens.

**Cuadro 1.** Pruebas físicas realizadas a los cuatro grupos de probetas de *E. camaldulensis*.

**Table 1.** Physical tests performed on the four groups of test probes of *E. camaldulensis*.

Prueba	Cálculo	Método
Densidad	$\rho = \left( \frac{\text{peso (g)}}{\text{volúmen (cm}^3\text{)}} \right)$	Uso método de Arquímedes (Se usó agua como fluido asumiendo una densidad de 1 g/cm <sup>3</sup> ).
Contenido de Humedad	$MH (\%) = \left( \frac{P_{120^\circ\text{C}} - P_b}{P_{120^\circ\text{C}}} \right) * 100$	ASTM D1762–84 (ASTM, 2003), con el peso a 120°C (P120°C) y el peso a cada temperatura predefinida (Pb).
Contracción Tangencial/ Radial	$C (\%) = \left( \frac{d_{120^\circ\text{C}} - d_b}{d_{120^\circ\text{C}}} \right) * 100$	ASTM D143–94 (ASTM, 2007a), con la dimensión a 120°C (d120°C) y la dimensión a cada temperatura predefinida (db).

aplicada a cada variable. Para cada variable se utilizaron 36 probetas de madera provenientes de los cuatro árboles. Estas pruebas se aplicaron a cada probeta tanto en la fase inicial del material como el material carbonizado.

Pruebas químicas: Se implementaron las pruebas químicas de contenido de cenizas (AC), y contenido de volátiles (VC) y carbón fijo (FC) bajo la norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2007b) y ASTM D3172-13 (ASTM, 2015). Para el cálculo de contenido de cenizas se implementó la ecuación 2:

$$AC (\%) = (D/B) \cdot 100 \quad (2)$$

Donde: *D* es gramos de residuos antes de la prueba y *B* es gramos de la pieza después de 48 horas a 105°C. Con el contenido de volátiles se implementó la ecuación 3:

$$VC (\%) = ([B-C]/B) \cdot 100 \quad (3)$$

Donde: *B* es gramos de la pieza después de 48 horas a 105°C y *C* es gramos de la muestra a 950°C. Finalmente con carbón fijo se implementó la ecuación 4:

$$CF = 100 - (MC + VC + AC) \quad (4)$$

Donde *CF* es carbón fijo (%), *MC* es contenido de humedad (%), *VC* es porcentaje de volátiles y *AC* es contenido de cenizas.

### Diseño experimental y análisis estadístico implementado

El experimento se montó bajo un diseño experimental simple aleatorio en el que se evaluó si existían diferencias significativas entre las secciones del fuste con cada

parámetro evaluado; el análisis de los datos se realizó mediante un análisis de varianza de una vía (ANDEVA de una vía) y en los análisis que mostraron diferencias significativas, se aplicó la prueba de Tuckey con una significancia de 0,05. También se desarrolló un análisis de agrupación (general CHAID) con todos los valores obtenidos de las piezas de madera y carbón con el fin de definir el grado de relación entre agrupaciones.

Todos estos análisis se realizaron con en el programa STATISTICA 9.0 y se validaron los supuestos de la ANDEVA.

## Resultados

### Variación de las propiedades del carbón obtenido por cada sección del árbol

En la figura 2 se presenta la pérdida de peso (PP), contracción radial (CR) y tangencial (CT) de las probetas de las cuatro secciones de *E. camaldulensis*. El comportamiento de las tres posiciones en el árbol es similar, siendo que conforme la temperatura de carbonización aumentó PP, CR y CT aumentaron hasta los 320 °C, punto en que se estabilizaron los parámetros hasta el final de la prueba. Con la PP (figura 2a) varió de 59 a 65 % obteniendo que FB mostró las mayores pérdidas de peso, mientras FM, FS y RA no variaron entre sí. Además, se determinó que a los 220 °C, no había diferencia de PP de las cuatro secciones, variando entre 40 a 49 %, esto a partir de los 220 °C en que FB mostró un aumento de pérdida en comparación con el resto de las secciones.

La CR (figura 2b) varió del 22 al 28 % al final de la prueba, obteniendo nuevamente que la sección FB posterior a los 220°C obtuvo contracciones significativamente

mayores (26,6 % a 600 °C) con respecto a las otras tres secciones que en todo el proceso de carbonización no mostraron diferencias entre sí. Finalmente con CT (figura 2c) las contracciones a 600 °C oscilaron de 5,6 al 7,6 %, mostrando que entre 120 y 400 °C las secciones no mostraron diferencias en contracción tangencial y posterior a los 420 °C que RA presentó contracciones significativamente menores (6,1 % en promedio) en comparación a las tres secciones restantes que entre si no mostraron diferencias significativas.

### Caracterización física y química de la madera y carbón

Las propiedades físicas y químicas de los cuatro segmentos del fuste mostraron diferencias en sus parámetros tanto en madera como carbón (cuadro 2), es importante destacar que los resultados mostraron en la madera un comportamiento donde la sección FB presentó mayores valores en las características evaluadas (exceptuando el carbón fijo) y la sección RA mostró los valores significativamente menores (excepto nuevamente carbón fijo). En cambio, en las muestras carbonizadas, la diferenciación de resultados se centró en RA que presentó en la mayoría de los análisis, valores mayores al resto de secciones. Con la densidad, en la madera esta variable varió de 0,52 a 0,72 g/cm<sup>3</sup> y el material carbonizado disminuyó de 0,20 a 0,26 g/cm<sup>3</sup>. El contenido de humedad en madera osciló de 12,0 a 18,2 % mostrando una disminución y homogeneidad en material carbonizado de 5,0 a 6,1 %. Con el análisis de ceniza no se encontraron, como era esperado, diferenciaciones entre madera y carbón presentando variaciones de 4,4 a 7,2 %, mostrando la sección FB los mayores valores de ceniza y FS y RA los valores significativamente menores. En volátiles se dio una disminución porcentual de madera (30,5 a 42,5 %) a carbón (20,9 a 32,1 %) mostrando dos agrupaciones de los segmentos conformadas por LM y FM en el primer grupo y FS y RA en el segundo. Finalmente, los valores de carbón fijo aumentaron en carbón (54,6 a 63,5 %) con respecto a la madera (32,2 a 52,8 %).

### Agrupación de similitud del carbón

La agrupación obtenida (figura 3) mostró una primera agrupación conformada por FS y RA que mostraron una similitud de 0,20, posteriormente la agrupación "a" se reagrupó con FM con un valor de 0,71 y finalmente FB se agrupó con "b" con un valor de 1,93. Al analizar las variables que influyeron significativamente en la agrupación, se encontró que fueron las concentraciones de ceniza, volátiles, carbón fijo y contenido de humedad.

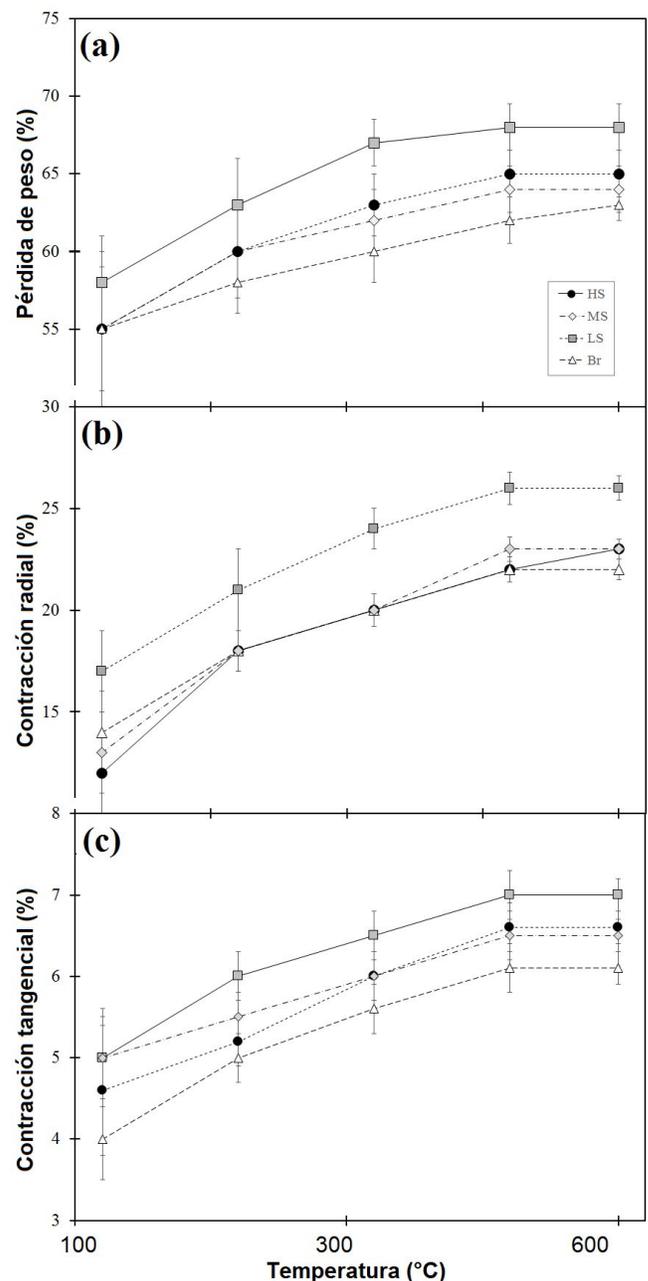


Figura 2. Pérdida de peso, contracción radial y tangencial de las tres secciones del fuste y ramas de *E. camaldulensis* implementadas para proceso de carbonización.

Figure 2. Weight loss, radial and tangential contraction of three sections of stem and branches of *E. camaldulensis* implemented for a carbonization process.

## Discusión

### Variaciones en las secciones del fuste y ramas por efecto del proceso de carbonización

Las diferenciaciones en pérdida de peso y estabilidad dimensional (figura 2) de las secciones de fuste, son

**Cuadro 2.** Propiedades físicas y químicas determinadas en tres secciones del fuste y en ramas de *E. camaldulensis*, tanto en muestras de la madera como carbón.

**Table 2.** Physical and chemical properties determined in three sections of the stem and branches of *E. camaldulensis* in both wood and charcoal.

Parámetro	Sección			
	FB	FM	BS	RA
<b>Madera</b>				
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,75 a (0,05)	0,72 a (0,06)	0,62 b (0,06)	0,50 c (0,05)
CH (%)	18,2 a (2,2)	15,0 a (2,6)	15,3 a (2,0)	12,0 b (1,9)
Cenizas (%)	7,1a (0,9)	5,0 b (0,8)	5,1 b (0,9)	4,7 b (0,8)
Volátiles (%)	42,5 a (1,2)	42,0 a (1,4)	35,6 b (1,6)	30,5 c (1,1)
Carbón fijo (%)	32,2 c (1,8)	38,0 b (2,0)	44,3 b (1,9)	52,8 a (1,5)
<b>Carbón</b>				
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,26 a (0,10)	0,22 a (0,04)	0,18 b (0,04)	0,15 b (0,05)
CH (%)	6,1 a (0,9)	5,8 a (0,7)	5,5 a (0,8)	5,0 a (0,8)
Cenizas (%)	7,2 a (0,4)	5,5 b (0,7)	4,9 c (0,6)	4,4 c (0,6)
Volátiles (%)	32,1 a (1,0)	32,2 a (1,2)	21,1 b (1,4)	20,9 b (1,3)
Carbón fijo (%)	54,6 c (1,5)	56,5 b (1,8)	68,5 a (1,5)	69,7 a (1,6)

Nota: letras diferentes muestran diferencias entre tratamientos con una significancia del 95%.

Note: different letters show differences between treatments with a significance of 95%.

similares a las encontradas por [Kwon et al. \(2009\)](#) con *Quercus variabilis* que reportaron pérdidas de peso a 550 °C del 72,6 %, con contracciones radiales superiores al 26 % y tangenciales del 7 %. Por su parte [Elyounssi et al. \(2012\)](#) con *Eucaliptus deglupta* obtuvieron a 600 °C pérdida de peso del 65,5 % al 72,9 %; estos estudios mostraron en común que en los primeros 250 °C se presenta un 40 % de la pérdida de peso total, debido a la salida de humedad de la madera (agua libre y agua atada) en conjunto a la degradación de la hemicelulosa que produce tres procesos químicos: (i) Desacetilación que consiste en la generación de grupos acetilo, (ii) Despolimerización que consiste en formación de compuesto de menor peso molecular, además de radicales libres y (iii) Deshidratación que es la pérdida de los enlaces de agua ([Kwon et al. 2009](#)).

La pérdida restante de peso y contracciones posteriores que se dan a los 250 °C se debe a que la celulosa se degrada y genera cristalizaciones ([Kwon et al. 2009](#)), la lignina inicia la generación de radicales libres y pérdida de peso molecular, generando estructuras simples como son los radicales carboxilos ([Hill, 2006](#); [Kwon et al. 2009](#)), y los volátiles se oxidan, volatizan o producen radicales de pesos bajos ([Alén et al. 2002](#)), generando en conjunto una degradación de las propiedades químicas del material y aumentando el porcentaje de carbono en relación a otros elementos presentes en la madera ([Hill, 2006](#)). Macroscópicamente estos fenómenos se muestran con la reducción del diámetro de vasos ([Boonstra y Tjeerdsma, 2006](#)), contracciones masivas

en el parénquima y generación de rupturas que inciden en la pérdida de tamaño de las piezas y formación de grietas y defectos en la superficie.

Al analizar el motivo por el cual la sección inferior del fuste mostró las mayores diferenciaciones con respecto al resto del árbol, [Schweingruber \(2007\)](#) encontró diferencias en los porcentajes de celulosa y lignina presentes en el fuste, encontrando valores significativamente mayores en las secciones inferiores en comparación a la parte superior y ramas; además, [Tyree y Zimmermann \(2002\)](#) demostraron que el grado de desarrollo y función fisiológica de las distintas secciones del fuste afectan la madera, encontrando un desarrollo del xilema mayor en las secciones inferiores en comparación a la parte superior y ramas debido a que la parte alta cuenta con una diferenciación de xilema y floema menor debido a su juventud y las estructuras que están en crecimiento, se producen diferenciaciones y contenidos de humedad mayores en comparación a las partes bajas que ya tienen una diferenciación avanzada.

### Variación y agrupación de las variables físicas y químicas

Los resultados químicos obtenidos en el carbón (cuadro 2) son similares a los presentados por [Somerville y Jahanshahi \(2015\)](#) con *Eucaliptus pilularis*, con valores de contenidos de humedad inferiores al 7 %, cenizas menores al 8 %, volátiles del 70 % y carbón fijo inferior al 22 %. Por su parte [Trompowsky et al. \(2005\)](#) obtuvieron

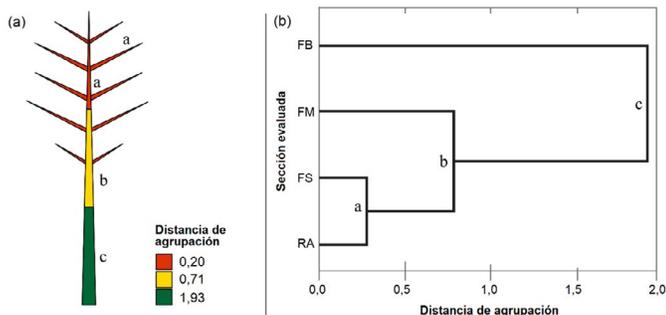


Figura 3. Resultados de la agrupación de las variables físicas y químicas evaluadas en las tres secciones del fuste y ramas de *E. camaldulensis*.

Figure 3. Results of cluster test of physical and chemical variables evaluated in the three sections of the stem and branches of *E. camaldulensis*.

valores de contenido de humedad inferiores a 7,2 % para *E. saligna* y 6,9 % en *E. grandis*, además valores de cenizas de *E. saligna* y 6,9 % en *E. grandis*.

Las diferenciaciones entre las muestras de madera y carbón en los valores de la densidad y propiedades químicas se deben a los cambios de la estructura de la pared celular que químicamente es más homogénea en la carbonización por la degradación de la lignina, celulosa y hemicelulosa (Hill, 2006); además de que en el carbón, las fuerzas de presión y temperatura generan compactaciones en las paredes celulares incidiendo que la densidad baje y se tenga menor pérdida de volátiles en comparación a la madera. En el proceso de carbonización entre los 280 y 390 °C varios volátiles de tipo ceras sufren procesos de volatilización de compuestos, generando que los compuestos remanentes cambien su composición para ser más estables y soportar mayores temperaturas (Schweingruber, 2007). A su vez el carbón fijo aumenta debido a que el carbón ha eliminado gran cantidad de grupos -OH y -COOH incidiendo en porcentajes mayores al 80 % en la composición del material (Hill, 2006; Kwon et al. 2009).

Con respecto a la clasificación de los segmentos del fuste, las diferenciaciones entre la sección inferior con respecto a la sección media, superior y ramas se debe al estado de desarrollo estructural y fisiológico de las secciones, Schweingruber (2007) menciona que las secciones de los árboles pueden presentar variaciones de hasta un 28 % de lignina (que incide directamente en las cenizas) y de un 20 % de celulosa, esto debido a que el xilema de mayor edad se encuentra más desarrollado y diferenciado del floema a diferencia de secciones superiores que aún están en fases de crecimiento primario, en las cuales la diferenciación no es total (Kwon et al., 2009), además las secciones inferiores

presentan acumulaciones mayores de extraíbles, debido a la formación del duramen incidiendo que los valores de volátiles sean mayores y a su vez que el carbón fijo sea menor (Hill, 2006), pero comprendido en el rango definido por Esteves et al. (2007) para árboles de eucalipto, que es en el rango de 50 a 75 %.

## Conclusiones

Se obtuvo una diferenciación en los resultados de las pruebas realizadas en los tres segmentos de fuste y ramas de *E. camaldulensis*; obteniendo reducciones en el peso de las muestras del 59 a 65 %, con contracciones radiales del 22 al 28 % y tangenciales del 5,6 al 7,6 %; siendo la sección FB la que mostró los mayores valores de contracción y pérdida, en comparación con RA que presentó los valores menores. Con las propiedades químicas en carbón, se presentó valores de cenizas de (4,4 a 7,5) %, volátiles de (20,9 a 32,1) %, carbón fijo de (54,6 a 63,5) % y contenido de humedad de (5,0 a 6,1) % a una densidad de 0,20 a 0,26 g/cm<sup>3</sup>.

Las variaciones incidieron que los análisis de agrupación generaran que FS y RA mostraran una cercanía elevada, seguida a MB y FB que mostraron la mayor diferenciación debido a la diferenciación de desarrollo fisiológico de las partes del árbol en las inferiores con un xilema y estructura definida que permite porcentajes de lignina mayores que inciden en los valores de ceniza mayores y menores de carbón fijo.

El conocimiento de estas variaciones son de importancia para la optimización de la producción de subproductos a partir de la madera y permite clasificar de previo el material para diferentes usos del carbón. Nuevos estudios sobre usos del carbón son necesarios para implementar el concepto de bioeconomía dentro del sector forestal.

## Agradecimientos

Agradecemos a Maestría de gestión de Recursos Naturales, la Dirección de Posgrados y la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Tecnológico de Costa Rica, al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) por todo el apoyo logístico, técnico y financiero brindado durante la ejecución del presente estudio que formó parte del proyecto "Impulso tecnológico para la producción, transformación y uso de la biomasa para energía y biomateriales a partir de los residuos lignocelulósicos" (Contrato FI084-13). También, se agradece a la Maestría de Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de

la Producción por la asistencia técnica y operativa en el desarrollo de la investigación. Finalmente a la Srta. Sharon López por el apoyo brindado en el desarrollo del experimento y la producción de la publicación.

## Referencias

- Alén, R., Kotilainen, R., Zaman, A. 2002. Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180-225°C. *Wood Science Technology*, 36:163-171.
- Antal, WSL., Mok, MJ. 1992. Uncatalyzed solvolysis of whole biomass hemillulose by hot compressed liquid water. *Ind. Eng Chem Res.* 31 (4): 1154-1161.
- ASTM. 2003. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal (D1762-84). Book of Standards. Section 6.Vol 0.6.01.Pensylvania, US. 224p.
- ASTM. 2005. Standard Test Method for Evaluating Degree of Checking of Exterior Paints (D660-93). Book of Standards. Section 6.Vol 0.6.01.Pensylvania, US. 224p.
- ASTM. 2007a. Standard Test Method for Small Clear Specimens of Timber (D143-94). Book of Standards. Section 6.Vol 0.6.01.Pensylvania, US. 224p.
- ASTM. 2007b. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal (ASTM D1762-84). Book of Standards. Section 6.Vol 0.6.01.Pensylvania, US. 224p.
- ASTM. 2015. Standard Test Method for Proximate Analysis of Coal and Coke (D3172-15). Book of Standards. Section 6.Vol 0.6.01.Pensylvania, US. 224p.
- Boonstra, MJ., Tjeerdsma, BF. 2006. Chemical analysis of heat treated softwoods. *Holz Roh Werkst.* 64 (3), 204-211.DOI: 10.1007/s00107-005-0078-4
- Elyounssi, K., Collard, FX., Mateke, JN., Blin, J. 2012. Improvement of charcoal yield by two-step pyrolysis on eucalyptus wood: A thermogravimetric study. *Fuel* 96: 161-167. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.01.030.
- Esteves, RM., Velez Marques, A., Domingos, I., Pereira, H. 2007. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science Technology*. 41:193-207, DOI:10.1007/s00226-006-0099-0.
- Esteves, BM., Pereira, HM. 2009. Wood modification by heat treatment: a review. *Bioresources*, 4(1): 370-404.
- Hill, CAS. 2006. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*, John Wiley & Sons Ltd., London. DOI: 10.1002/0470021748
- IMN(Instituto Meteorológico Nacional). (1 de Junio de 2015). Instituto Meteorológico Nacional. Obtenido de [www.imn.ac.cr](http://www.imn.ac.cr)
- Kotilainen RA, Toivanen T-J, Alen RJ (2000) FTIR monitoring of chemical changes in softwood during heating. *J Wood Chem Technol* 20(3):307-320.
- Kurosaki F, Ishimaru K, Hata T, RAonsveld P, Kobayashi E, Imamura Y (2003) Microstructure of wood charcoal prepared by ash heating. *Carbon* 41:3057-3062
- Kwon, SM., Kim, NH., Cha, DS. 2009. An investigation on the transition characteristics of the wood cell wall during carbonization. *Wood Sci Technol*, 43:487-498, DOI: 10.1007/s00226-009-0245-6
- Nisgoski, S., Bolzon de Munñiz, Gl., Rodrigues Ribeiro Batista, F., Mölleken, RE. 2014. Influence of carbonization temperature on the anatomical characteristics of *Ocotea porosa* (Nees & Mart. Ex Nees) L. Barroso. *Wood Sci Technol*, 48:301-309, DOI: 10.1007/s00226-013-0602-3
- Rousset, P., Caldeira-Pires, A., Sablowski, A., Rodrigues, T. 2011. LCA of eucalyptus wood charcoal RAiquettes. *Journal of Cleaner Production* 19: 1647-1653, DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.05.015
- Samperio, A., Moñino, MJ., Vivas, A., Blanco-Cipollone, F., García Martín, F., Prieto, MH. 2015. Effect of deficit irrigation during stage II and post-harvest on tree water status, vegetative growth, yield and economic assessment in 'Angeleno' Japanese plum. *Agricultural Water Management* 158: 69-81, DOI: 10.1016/j.agwat.2015.04.008
- Saiz, G., Goodrick, I., Wurster, CM., Zimmermann, M., NeFBon, PN., Bird, MI. 2014. Charcoal re-combustion efficiency in tropical savannas. *Geoderma* 219-220:40-45. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.12.01
- Schweingruber, FH. 2007. *Wood structure and Environment*. Springer. 279p.
- 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
- Strezov, V. 2006. Iron ore reduction using sawdust: experimental analysis and kinetic modelling. *Renewable energy* 31 (12): 1892-1905.
- Synnott, T.J. 1991. *Manual de Procedimiento de Parcelas Permanentes para Bosque Húmedo*
- Tropical, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Serie de Apoyo Académico N°12. 1-103p.
- Trompowsky, PM., Benites, VM., Madari, BE., Pimenta, AS., Hockaday, WC., Hatcher, PG. 2005 Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of eucalyptus charcoal. *Organic Geochemistry*, v.36, p.1480-1489.
- Tyree, MT., Zimmermann, MH. 2002. *Xylem structure and the ascent of sap*. 2nd edn. Springer, Berlin, 283 p.
- Utkhao, W., Yingjajaval, S. 2015. Changes in leaf gas exchange and biomass of *Eucalyptus camaldulensis* in response to increasing drought stress induced by polyethylene glycol. *Trees*, 29(5): 1581-1592. DOI: 10.1007/s00468-015-1240-1
- Vafaeenezhad, H., Zebarjad, SM., Vahdati Khaki, J. 2013. Intelligent modeling using fuzzy rule-based technique for evaluating wood carbonization process parameters. *Int J Adv Manuf Technol*, 68:1471-1478, DOI: 10.1007/s00170-013-4935-8
- Xiao-jun, MA., Guang-jie, Z. 2009. Effects of carbonization temperatures on microstructure of carbon fiber precursors prepared from liquefied wood. *Forestry Studies in China*, 11(4):238-242.

**Este artículo debe citarse como:**

Valverde, JC; Arias, D; Campos, R; Guevara, M. (2018). Caracterización física y química del carbón de tres segmentos de fuste y ramas de *Eucalyptus camadulensis* Dehnh. proveniente de plantaciones dendroenergéticas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15 (Suppl. 01), 16-24. doi. 10.18845/rfmk.v15i1.3774