

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA INGENIERÍA FORESTAL

**PRODUCCIÓN DE CARBÓN VEGETAL A PARTIR DE
RESIDUOS DE *Tectona grandis* L.f, MANUFACTURADO
POR ECOBOSQUES, SAN JOAQUÍN DE CUTRIS, SAN
CARLOS, ALAJUELA, COSTA RICA**

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

NADYA SOFÍA BERROCAL MÉNDEZ

CARTAGO, COSTA RICA, 2019

TEC | Tecnológico
de Costa Rica



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA INGENIERÍA FORESTAL

**PRODUCCIÓN DE CARBÓN VEGETAL A PARTIR DE
RESIDUOS DE *Tectona grandis* L.f, MANUFACTURADO
POR ECOBOSQUES, SAN JOAQUÍN DE CUTRIS, SAN
CARLOS, ALAJUELA, COSTA RICA**

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

NADYA SOFÍA BERROCAL MÉNDEZ

CARTAGO, COSTA RICA, 2019

**Producción de carbón vegetal a partir de residuos de *Tectona grandis* L.f.,
manufacturado por Ecobosques, San Joaquín de Cutris, San Carlos,
Alajuela, Costa Rica**

Nadya Berrocal Méndez¹

RESUMEN

El objetivo del este estudio fue investigar el proceso de producción del carbón producido de residuos de *Tectona grandis* L.f., con el método de fosa de tierra, y determinar sus propiedades físicas, energéticas, mecánicas y químicas. Para producir el carbón se utilizaron 3 tratamientos, definidos por el tipo de materia prima, aserrada-húmeda (AH), troza-húmeda (TH) y troza-seca (TS). Adicionalmente se comparó con dos carbones comerciales. El mayor rendimiento se obtuvo con TS (24%), el tiempo de carbonización promedio fue de 4,32 días, el consumo de leña en promedio fue del 1,06% respecto la carga inicial, los gases recolectados registraron una concentración de 0,13 g/ml de materia sólida. El costo de inversión de la carbonera fue de ₡ 64 475 y el costo de producción fue de ₡ 668 252 (₡ 203/kg). La producción total anual estimada fue de 6 302 kg de carbón para percibir un ingreso bruto de ₡ 4 203 434, considerando el rendimiento más bajo (13%) y residuos disponibles. En la evaluación de la calidad del carbón, se encontró que el contenido de humedad varió entre 4,16-6,13%, la densidad entre 0,27-0,47 g/cm³, el poder calórico entre 31 294-32 649 kJ/kg, las cenizas entre 1,51-3,33 %, el contenido de volátiles entre 9,4-18,69 % y el carbono fijo entre 73,32-80,05%, el módulo de elasticidad dinámico entre 1,08-2,59 Pa, la fuerza máxima en compresión fue de 88,64-237,60 kg y esfuerzo máximo varió entre 37,71-88,52 kg/cm². En la evaluación de las propiedades química: el análisis elemental mostró la tendencia C>O>H>N>S, macronutrientes N>K>Ca>Mg>P>S y micronutrientes Fe> Cu>Mn >B> Zn. Como conclusión general, el carbón producido por la empresa se encuentran dentro de los parámetros que dictan las normas que regulan su calidad para su comercialización pero, el tratamiento TS superó todos los parámetros de calidad.

Palabras clave: Productividad, costos, propiedades físicas, energéticas, mecánicas y químicas.

Production of charcoal from waste of *Tectona grandis* L.f. manufactured by Ecobosques, Cutris San Joaquín, San Carlos, Alajuela, Costa Rica.

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the production process of coal produced by *Tectona grandis* L.f., waste in the pit of land method for the company Ecobosques, Cutris, Alajuela, Costa Rica and determine their physical, fuel, mechanical and chemical properties. Coal produced three treatments, according to the type of raw material, sawn-wet (SW), log-wet (LW) and log-dry (LD) were established. Additionally it was compared to two other commercial coals.

The highest yield was obtained in LD (24%), the average carbonization time was 4.32 days, and wood consumption on average was 1.06% regarding the initial charge, in gases collected at a concentration of 0.13 g / ml solid matter. Investment costs for the coal were ₡64475 and production ₡668252 (₡203/kg). Annually obtainable 6302 kg coal to receive a gross income of ₡ 4203434 as per lower yield (13%) and available waste. In the quality assessment, it was found that the moisture content goes from 4.16 to 6.13 %, density from 0.27 to 0.47 g/cm³, the caloric power 31294-32649 kJ/kg, the ashes from 1.51 to 3.33%, the volatile content of 9.4 to 18.69% and fixed carbon 73.32 to 80.05%. The dynamic elasticity modulus of 1.08 to 2.59 Pa, maximum compression force of 88.64 to 237.60 kg and maximum stress in the force went from 37.71 to 88.52 Kg/cm². In the assessing of chemical properties: elemental analysis showed the tendency C>O>H>N>S, macronutrients N>K>Ca>Mg>P>S and micronutrients Fe>Cu>Mn>B>Zn. As general conclusion the coal produced by the company is within the parameters that dictate the rules of regulation for their marketing quality, however the LD treatment exceeds all quality parameters.

Keywords: Productivity, costs, physical, fuel, mechanical and chemical properties.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento. No Comercial. Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

¹Berrocal-Méndez, N. 2019. Producción de carbón vegetal a partir de residuos de *Tectona grandis* L.f., manufacturado por Ecobosques, San Joaquín de Cutris, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. (Tesis de Licenciatura) Escuela de Ingeniería de Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 44 p.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por Ph.D. Roger Moya Roque, Eliseo Quintanilla Almagro, M.Sc. Cynthia Salas Garita y Dr. Freddy Muñoz Acosta, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



Roger Moya Roque Ph.D.
Director de tesis



Eliseo Quintanilla Almagro
Presidente EcoBosques



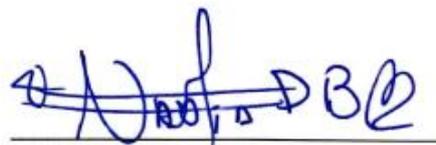
Cynthia Salas Garita M.Sc.
Profesora lectora



Freddy Muñoz Acosta Dr.
Profesor lector



Dorian Carvajal Vanegas M.Sc
Coordinador Trabajos
Finales de Graduación



Nadya Berrocal Méndez
Estudiante

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi hijo Isaac Torres Berrocal.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
CERTIFICACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE CUADROS	viii
Introducción	1
Materiales y métodos	4
1. Área de estudio	4
2. Elaboración del carbón	6
3. Determinación de los parámetros de producción	8
4. Potencial económico anual de los residuos	11
5. Caracterización del carbón de teca y dos carbones comerciales	12
Propiedades físicas	13
Propiedades energéticas	14
Propiedades mecánicas	14
Propiedades químicas	15
6. Análisis de datos	16
Resultados	17
1. Elaboración carbón	17
2. Determinación de los parámetros de producción	18
3. Potencial económico anual de los residuos	23
4. Caracterización del carbón de teca y dos carbones comerciales	23
Propiedades físicas	23
Propiedades energéticas	24
Propiedades mecánicas	26
Propiedades químicas	26
Discusión	29
1. Elaboración del carbón	29
2. Determinación de los parámetros de producción	30
4. Caracterización del carbón de teca y dos carbones comerciales	34

Propiedades físicas	34
Propiedades energéticas.....	34
Propiedades mecánicas	36
Propiedades químicas	36
Conclusiones y recomendaciones	38
Agradecimientos	39
Referencias.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la empresa Ecobosques, en San Joaquín de Cutris, Alajuela, Costa Rica.....	4
Figura 2. Esquema del método de fosas de tierra para producir carbón vegetal, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	5
Figura 3. Fosa de tierra (a) y apilado de la materia prima en la fosa (b), en la empresa Ecobosques para producir el carbón, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	6
Figura 4. Tipo de materia prima (residuos) de la especie <i>Tectona grandis</i> , utilizados para producir el carbón vegetal, tratamiento aserrada-humeda (a), tratamiento troza-humeda (b) y tratamiento troza-seca (c), Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	7
Figura 5. Esquema de recolección de humos utilizado por la empresa Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	10
Figura 6. Flujo de producción del carbón vegetal elaborado en la empresa Ecobosques en el método fosas de tierra, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.....	17
Figura 7. Contenido de humedad y densidad en la materia prima de la especie <i>Tectona grandis</i> , utilizada para producir carbón vegetal en la fosa de tierra, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.....	18
Figura 8. Contenido de humedad y densidad obtenidas en el carbón vegetal producido en la fosa de tierra de la especie <i>Tectona grandis</i> y dos carbones del mercado, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	24
Figura 9. Contenido de ceniza, volátiles y poder calórico obtenido en el carbón producido en fosa de tierra de la especie <i>Tectona grandis</i> y dos carbones comerciales, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.....	25

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Rendimientos obtenidos en la elaboración de carbón de residuos de <i>Tectona grandis</i> , para los 3 tratamientos en el método fosa de tierra, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	19
Cuadro 2. Tiempo determinado en el proceso de carbonización, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	20
Cuadro 3. Consumo de leña obtenido en la elaboración de carbón de residuos de <i>Tectona grandis</i> , para los 3 tratamientos en el método fosa de tierra, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	20
Cuadro 4. Rendimientos alcanzados de materia sólida obtenida de los humos en el proceso de carbonización de la especie <i>Tectona grandis</i> , en el método de fosa de tierra, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	21
Cuadro 5. Costos de inversión para elaborar la fosa de tierra para producir carbón vegetal, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	21
Cuadro 6. Costos de producción del carbón vegetal en una semana, utilizando la fosa de tierra, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	22
Cuadro 7. Propiedades físicas, mecánicas y químicas determinadas en el carbón producido en fosa de tierra de la especie <i>Tectona grandis</i> y dos carbones comerciales, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	27
Cuadro 8. Macro y micro elementos presentes en los diferentes tratamientos de carbón de la especie <i>Tectona grandis</i> , Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.	28
Cuadro 9. Estándares de calidad de acuerdo con las características fisicoquímicas del carbón vegetal para uso doméstico.	34
Cuadro 10. Concentración de macro y micro elementos, presentes en el tronco de la especie <i>Tectona grandis</i> , de 3 a 18 años en Canal de Panamá.	37

Introducción

El carbón vegetal es un sólido, frágil, poroso de color negro, cuya fórmula química es $3C_{16}H_{10}O_2$ [1], su composición química varía entre un 80 y 98% del elemento carbono, mientras que el restante lo compone los elementos hidrógeno y oxígeno [2]. El carbón tiene un amplio uso en actividades domésticas, energéticas y como generación de gas pobre [3], en la industria química, medicinal, alimenticia y agrícola [4], para la purificación del agua, tratamiento de agua residuales, controladores de emisiones de automóviles, limpieza de vertidos, recuperación de aguas superficiales, tratamiento de agua potable y purificación de aire [5]. A nivel mundial se espera que el carbón vegetal tenga un consumo sostenido hasta el 2030, donde el consumo será cerca de 840 000 toneladas por año [6]. Por otra parte, la producción de carbón vegetal representa aproximadamente el 8% de la extracción mundial global de madera [7].

El carbón puede ser mineral, obtenido de la minería o carbón vegetal producido usualmente con material residual de biomasa lignocelulósica, también llamado biochar [8]. Estos dos carbones se diferencian porque en el caso del carbón mineral se produce por la carbonificación de algunos materiales orgánicos presentes en la corteza terrestre, mientras que el carbón vegetal se da por la combustión incompleta de la madera en un ambiente libre de oxígeno y otros residuos. Sin embargo, a pesar de estas dos fuentes, el biochar es importante porque se considera una fuente de combustible renovable y ecológico [3].

El proceso de carbonización del biochar, es producto de la combustión anaeróbica de la madera, es decir una combustión sin oxígeno, en donde la madera es expuesta a altas temperaturas durante un tiempo determinado [1]. El proceso comprende 4 etapas: (I) etapa de secado, temperaturas menores a $100^{\circ}C$, en donde la biomasa se calienta y se libera la humedad superficial, (II) etapa intermedia, la temperatura oscila entre $100^{\circ}C$ y $300^{\circ}C$, ocurre la deshidratación exotérmica de la biomasa con la liberación de agua y de gases de bajo peso molecular como CO y CO_2 , además de la destilación de aceites esenciales [9] y [10], (III) etapa de descomposición, temperaturas entre $200^{\circ}C$ y $600^{\circ}C$, se da la descomposición en las moléculas largas de biomasa del carbón, gases

condensables y gases no condensables [10] y (IV) etapa final, la temperatura varía entre 600°C y 900°C, ocurre el craqueo de volátiles a carbón y a gases no condensables [11].

Existen diferentes métodos de producción del carbón tipo biochar, entre ellos los métodos tradicionales como parva y fosa de tierra, los métodos más tecnificados, como hornos de ladrillo, hornos metálicos transportables [12] y los sistemas mejorados o de retornas de producción [11]. Sin embargo, el método de fosas de tierra, sigue siendo muy utilizado, especialmente en países en vías de desarrollo, ya que la inversión es menor y no requiere de gran conocimiento [11]. Este método consiste en aislar la leña del oxígeno cubriéndola con tierra y vegetación en una semi-excavación pequeña, para luego realizar la pirolisis o carbonizarla [13]. Durante el proceso, los gases calientes, producidos por la quema parcial de la carga de madera, secan lentamente la tierra y calientan el resto de la madera al punto de carbonización, de alrededor de 280°C [14]. A pesar de la facilidad de este método de producción de carbón, se obtienen rendimientos bajos y el carbón puede ser de mala calidad, debido a que el material no se carboniza uniformemente y al extraerlo el carbón se mezcla con la tierra [4].

Entre los indicadores tradicionales de calidad del carbón independientemente del método de producción, se encuentra las características tales como color, olor, sonido, humos, tamaño del carbón y duración en las brasas [15]. Sin embargo la evaluación de la calidad trasciende a parámetros físicos, mecánicos, energéticos y químicos, en donde propiedades como densidad, contenido de humedad, contenido de volátiles, cenizas y poder calórico son los parámetros de calidad más importantes a evaluar [10]. Estos parámetros delimitan la calidad del carbón y permiten establecer las condiciones para comercializar el producto [16].

Las fuentes de variación de la calidad y rendimiento del carbón, pueden ser muchas, como: contenido de humedad de materia prima, densidad del material, temperatura de carbonización, método de carbonización y proceso de carbonización [17]. En este sentido [18] señala factores como: especie, sección del árbol y condiciones de la madera antes de ser carbonizada, como sus dimensiones.

Otros autores [10] mencionan que factores como dimensión de la materia prima y composición química también afectan la calidad y rendimiento del carbón.

Por otra lado, la especie *Tectona grandis* L.f. (teca) es latifoliada, nativa de Birmania, Tailandia y algunos sitios en la India. En Costa Rica es una especie exótica utilizada en la reforestación comercial y es ampliamente comercializada [19], presenta buenos crecimientos en sitios con altitudes menores a 500 msnm, con una estación seca marcada de 4 a 6 meses, entre 23°C y 27°C de temperatura y una precipitación de 1300 a 2500 mm anuales [20]. En lo referente al aprovechamiento de las plantaciones, a pesar que ha existido extensas investigaciones sobre el comportamiento en procesos industriales y sus diferentes propiedades, el conocimiento de los procesos de carbonización o bien la calidad del carbón es poco conocida [21].

Por su parte, Ecobosques S. L., como muchas otras empresas de reforestación comercial en Costa Rica, ha plantado árboles de *T. grandis* en diferentes sitios con la finalidad de producir madera aserrada. Sin embargo, a pesar que la madera aserrada presenta adecuada comercialización, algunas secciones del árbol, presentan problemas para comercializarse, tales como los primeros raleos o bien los residuos de la trozas durante el aserrío, esta problemática la presenta el sector forestal en general, en donde agregar valor y gestionar los residuos es una actividad sumamente importante [22], razón por la cual la empresa busca la opción de convertir sus residuos en carbón vegetal.

Es por ello que el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el proceso de producción del carbón vegetal de la empresa Ecobosques a partir de residuos de *T. grandis*, como parte de este trabajo se evalúa el método de producción en fosa de tierra utilizando residuos de trozas húmedas y secas y residuos de madera aserrada húmeda, así como el potencial económico que presentan los residuos para producir carbón, determinar los costos asociados y analizar las propiedades físicas, mecánicas y químicas del carbón de manera comparativa con otros carbones encontrados en el mercado.

Materiales y métodos

1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la empresa Ecobosques S.A., ubicada en San Joaquín en el distrito de Cutris del cantón de San Carlos (coordenadas WGS 84: 84° 26' 46" longitud Oeste y 10° 41' 03" latitud Norte), provincia de Alajuela, Costa Rica (figura 1). Próximo a este sitio, se encuentran las plantaciones de *T. grandis*, las cuales abarcan aproximadamente un total de 200 hectáreas, establecidas desde el año 2005 al 2007, por lo que se estima que la madera utilizada presenta una edad entre 12 a 14 años. El sitio se ubica en la zona de vida bosque muy húmedo premontano transición a basal, altitud 100 m, el suelo es del orden ultisol, con una precipitación media de 3000 a 4000 mm anuales con 5 meses secos (diciembre a abril) y una temperatura media entre 26 y 28°C [23].

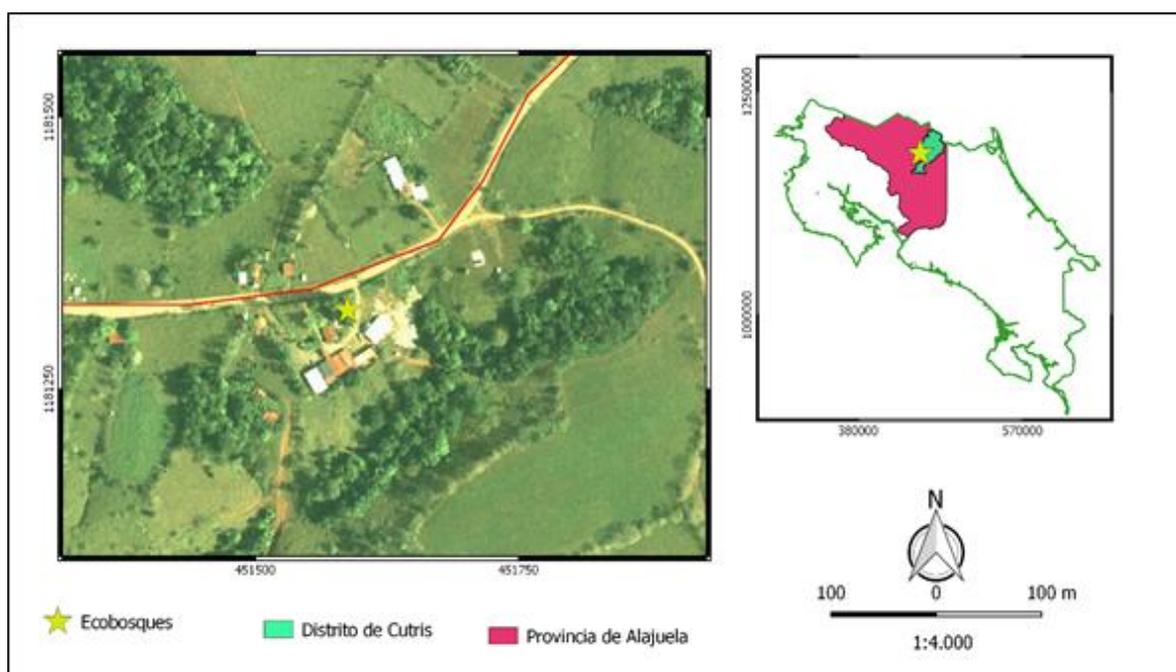


Figura 1. Ubicación de la empresa Ecobosques, en San Joaquín de Cutris, Alajuela, Costa Rica.

Elaboración del flujo de producción

Primeramente se recopiló la información para construir el flujo de producción del carbón, según lo observado en empresa, en la cual se hizo una descripción de

todas las etapas que tiene la empresa para la producción del carbón, desde la obtención de la materia prima hasta la comercialización del carbón.

Método de producción del carbón

El método para producir el carbón fue el que tradicionalmente utiliza la empresa, el cual consistió en el uso de fosas de tierras (figura 2), en donde se apiló la madera y se aisló del oxígeno, la madera se puso bajo la tierra en una semi-excavación, se cubrió con tierra y vegetación y luego pasó al proceso de carbonizarla [13]. Se construyeron 2 fosas, con dimensiones de 5 metros de largo, 1,9 metros de ancho y 2 metros de profundidad (figura 3a). Las fosas se ubicaron cerca del plantel industrial, en donde se identificó un área bien drenada y nivelada, donde se evitó la acumulación de agua y se resguardó el proceso de carbonización.

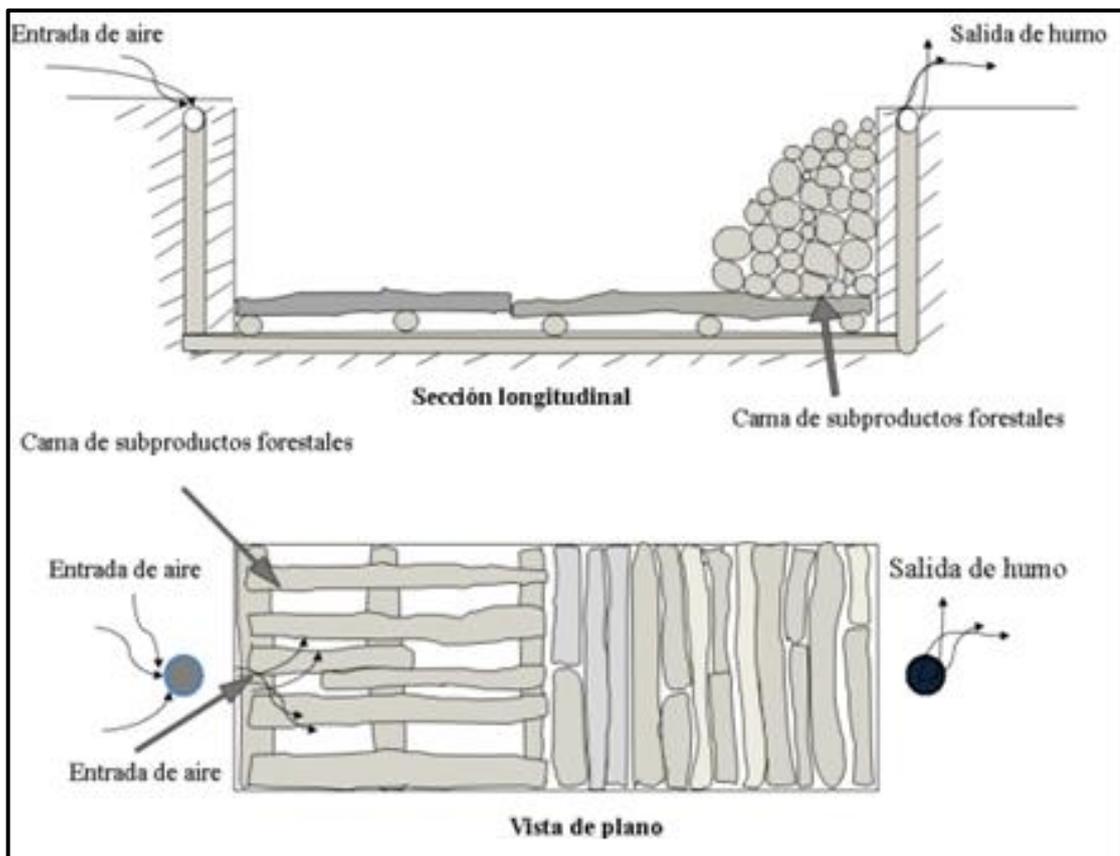


Figura 2. Esquema del método de fosas de tierra para producir carbón vegetal, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos. Tomado de [24] y [25].



Figura 3. Fosa de tierra (a) y apilado de la materia prima en la fosa (b), en la empresa Ecobosques para producir el carbón, San Joaquín, Cutris, San Carlos.

2. Elaboración del carbón

Antes del apilado de la madera, se colocó en la base de la fosa dos varillas de la misma madera de forma horizontal. Esto se hizo con dos fines: (i) que el material a carbonizar no estuviera en contacto directo con el suelo y (ii) que durante la carbonización el aire se moviera por la parte inferior de la pila de madera, hasta una abertura de salida de aire (figura 3a). El material se apiló intentando que no quedaran espacios vacíos, es decir varilla por varilla (Figura 3b). El apilado de la madera se realizó al nivel del piso hasta lo alto de la fosa y luego se puso una capa de pasto y tierra de aproximadamente 15 cm de espesor. Seguidamente se encendió en el lado de mayor profundidad (zona de encendido), para esto se colocó una pequeña cantidad de madera en el agujero de encendido y luego de verificar que se dio la ignición inicial, el agujero de esta zona se tapó con una lata y tierra. La forma para verificar que la fosa estuvo encendida fue esperar por varios minutos hasta que salieran los humos color blanco por la abertura de salida, al otro extremo de la fosa (figura 3a). Para determinar cuando la madera estuvo completamente carbonizada se observó el cambio del color del humo en la chimenea de salida. El

cambio de color blanco a azul claro indicó que ya el material dentro de la fosa se transformó a carbón, para ello se debió espesar, una vez, finalizado este tiempo, se removió la tierra y el pasto y se sacó el carbón.

Tipos de materia prima

La materia prima fue utilizada según su forma geométrica y condición de humedad. Se utilizaron dos tipos de materia prima: residuos de aserradero (cabrería, costillas, despuntes, etc) y de raleos (troza o varillas). En relación con la humedad se utilizaron dos condiciones: materia prima con humedad menor al 16% y materia prima con contenido de humedad mayor al 16%.

Basados en estas dos condiciones de materia prima se establecieron los siguientes tratamientos para el diseño experimental: (a) aserradero-húmeda (AH), correspondiente con residuos proveniente de aserradero que se encontraba con contenidos de humedad mayores al 16%, (b) troza-húmeda (TH); la materia prima correspondió con trozas de raleos no comerciales que contaban con contenido de humedad mayores al 16%, (c) troza-seca (TS), correspondió con residuos provenientes de raleo (trozas) con contenido de humedad menores al 16% (figura 4).



Figura 4. Tipo de materia prima (residuos) de la especie *Tectona grandis*, utilizados para producir el carbón vegetal, tratamiento (a) aserrada-húmeda, tratamiento (b) troza-húmeda y tratamiento (c) troza-seca (c), Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.

Caracterización de la materia prima

La determinación del contenido de humedad (CH) de los residuos se realizó de acuerdo a la norma ASTM D-4442 [26]. Conforme a esta norma se determinó el

peso inicial, luego se sometió la muestra a una temperatura de 103 °C por 24 horas en un horno, para obtener su peso seco y estos valores son utilizados para determinar el CH de la materia prima (ecuación 1). En la determinación de este parámetro fueron tomadas cuatro muestras al azar de cada tipo de tratamiento, al igual que para determinación de la densidad (ecuación 2).

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso seco}}{\text{Peso inicial}} * 100 \quad (1)$$

$$\rho_{madera} = \frac{P_m}{V_m} * \rho_{agua} \quad (2)$$

Donde:

ρ_{madera} =densidad del madera (g/cm³)

ρ_{agua} =densidad del agua, asumiendo es igual 1 g/cm³

P_m = peso madera (g)

V_m = volumen madera (cm³) igual al peso del agua desplazado

3. Determinación de los parámetros de producción

Se determinó los siguientes parámetros de producción: rendimiento del proceso de carbonización, tiempo de carbonización, consumo de materia prima en la fosa, consumo de leña de la fosa, producción de gases (humo) y mano de obra requerida. Finalmente, con esta información se determinó el índice de generación de carbón y el potencial económico anual de los residuos convertidos en carbón para la empresa así como los costos de inversión y producción del carbón.

Rendimiento del proceso de carbonización (%R)

La madera de los diferentes tratamientos fue pesada en una balanza antes y después de la carbonización. Al finalizar el proceso de carbonización, el carbón se tamizó con una malla de tamaño de agujero de 2,5 x 2,5 cm, para obtener carbón grueso y fino. El rendimiento del proceso de carbonización fue determinado para el material grueso, fino y el total, que contempló la suma del carbón fino y grueso. El rendimiento se determinó a través de la relación comparativa entre el peso de la

madera antes de la carbonización y el peso del carbón vegetal resultante del carbonizado, expresando porcentualmente (ecuación 3):

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Peso de carbón (kg)}}{\text{Peso materia prima (Kg)}} * 100 \quad (3)$$

Tiempo de carbonización

Se cronometró el tiempo de carbonización en horas con cronómetro para cada tratamiento y este consistió de la duración en horas entre el tiempo que inició el encendido de la fosa hasta que se abrió la fosa para sacar el carbón.

Consumo de leña de la fosa (%L)

Corresponde a la cantidad materia prima que se necesitó y se consumió en su totalidad para encender la fosa de tierra. En este caso se pesó en la balanza el material utilizado para encender la fosa de cada uno de los tratamientos y luego se expresó esa cantidad porcentualmente con respecto a la totalidad de materia que fue apilada en la fosa.

Producción de gases

Se recolectó los gases (humo) con ayuda de un tubo metálico de 4 metros de largo, colocado en la salida de aire de la fosa, en este se dio la condensación de los gases junto con la humedad resultante de la pirólisis (figura 5). Las sustancias volátiles fueron condensadas en estado líquido y recolectadas en un recipiente y luego fue medido el volumen condensado. La recolección de líquidos se empezó dos horas después de que la fosa se encendió ya que los gases generados en el periodo inicial correspondieron al quemado de la leña para la ignición. De los líquidos condensados fueron tomadas cinco muestras diferentes para determinar en el laboratorio, la materia sólida libre de agua/líquidos (alquitrán). Cada muestra, correspondió a 200 mililitros de los gases condensados, la cual fue pesada y llevada a su estado mínimo de líquidos en el horno a una temperatura de 60°C por 5 días y pesada para obtener la cantidad de sólidos. La producción de sólidos (alquitranes) se calculó, según la ecuación 4. Los materiales sólidos (alquitrán) se calcularon según la ecuación 5.

$$\text{Producción sólidos} \left(\frac{\text{ml}}{\text{kg}} \right) = \frac{\text{liquidos totales recolectados (ml)}}{\text{Carga total de la fosa (kg)}} \quad (4)$$

$$\text{Materia s\u00f3lida} \left(\frac{g}{ml} \right) = \frac{\text{Peso muestra 200 ml seca (g)}}{200 \text{ ml}} \quad (5)$$



Figura 5. Esquema de recolecci\u00f3n de humos utilizado por la empresa Ecobosques, San Joaqu\u00edn, Cutris, San Carlos.

Costos de inversi\u00f3n

Los costos de inversi\u00f3n se definieron a partir de los costos necesarios en la construcci\u00f3n de las dos fosas de tierras. Para esta construcci\u00f3n se utiliz\u00f3 un tractor agr\u00edcola con pala adaptada, donde se consider\u00f3 el tiempo e insumos necesarios requeridos para elaborar cada una de las fosas. Primero se cuantific\u00f3 el tiempo requerido para la apertura de cada una de las fosas, luego se cuantific\u00f3 la cantidad de combustible en litros utilizado por el tractor agr\u00edcola para la construcci\u00f3n de cada fosa, para esto se llen\u00f3 al m\u00e1ximo la capacidad el tanque de combustible y al finalizar la construcci\u00f3n de la fosa se volvi\u00f3 a llenar el tanque de nuevo y as\u00ed se determin\u00f3 la cantidad de combustible utilizado. Adem\u00e1s, se cuantific\u00f3 el n\u00famero de personas que trabajaron y el tiempo en horas cuantificado por actividad dentro de la etapa de elaboraci\u00f3n de cada fosa. Tantos los tiempos como la cantidad de

combustible fueron multiplicados por los precios de mercado de cada rubro con el fin de obtener el costo total.

Costo de producción del carbón

El costo de producción del carbón se determinó multiplicando el rubro de producción consumido por el costo de mercado para cada actividad involucrada, para lo cual se definió los siguientes rubros de producción: apilado de materia prima, descarga de materia prima, encendido de las fosas, cuidado de la fosa, sacada del carbón, tamizado, empaque y almacenamiento del carbón. En todas estas actividades se cuantificó el tiempo en minutos de labor y respecto al cuidado se contempló el tiempo en minutos, según la cantidad de veces que el encargado revisó la fosa de tierra para verificar que esta estuvo trabajando de la forma adecuada es decir que no se apagara ni se quemara.

4. Potencial económico anual de los residuos.

Para determinar el potencial económico fue necesario recolectar información relacionada a la producción de carbón, para ello se requirió el índice de generación de residuos de teca, el cual se obtiene a partir de los kilogramos de residuos producidos por las plantaciones durante un año por parte de la empresa Ecobosques. Esta información fue proporcionada por la empresa ya que esta llevó los registros de los residuos producidos durante varios años atrás. El potencial económico fue evaluado a partir de los siguientes parámetros: producción de carbón por año, precio promedio de venta del carbón y potencial anual de los residuos.

Producción de carbón por año: Mediante el valor de generación del residuo de teca (R), el rendimiento obtenido por la fosa (%R) y el consumo de leña de la fosa de tierra (% L), se estimó la producción de carbón que se puede producir en kilogramos por año (ecuación 6).

$$C = [R * (1 - \% L)] * \%R \quad (6)$$

Donde:

C (Kg) = Producción de carbón en el año en kilogramos

R (Kg) =residuos de la empresa al año en kilogramos

%L=porcentaje de consumo de leña de la fosa

%R=porcentaje de rendimiento de la fosa

El precio promedio de venta del carbón comercial (PV): Se determinó a partir de la suma de todos costos de producción e inversión en relación con la producción del carbón en kg. Para determinar el precio de venta se utilizó el método del margen sobre los costos por lo cual una vez determinado el costo de producir un kilogramo de carbón se le asignó un margen de ganancia.

Potencial anual de los residuos para producir carbón (PA): El potencial anual de los residuos se evaluó considerando la producción de carbón en un año (C) y el precio de venta que se asignó al carbón (PV) (ecuación 7).

$$PA = C(Kg) * PV \left(\frac{\$}{kg} \right) \quad (7)$$

5. Caracterización del carbón de teca y dos carbones comerciales

De cada tratamiento se extrajo una muestra de aproximadamente 15 kg de forma aleatoria y con representatividad de toda la carga de la fosa del carbón producido. De esta cantidad se obtuvo 10 repeticiones por parámetro, según norma ASTM D2234 [27]. Además de caracterizar el carbón producido de cada una de las condiciones de materia prima, fueron evaluados dos tipos de carbón que actualmente se comercializa en el país y que para efectos del presente trabajo fueron llamados carbón "X" y "Y". De estos carbones fueron compradas 4 bolsas de 2 kilogramos en un supermercado en el cantón de San Carlos (Super Santa Rosa de Pocosol). Para los dos carbones comerciales se realizaron también todos los análisis con el objetivo de que sirvan como parámetros en comparación de la calidad, para el carbón producido por la empresa en las pruebas realizadas.

La calidad del carbón se evaluó considerando las siguientes propiedades o parámetros de calidad: propiedades físicas (densidad, humedad y color), propiedades energéticas (contenido de cenizas, materiales volátiles, carbono fijo, poder calórico), propiedades mecánicas (módulo de elasticidad dinámico, fuerza máxima y esfuerzo máximo en compresión en sentido longitudinal del carbón) y las propiedades químicas (contenido de carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H), azufre (S) y oxígeno (O), macro y micro elementos presentes en el carbón.

Propiedades físicas

Contenido de humedad: la evaluación del contenido de humedad se determinó para 10 muestras de cada tipo de carbón. El carbón fue primeramente molido y luego fue tamizado para obtener partículas entre 150 μm y 250 μm (tamices N°60 y N°20, respectivamente) acorde con la norma D2013/D2013M—18 [28]. Se midió el contenido de humedad a cada muestra, esto según lo establecido en la norma ASTM D1762-84 [29].

Densidad del carbón: fueron tomadas 30 muestras de cada tratamiento y éstas fueron pesadas y determinado el volumen por desplazamiento de agua, el cual consistió en sumergir la muestra de carbón en un beaker con agua colocado sobre una balanza. El volumen representa el peso que incrementó el beaker con agua. La fórmula que se utilizó es la siguiente (Ecuación 8):

$$\rho_{\text{carbón}} = \frac{P_c}{V_c} * \rho_{\text{agua}} \quad (8)$$

Donde:

$\rho_{\text{carbón}}$ = densidad del carbón (g/cm^3)

ρ_{agua} = densidad del agua, asumiendo es igual 1 g/cm^3

P_c = peso carbón (g)

V_c = volumen carbón (cm^3) igual al peso del agua desplazado

Color: el color fue medido utilizando el sistema de color L^* , a^* y b^* . Este fue medido en 10 muestras de cada tratamiento, utilizando un espectrofotómetro Mini Scan EX Plus modelo 4500L de HunterLab. El mismo fue calibrado antes de cada uso. Las mediciones se realizaron a temperatura ambiente y para los datos de color se usó el sistema cromatológico estandarizado CIEL*a*b*. El rango de esta medida es de 400 a 700 nm, con una apertura en el punto de medición de 13 mm. Para la observación de la reflexión fue incluido el componente especular (SCI mode), en un ángulo de 10° la cual es lo normal de la superficie del espécimen (D65/10); un campo de visión de 2° (observador estándar) y un estándar de iluminación D65 (correspondiente a luz del día en 6500 K).

Propiedades energéticas

Las propiedades energéticas que se determinaron a 10 muestras de cada tratamiento y de los dos carbones comerciales, las propiedades fueron: contenido de volátiles, el contenido de cenizas, el carbono fijo y el poder calórico. El contenido de volátiles se midió de acuerdo con la norma ASTM D1762-84 [29]. El contenido de cenizas fue determinado con la norma ASTM D1762-84 [29]. El porcentaje de carbono fijo (CF) se determinó según la norma ASTM D-3172 [30] y es el resultado es restarle a 100 la suma del contenido de humedad, ceniza y materia volátil (ecuación 9). El poder calórico fue determinado bajo la norma ASTM D5865-13 [31] y para esto se utilizó la bomba semimicro-colorimétrica marca Parr modelo: 6725.

$$CF (\%) = 100 - (CH + C + MV) \quad (9)$$

Donde:

CF (%) = carbono fijo

CH (%) = contenido de humedad

MV (%) = contenido de materia volátil

C (%) = contenido de cenizas

Propiedades mecánicas

El módulo de elasticidad dinámico, la fuerza máxima y esfuerzo máximo en compresión en sentido longitudinal del carbón fueron determinados para el carbón producido por la empresa utilizando los tratamientos definidos y el carbón comercial. En el caso del módulo de elasticidad dinámico fueron preparadas 10 muestras por cada tratamiento y para el carbón comercial con dimensiones promedio de 2 x 2 x 5 cm (tangencial, radial y longitudinal) escogido aleatoriamente del lote muestreado. Las mediciones ultrasónicas se realizaron en sentido longitudinal, en el cual fue medido el tiempo, en microsegundos (μs), que tarda una onda ultrasónica de pasar de lado a lado en la muestra de carbón. Este tiempo fue medido utilizando un equipo SYLVATEST Duo con transductores de 22 kHz. Luego se calculó la velocidad de onda (ecuación 9) y luego el módulo de elasticidad dinámico (ecuación 10) que representa la capacidad del carbón a resistir deformaciones. La densidad de carbón se calculó con la ecuación 11.

$$V = \frac{L}{T * 10^6} \quad (9)$$

$$MOE_d = V^2 * \frac{\rho}{1000} \quad (10)$$

$$\rho = \frac{\text{Peso en Kg}}{\text{Largo (m)} * \text{espesor (m)} * \text{ancho (m)}} \quad (11)$$

Donde:

L = longitud de la muestra en metros

T = tiempo que tarda la onda del ultrasonido de un extremo a otro en μs

MOE_d = módulo de elasticidad dinámico (Pa)

V = velocidad de ultrasonido (km s^{-1})

ρ = densidad de cada muestra (kg/m^3)

Para la determinación de fuerza máxima y esfuerzo máximo en compresión, se preparó muestras de 2 x 2 x 5 cm (tangencial, radial y longitudinal). Luego estas muestras se ensayaron en una máquina universal de ensayos Tinius Olsen, modelo con una capacidad de 1000 kg. La muestra fue ensayada a una velocidad de 0,3 mm/min. La fuerza máxima representa la carga máxima que la pieza de carbón puede soportar antes de romperse y el esfuerzo máximo fue calculado utilizando la ecuación 12.

$$\text{Esfuerzo máximo} = \frac{\text{Fuerza máxima (kg)}}{\text{Área de la probeta (cm}^2\text{)}} \quad (12)$$

Propiedades químicas

Las propiedades químicas se determinaron en 10 muestras de cada tratamiento y en los dos carbones comerciales y los parámetros determinados fueron: el contenido de carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H), azufre (S) y oxígeno (O) y análisis de los macro elementos: nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), azufre (S) y micro elementos: hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B).

Para determinar el contenido de N, C, H, S y O, se utilizó el equipo de laboratorio analizador elemental a alta temperatura (1200°C) de muestras líquidas como sólida,

marca CUBE, el tiempo de análisis fue 10 minutos, métodos pre programados para tipos de muestras y cantidades y software de gestión en ambiente Windows.

Para la determinación de macro y micro elementos de cada muestra tamizada se tomaron 3 repeticiones de $3 \pm 0,1$ g cada una por muestra; estas fueron sometidas a un análisis elemental, donde se determinaron cantidades y porcentajes de micro (Fe, Cu, Zn, Mn y B) y macro elementos (N, P, Ca, Mg, K y S), presentes en el material. Este es un método automático, donde las repeticiones han sido sometidas en un analizador elemental macro, marca CUBE y se basó en la oxidación de los elementos por medio de una combustión seca total del material a una temperatura de 950°C en atmósfera de oxígeno puro que convierte los elementos en gases simples.

6. Análisis de datos

Se desarrolló un análisis simple aleatorio, en el cual se determinaron las medianas, desviaciones estándar y coeficientes de variación para la variable de densidad, contenido de humedad, color (L^*a^* y b^*), contenido de cenizas, volátiles, carbono fijo, poder calórico, MOEd, fuerza máxima y esfuerzo máximo en compresión, C, N, H, S y O.

Además, se verificó la distribución normal y la homogeneidad de varianzas para los datos. Luego se aplicó un análisis de varianza para confirmar la existencia de diferencias significativas entre los promedios de variables ($P < 0,05$) para cada tratamiento. Por último, se estableció una prueba de Tukey para la determinación de diferencias estadísticas entre las medias, utilizando el programa estadístico SAS.

Resultados

1. Elaboración carbón

Flujo de producción del carbón

En la figura 6 se muestra el flujo de producción del carbón vegetal que empleó la empresa Ecobosques S.A. El proceso inició con la etapa de traslado de la materia prima a la fosa, posteriormente continuó con el acomodo de la materia prima, seguidamente se colocó cartón húmedo o pasto encima de la materia prima, luego se vertió y acomodó la tierra. Se encendió la fosa por el agujero de encendido y se esperó a que el carbón estuviera listo. Al finalizar se sacó el carbón y se tamizó, luego se esperó a que se enfriará el carbón o se le agregaba agua y por último se almacenó en sacos. Posteriormente se almacenó en su presentación comercial. La presentación comercial elegida fue una bolsa de papel Kraft con la etiqueta que la empresa diseñó, finalmente se trasladó al sitio de venta.

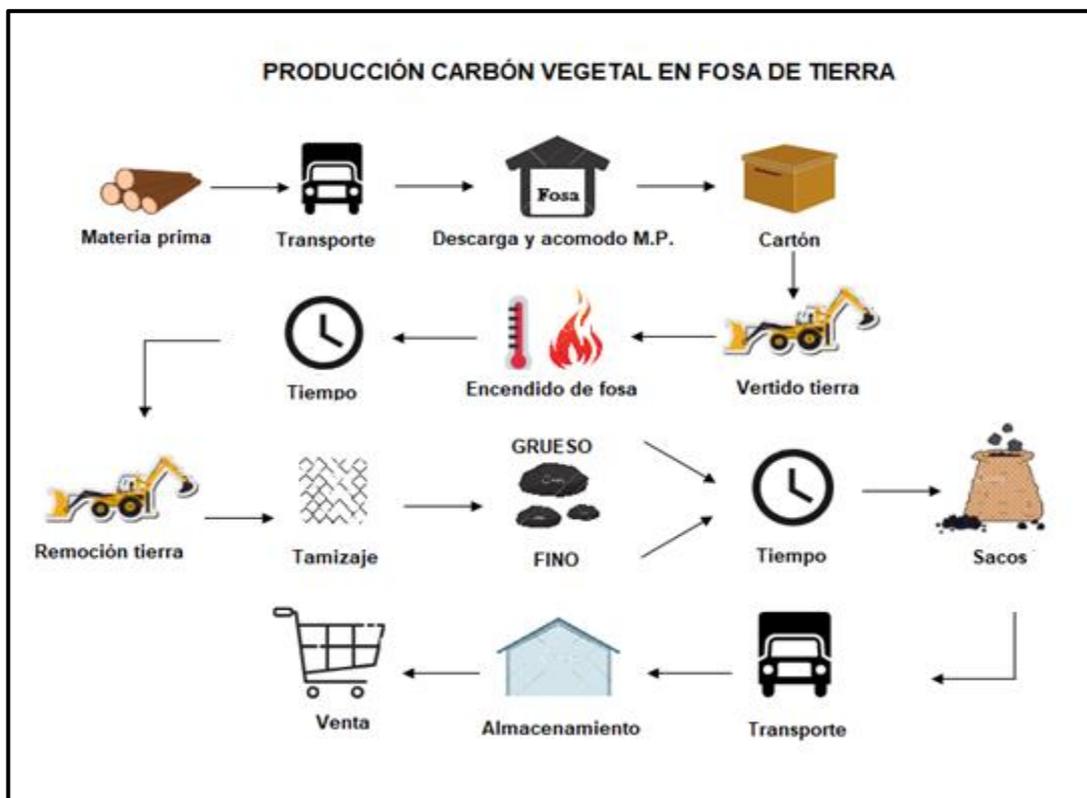
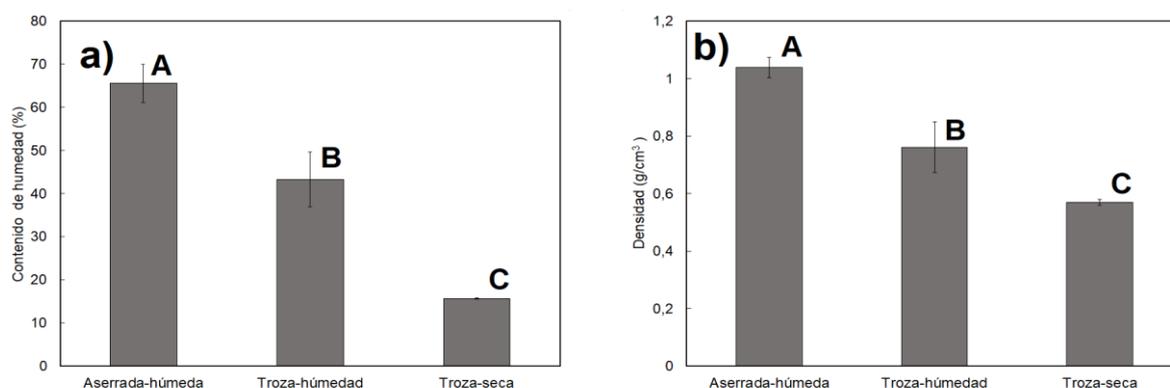


Figura 6. Flujo de producción del carbón vegetal elaborado en la empresa con el método de fosas de tierra, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.

Caracterización de la materia prima

En la figura 7 se muestra el resultado del contenido de humedad y densidad de la materia prima antes del proceso de carbonización. En los tres tratamientos, el contenido de humedad y la densidad fueron estadísticamente diferentes. Respecto al contenido de humedad el tratamiento troza-seca presentó el contenido de humedad más bajo (15,65 %), seguido del tratamiento de troza-húmeda (43,28 %) y con la humedad más alta el tratamiento aserrada-húmeda (65,53 %) (figura 7a). En el caso de la densidad, el tratamiento aserrada-húmeda presentó la densidad estadísticamente más alta (1,04 g/cm³), seguida del tratamiento troza-húmeda (0,76 g/cm³) y por último el tratamiento troza-seca (0,57 g/cm³) (figura 7b).



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

Figura 7. Contenido de humedad (a) y densidad (b) en la materia prima de la especie *Tectona grandis*, utilizada para producir carbón vegetal en la fosa de tierra, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.

2. Determinación de los parámetros de producción

Rendimiento del proceso de carbonización (%R)

Aunque la fabricación de carbón se trató de llevar adecuadamente se presentó el problema de incendios de las fosas con carbón y esto dio lugar a que gran parte del carbón producido se consumiera, por lo que los resultados no reflejaron los valores que se deberían de obtener. A pesar de esto fue cuantificada la producción de carbón. En el cuadro 1 se presenta el rendimiento en las diferentes modalidades del carbón (grueso y fino) obtenido de cada tratamiento al producir carbón en fosas. El tratamiento de troza-seca obtuvo el mayor rendimiento total con 24%, dado que

fue el único que no se quemó por la abertura de hoyos dentro del proceso normal de carbonización. Los otros dos tratamientos se quemaron entre un 50 y 60% durante el proceso de carbonización y por ende obtuvieron bajos rendimientos, un rendimiento de 13% para el tratamiento aserrada-húmeda y un 7% para el tratamiento troza-húmeda, además en los tratamientos aserrada-húmeda y troza-húmeda se obtuvo más carbón fino que grueso, contrario a lo que sucedió en el tratamiento troza-seca, que obtuvo mayor rendimiento en carbón grueso.

Cuadro 1. Rendimientos obtenidos en la elaboración de carbón de residuos de *Tectona grandis*, para los 3 tratamientos en el método fosa de tierra, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.

Tratamiento	Peso de materia prima (kg)	Producción de carbón (Kg)			Rendimiento (%)		
		Carbón grueso	Carbón fino	Total	Carbón grueso	Carbón fino	Total
Aserrada-húmeda	885	29	85	114	3	10	13
Troza-húmeda	1231	37	45	82	3	4	7
Troza-seca	765	136	45	181	18	6	24
Total	2881	202	175	377	7	6	13

Tiempo de carbonización

El cuadro 2 muestra los tiempos obtenidos en el proceso de carbonización. La actividad de traslado y acomodo de materia prima representa una de las actividades con menor tiempo para el caso del tratamiento aserrada-húmeda y troza-seca. Sin embargo, para el tratamiento troza-humedad fue mayor el tiempo, pero esto se debió a que en este tratamiento, la actividad fue realizada por una persona, y en los otros tratamientos comúnmente se realiza con dos personas. La etapa de encendido contemplo las actividades de corte y acomodo de pasto, vertido y acomodo de tierra y encendido de la fosa, para dicha etapa se obtuvo valores similares que oscilan entre 1,45 y 1,73 horas. La etapa de carbonización fue la de mayor tiempo, en promedio llevó 96 horas. La etapa de extracción del carbón fue

una de las etapas que más requirió de mano de obra (3 personas), y comprendió las actividades de extracción del carbón, tamizaje y almacenamiento en sacos, esta etapa tiene tiempos similares entre tratamiento que oscilaron entre 4,75 y 5,5 horas. El general el proceso de carbonización tardó de 4 a 5 días y se debe considerar que la empresa cuenta con 2 fosas, por lo que simultáneamente se trabajó ambas fosas.

Cuadro 2. Tiempo requerido de mano de obra en el proceso de carbonización, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.

Actividades/Tratamientos	Aserrada-húmeda	Troza-húmeda	Troza-seca
Traslado y acomodo MP (hrs.)	0,77	1,85	0,7
Encendido fosa (hrs.)	1,45	1,45	1,73
Carbonización (hrs.)	96	96	96
Sacada (hrs.)	4,75	4,75	5,5
Total (hrs.)	102,97	104,05	103,93
Total (días)	4,29	4,33	4,33

Consumo de leña de la fosa (%L)

En el cuadro 3, se representan los valores de la cantidad de materia que se requirió para encender la fosa, en general se toman de 10 a 15 kg de materia prima y esta representa en promedio 1,06% de la carga total de materia a ser carbonizada, por lo que los valores de consumo de leña no son representativos respecto cantidad de materia prima total depositada en la fosa.

Cuadro 3. Consumo de leña obtenido en la elaboración de carbón de residuos de *Tectona grandis*, para los 3 tratamientos en el método fosa de tierra, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.

Tratamiento	Consumo de leña (kg)	Representación en porcentaje de la carga inicial
Aserrada-húmeda	11	1,24
Troza-húmeda	15	0,96
Troza-seca	10	0,98
Total	36	1,04

Producción de gases

El cuadro 4 muestra la producción de los humos condensados que se pueden convertir en materia sólida libre de líquidos. Este cuadro muestra que aunque se produjeron gran cantidad en litros de líquidos que se condensan durante la carbonización, solamente una cantidad mínima de sólidos en todos los casos pudo ser extraído, ya que se presentaron valores menores al 1 g/ml de concentración de materia sólida y de igual forma los valores de producción de sólidos son mínimos llegando a un total de 6,62 mililitros por kilogramo.

Cuadro 4. Rendimientos alcanzados del material sólido obtenido de los humos en el proceso de carbonización de la especie *Tectona grandis*, en el método de fosa de tierra, Ecobosques, San Joaquín, Cutrsi, San Carlos.

Tratamiento	Total de líquidos recolectados (L)	Producción (ml/kg MP)	Materia sólida (g/ml)
Aserrada-húmeda	4	4,52	0,05
Troza-húmeda	7	4,46	0,02
Troza-seca	12	11,76	0,05
Total	23	6,62	0,13

Costos para elaborar la fosa de tierra

El cuadro 5 muestra los costos de inversión para construir y adecuar la fosa de tierra para la producción del carbón. El costo más representativo es el de herramientas y materiales (palas, varillas, mecate y plástico) dada la naturaleza del proyecto y respecto al equipo se utilizaron 2 tractores agrícolas: uno con pala y el otro con carreta, la empresa cuenta con ellos por otras actividades agrícolas que realiza la empresa.

Cuadro 5. Costos de inversión para elaborar la fosa de tierra para producir carbón vegetal, Ecobosques, san Joaquín, Cutris, San Carlos.

Descripción	Costo (₡)*	Porcentaje (%)
Mano de obra	5 400	8
Herramientas y materiales	43 075	67
Equipo	16 000	25
Total	64 475	100

*Tipo de cambio, un dólar= 588 colones.

Costo para elaborar el carbón

El cuadro 6 enmarca los costos de producción del carbón. El mayor costo es la materia prima (86 % del total), pero se clasificó como costo muerto para la empresa, ya que dispone de esta materia prima (residuo) produzca o no el carbón. También en esta misma situación está el equipo (2 tractores) necesario para la adecuada producción del carbón vegetal, ya que la empresa cuenta con estos. En mano de obra se consideraron 2 personas para la mayoría de actividades, mientras que 3 personas se requirieron para la etapa de extracción del carbón, adicionalmente se implementó el pago doble en las horas de cuidado nocturno de la fosa.

Cuadro 6. Costos de producción del carbón vegetal en una semana, utilizando la fosa de tierra, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.

Descripción	Costos (₡)*	Porcentaje (%)
Mano de obra	25 669	4
Materia prima	575 000**	86
Materiales	35 583	5
Equipo	32 000**	5
Total	668 252	100

*Tipo de cambio, un dólar= 588 colones.

**Se consideraron costos muertos.

El costo de producir un kilogramo de carbón por la empresa fue de ₡203/kg, donde se consideró como costos muertos la materia prima y el equipo. Este valor es derivado de una producción por semana de 302 kilogramos de carbón, utilizando una de las dos fosas que dispone la empresa en su capacidad total.

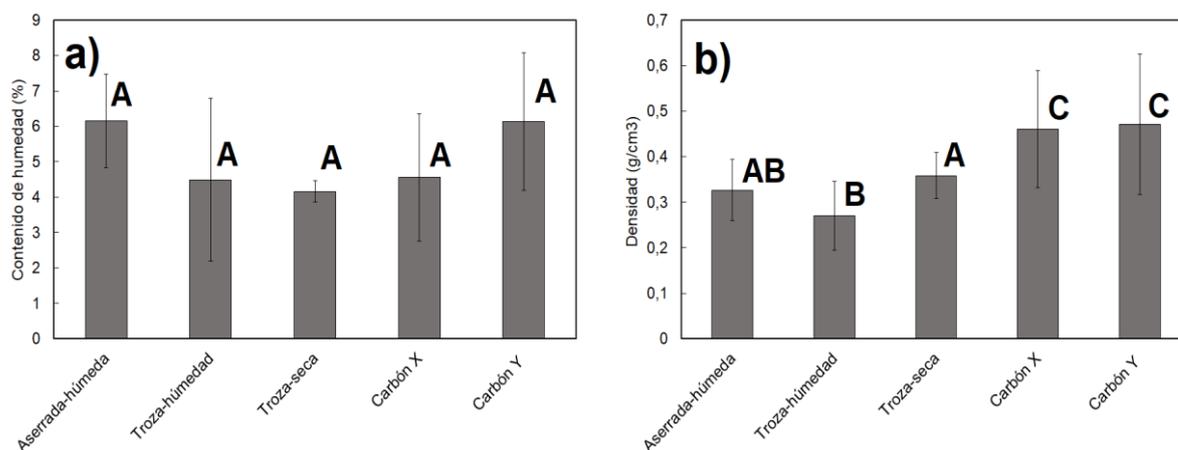
3. Potencial económico anual de los residuos.

La cantidad de carbón que se puede producir al año a partir de los residuos de teca es de 6 302 kg y el potencial económico anual de los residuos para producir carbón es de ¢ 4 203 434 (ingreso bruto anual), esto considerando el rendimiento obtenido por la fosa y los residuos disponibles. Cabe señalar que los rendimientos pueden aumentar especialmente evitando que el material en la fosa se quemara en horas de la noche y madrugada, por lo que el potencial económico anual puede aumentar significativamente. Acorde en los resultados presentados anteriormente el precio de venta sería de ¢667 por kilogramo de carbón.

4. Caracterización del carbón de teca y dos carbones comerciales

Propiedades físicas

En la figura 8 se presenta el resultado de las características físicas del carbón producido. El CH, del carbón proveniente de tratamiento troza-húmeda y aserrada-húmeda presentó los valores más altos, estos no presentaron diferencia significativa con el tratamiento de troza-seca, sus valores oscilan entre 4,16 y 6,13 %. En lo referente a la densidad del carbón si se observaron diferencias significativas (figura 8b). El tratamiento con mayor densidad en el carbón lo presenta el producido con troza-seca, seguido del carbón de aserrada-húmeda y el carbón de troza húmeda, sus valores se encontraron entre 0,27 y 0,47 g/cm³. Respecto a los carbones comerciales se obtuvo que para el carbón X y carbón Y no presentaron diferencias significativas en el CH ni en la densidad, pero la densidad de los carbones de teca (tratamientos) si es diferente significativamente respecto a los carbones comerciales (Figura 8a).



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

Figura 8. Contenido de humedad (a) y densidad (b) obtenidas en el carbón vegetal producido en la fosa de tierra de la especie *Tectona grandis* y dos carbones comerciales, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.

El cuadro 7 se detalla los resultados en los valores de los parámetro de color (L^* , a^* y b^*). Los valores oscilan entre 19,86 a 22,51 para el parámetro L^* , entre 0,11 a 0,34 para el parámetro a^* y entre 0,23 a 0,73 en el parámetro b^* . En los diferentes tipos de carbón fabricados de la madera de teca y los diferentes carbones comerciales no se observaron diferencias significativas en estos 3 parámetros.

Propiedades energéticas

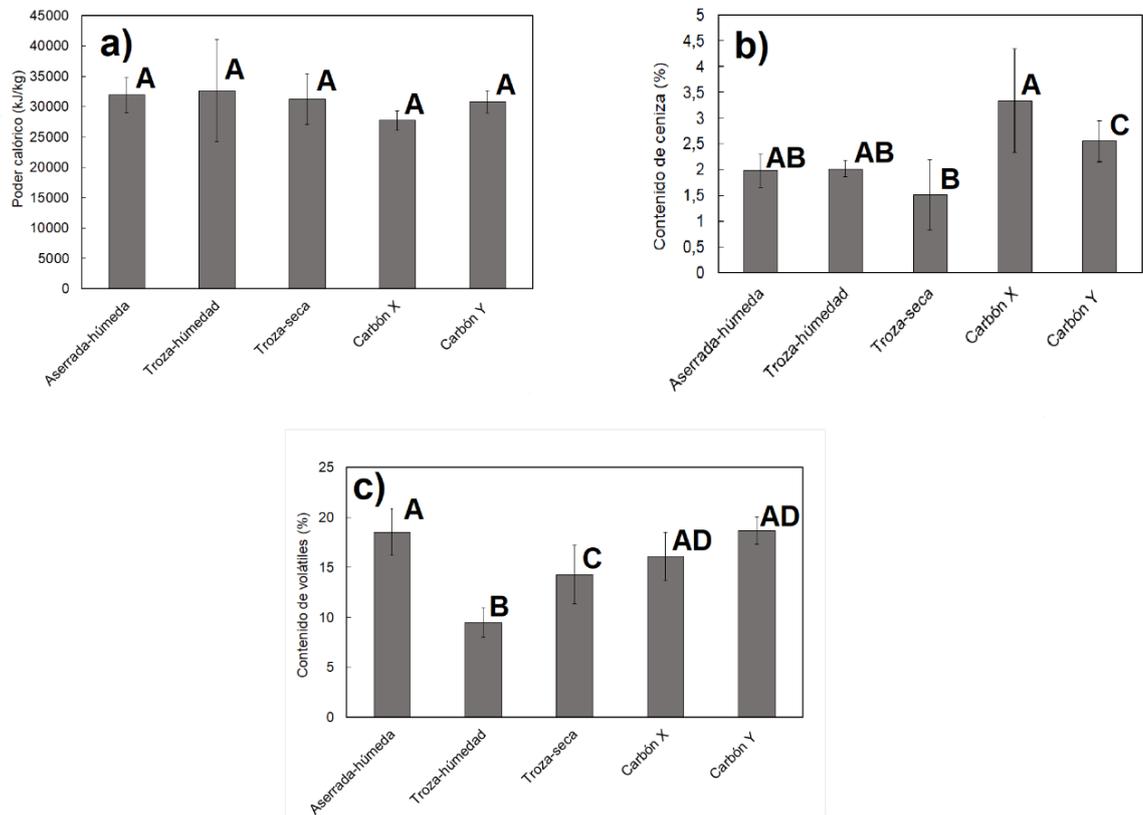
El carbón fabricado de teca presenta valores de poder calorífico que variaron de 31 294 a 32 649 kJ/kg y no presentan diferencias significativas con el carbón de las diferentes fuentes de materia prima o de éstos con los carbones comerciales (figura 9a).

El contenido de cenizas del carbón varía entre valores de 1,51 a 3,33% para los tratamientos. En los carbones de teca no se encuentran diferencias significativas entre los tratamientos. Al comparar con los carbones comerciales se tiene que el carbón X y Y son diferentes estadísticamente entre sí, el carbón X no tiene diferencias significativas con los tratamientos aserrada-húmeda y troza-húmeda (figura 9b).

Por su parte los contenidos de volátiles de los tratamientos (figura 9c) registraron valores que oscilan entre 9,47 y 18,53%, obteniendo el menor valor el tratamiento

troza-seca y el mayor valor el tratamiento carbón X. Todos los tratamientos fueron diferentes estadísticamente entre sí, mientras en los carbones comerciales no se observaron diferencias significativas.

Los resultados de carbono fijo son presentados en el cuadro 7 y se observa que los valores variaron entre 73,32 y 80,05%, obteniendo el menor valor estadísticamente el tratamiento AH y los mayores valores en los tratamientos troza-húmeda y troza-seca. Respecto a la comparación con los carbones comerciales en estos no hubo diferencia significativa entre sí, ni entre el tratamiento aserrada-humedad pero, si entre los carbones de teca de troza seca y troza humedad y entre estos no hubo diferencias estadísticas y presentan los mayores valores estadísticamente.



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

Figura 9. Poder calórico (a), contenido de ceniza (b) y volátiles (c) obtenido en el carbón producido en fosa de tierra de la especie *Tectona grandis* y dos carbones comerciales, Ecobosques, san Joaquín, Cutris, San Carlos.

Propiedades mecánicas

En lo referente a la propiedad mecánica de módulo de elasticidad dinámico (MOE_d) varió sus valores de 1,08 a 2,59 Pa en los tratamientos, y no se presentaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos en la madera de *T. grandis* ni los dos carbones comerciales que se evaluaron. En el ensayo de compresión, los valores de la fuerza máxima y esfuerzo máximo fueron estadísticamente iguales. Respecto a los carbones comerciales, el carbón X no tiene diferencias significativas con los tratamientos troza-húmeda y troza-seca, y se encuentran diferencias para el tratamiento aserrada-húmedo. En el carbón Y, la fuerza máxima es diferente significativamente al carbón X, pero no diferente a los carbones de teca (tratamientos) (Cuadro 7).

Propiedades químicas

El porcentaje presente del elemento carbono en los diferentes carbones fue mayor en todos los casos, en el tratamiento troza-húmeda se obtienen los mayores valores, seguido del tratamiento troza-seca y aserrada-húmeda, todos estos son estadísticamente diferentes. En el caso de la comparación con los carbones comerciales, el tratamiento aserrada-húmeda no presentó diferencias significativas con los carbones comerciales, y entre ellos tampoco hubo diferencia significativa. Respecto al elemento azufre, fue el que en menor proporción se encontró en los carbones. El carbón de madera aserrada-húmeda no presentó diferencias significativas con el tratamiento troza-seca (Cuadro 7). En la comparación con los carbones comerciales tampoco hubo diferencia significativa entre ellos. El nitrógeno entre los tratamientos aserrada-húmeda, troza-húmeda y carbón X no mostró diferencia significativa y tampoco con respecto a los carbones comerciales. El hidrógeno entre los tratamientos son diferentes significativamente entre sí y con respecto a los carbones comerciales no hay diferencia significativa entre sí. El oxígeno, los carbones de teca fueron estadísticamente diferentes entre sí, siendo el de mayor contenido el de madera aserrada-seca, seguido de troza-seca y por último el de troza-húmeda. Al comparar con los carbones comerciales se obtuvo que el tratamiento aserrada-húmeda presentó una cantidad de oxígeno estadísticamente igual, pero en el carbón producido con trozas fue estadísticamente menor que en los comerciales.

Cuadro 7. Propiedades físicas, mecánicas, energéticas y químicas determinadas en el carbón producido en fosa de tierra de la especie *Tectona grandis* y dos carbones comerciales, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.

Propiedad	Parámetro	Aserrada-húmeda	Troza-húmeda	Troza-seca	Carbón X	Carbón Y
Físicas	L	21,53 A	22,28 A	22,51A	20,60 A	19,86 A
	a	0,16 A	0,20 A	0,29 A	0,34 A	0,11 A
	b	0,57 A	0,71 A	0,65 A	0,73 A	0,23 A
Energéticas	Carbono fijo (%)	73,32 A	83,81B	80,05 B	75,58 A	72,37 A
Mecánicas	MOE d (Pa)	1,08 A	2,59 A	1,10 A	1,82 A	1,79 A
	Fuerza máx.(kg)	120,96 A	132,13 AB	125,65 AB	237,60 B	88,64 A
	Esfuerzo máx. (Kg/cm ²)	44,39 A	53,06 AB	47,02 AB	88,52 B	37,71 A
Químicas	Carbono (%)	81,71 AD	90,81 B	86,66 C	81,79 AE	82,45 DE
	Nitrógeno (%)	0,40 A	0,39 A	0,27 B	0,70 A	0,40 C
	Hidrógeno (%)	3,33 A	1,81 B	2,81 C	2,92 ACE	3,10 BDE
	Azufre (%)	0,02 A	0,09 BD	0,02 AB	0,07 AE	0,03 CDE
	Oxígeno (%)	16,52 A	8,91 B	11,75 C	17,85 A	16,58 A

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

En el cuadro 8 se presenta los macro y micro elementos presentes en el carbón vegetal de teca. Entre los macroelementos de importancia se tiene N para el cual se observan valores de 0,48 a 0,7%, en el P se obtuvieron valores de 0,02 a 0,06% y K con rangos de 0,22 a 0,35%, el macroelemento nitrógeno es el que se encontró en mayor proporción y el azufre es el macro elemento que se encontró en menor cantidad. Respecto a microelementos encontrado con los mayores niveles fue el Fe, seguido de Cu, posteriormente valores de Mn, B y por último de Zn.

Cuadro 8. Macro y micro elementos presentes en los diferentes tratamientos de carbón de la especie *Tectona grandis*, Ecobosques, San Joaquín, Cutris, San Carlos.

	% masa						mg/kg				
	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
Aserrada-húmeda	0,61	0,06	0,29	0,26	0,35	0,01	136	14	10	12	8
Troza-húmeda	0,7	0,08	0,36	0,34	0,24	0,02	184	14	4	10	9
Troza-seca	0,48	0,02	0,28	0,14	0,22	0,01	104	10	4	10	8

Discusión

1. Elaboración del carbón

Acorde con lo planteado por [4], quien indica que para el establecimiento de un buen proceso de producción de carbón se deben tener cortas distancias desde el sitio de almacenamiento a la fosa de carbonización, el acomodo de la madera debe ser adecuado, intentando no dejar espacios vacíos, aislar la materia prima con cartón y tierra, encenderla y esperar algún tiempo para la extracción del carbón, además de realizar tamizando del carbón y almacenado, comparando estas etapas con las realizadas por la empresa Ecobosques se observa que el flujo de proceso detallado en la figura 6, cumple a cabalidad con lo expuesto anteriormente.

A pesar de que se tiene un adecuado proceso, hubo un pequeño descuido en la vigilancia de la fosa durante la carbonización, ya que se presentaron entradas de aire (oxígeno) importantes, que provocaron en dos de los lotes/tratamientos la quema de gran proporción de la carga. Esto es una indicación que el cuidado del proceso de carbonización es un proceso de mucha importancia y cuidado. Así lo indican [14] y [32], quienes establecen que una de las actividades principales del proceso de producción es el cuidado de la carbonización, ya que en el método de fosas de tierra el carbón puede quemarse por completo.

Características de la materia prima

Según lo determinado en el estudio, el contenido de humedad de la madera, está acorde a lo planteado: contenido de humedad mayores a 16% para las condiciones denominadas como húmedas y menor a 16 % para la condición denominada como seca (figura 7a). Así también se observó que los valores de densidad (figura7b) son inversamente proporcionales al contenido de humedad, situación que es de esperar ya que el volumen de la madera se mantiene, pero el peso de las mismas aumenta por un mayor contenido de agua [21].

Al comparar estos valores de la madera de teca con otros estudios se tiene que son comparables. Por ejemplo, en [21] se reporta para la especie un contenido de humedad en verde de 56,43%, valor similar al obtenido en el tratamiento aserrada-húmeda (65,53%) y densidad en verde de 1,12 g/cm³, similar a lo encontrado en el mismo tratamiento (1,04 g/cm³) antes mencionado (figura 7b).

2. Determinación de los parámetros de producción

Rendimiento

Se menciona que el método de producción de carbón con fosas puede alcanzar el rendimiento de 22,2% [4]. Este valor de rendimiento, sin embargo, está muy por encima a lo encontrado en promedio para este estudio (13%), pero el tratamiento troza-seca (cuadro 1) si obtiene valores similares a lo reportado por Bustamante y compañía [4]. Otros estudios [32], [33], [34], [35] y [6], reportan similares rendimientos al encontrado en el tratamiento troza-seca (24%). En el caso de los dos tratamientos que sufrieron el encendido de la madera, son la mitad de los reportados por [32], [33], [34], [35] y [6]. Sin embargo, estos pudieron haber alcanzado esos porcentajes si no hubiese sufrido la quema de materia prima, por lo que no se les puede comparar ya que estos se quemaron casi la mitad de la carga.

Por otra parte, en un estudio realizado en el año 2018 por Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) se observan valores del 4 a 6 % en rendimiento alcanzado por productores de La Estrella, Guarco, Cartago, Costa Rica, por lo que los rendimientos obtenidos en el presente estudio superan los reportados para el mismo método en Costa Rica [36].

Las diferencias en los rendimientos del carbón producido en este estudio en comparación con los autores anteriormente mencionados ([32], [33], [34], [35] y [6]), puede deberse a la metodología empleada para su determinación, tipo de residuo y acomodo de la materia prima, ya que estos factores afectan la carbonización [14]. Por ejemplo, en el presente estudio como se indicó una parte del lote sufrió la quema durante el proceso de carbonización y los otros estudios no reportan este problema.

Por otra parte, los rendimientos encontrados en los tratamientos con troza y respecto contenido de humedad (cuadro 1), son variables, ya que el tratamiento TS se encuentran los mayores valores, dado el tratamiento fue secado con anterioridad, situación que responde a lo que reporta [32], donde el carbón es de calidad más uniforme y con un mayor rendimiento cuando la materia prima está seca.

Además, se evidencia que el tratamiento aserrada-húmedo tuvo un rendimiento en carbón grueso menor (3%) (cuadro 1), dado que la materia prima tenía tamaños diferentes y corteza, situación descrita por [24], quien menciona que si se usa madera con dimensiones pequeñas y con corteza, se obtiene una proporción de partículas finas en exceso acompañada por una notable reducción del volumen de la carga de madera, hasta el 50-70% del volumen inicial.

Tiempo

Reporta [34], que para una producción de 6 toneladas el proceso dura de 30 a 35 días, en donde 12 a 18 días equivalen al proceso de carbonización, tiempo muy superior al presentado en este estudio (Cuadro 2). Sin embargo, hay que considerar que, en el presente estudio, se toma como referencia el tratamiento troza-seca que no se quemó y que produjo 181 kg de carbón en 4,33 días (cuadro 2). Cantidad de días empleados en la carbonización, es proporcional al volumen de materia a carbonizar. En otro estudio realizado en Costa Rica, reportan tiempos similares, para una fosa de dimensiones similares, en este caso el tiempo de carbonización dura 5 días y se obtiene 240 kg carbón/ fosa [36], muy similar a lo encontrado en el este estudio, con 4,3 días para producir 181 kg carbón/fosa (cuadro 2).

Por otra parte, [37] encontraron un promedio en el tiempo de carbonización de 152 horas (6,33 días) empleando el mismo método y una fosa con dimensiones similares, por lo que se puede apreciar el tiempo de producción del carbón es parecido a lo observado en diversos estudios.

Consumo de leña de la fosa

El consumo de leña (cuadro 3), es mínimo respecto a la carga inicial (1,06%). Porcentajes de uso de leña fueron encontrados por [25] y [24] quienes reportan valores menores al 2%.

Humos

Según [24], el ácido piroleñoso es el nombre del condensado en bruto, y se compone principalmente de agua, entonces esto confirma las bajas cantidades del concentrado reportado en el cuadro 4.

Sin embargo, algunos estudios reportan valores mayores al encontrado en este estudio (menos del 1 g/ml en concentración sólida) [33] reporta que, para especies latifoliadas del hemisferio norte, se obtiene un rendimiento de 15 g/ml de concentración de materia sólida, lo cual es posible, dependiendo de la especie la cantidad liberada de humos y líquidos condensables [24].

A nivel mundial se obtiene un bajo rendimiento en materia sólida (alquitrán) que se pueda condensar, por lo que se ha dejado de realizar dicha actividad, ya que acarrea con la problemática de almacenarlo, daño ambiental como en la salud y que es un líquido sumamente contaminante, nocivo y corrosivo [33], por lo que la empresa debe valorar si desea o no hacer la condensación de los humos que se liberan durante la carbonización.

Inversión y producción

Según [24], el costo de inversión ronda los \$400 equivalentes a ₡235000, esto considerando solo la mano de obra y equipo. Sin embargo, no se cuenta con mucha información sobre la inversión inicial que necesitan este método en países en desarrollo, dado que es un método que requiere la elaboración de una fosa y que por lo general se hace de forma manual en una cuadrilla conformada por varias personas. Entonces el monto obtenido por la empresa (₡ 64 475-cuadro 5), podría decirse es un monto muy por debajo a lo considerado por [7]; no obstante, se indica que esta inversión es para fosas con una productividad de 6 toneladas de carbón por carga.

Por otro lado, en un estudio realizado en México se obtuvo un costo para producir un kilogramo de carbón de \$ 1,92 (₡1128), esto considerando el costo total de producción de \$2298 (₡1 351 224) para producir 1200 kg de carbón vegetal [14]. El costo de producción determinado para la empresa de este estudio fue de ₡668 252, para producir 302 kilogramos en una fosa al 100% de su capacidad y con un costo de ₡203/kg (Cuadro 6), un valor muy por debajo del encontrado en México [4] no obstante aquí se ha eliminado el costo muerto que presenta para la empresa la materia prima y el equipo de producción.

Según [33], el costo de producir 6 toneladas de carbón en 35 días es de \$ 7 068 (₡4 155 984), esto considerando las actividades de corte de la madera, traslado, descarga, acomodo de fosa, encendido, cuidado, apagado, envasado, e insumos.

Esto dio como resultados un costo unitario de \$ 1,18/kg (₡693,84/kg). Este estudio indica una mayor cantidad de carbón, pero aun así el costo por kilogramo es mayor al determinado en el estudio (₡203/kg) (cuadro 6).

Según [36], el costo de producir 400 sacos mensuales en presentación de 10 kg cada uno en patio de la carbonera es de ₡ 351 500, en donde se obtienen gastos de flete ₡ 140 000, leña ₡128 000, cartón ₡35 000, tira ₡5 000, sacos ₡7 500 y mano de obra ₡36 000, por lo que el costo de producir un kilogramo de carbón ronda en ₡ 87,87. Este estudio presenta los datos más similares a los encontrados por [36], ya que el monto de mano de obra, materiales y equipo es muy parecido; sin embargo, la capacidad instalada de la dicha empresa es de 4 fosas, por lo que producen en mayor cantidad lo que refleja costos por kilogramo menores, según lo obtenido en la empresa (₡203/kg) (cuadro 6).

En México se reporta para el mismo método, en una producción entre 1 y 2 toneladas y que se vende a pie de horno, al precio de \$2,8 a \$3 por kg (₡1 646 a ₡1 764); sin embargo, el acopiador / transportista vende el carbón a los revendedores en \$3,5 el kg y el precio final del carbón es de \$8 el kg (₡4 704) [6]. En este estudio en México, se observan mayores costos y mayor producción respecto al presente estudio (cuadro 6).

En otro estudio llevado a cabo por [14], en México, reporta un costo de producción en horno fosa de \$981,4 (₡577 063) en 15 días, según lo determinado en el estudio en la semana de producción se obtienen ₡668 252 en costos (cuadro 6), valor muy por encima respecto al estudio anterior.

3. Potencial económico anual de los residuos.

Por su parte el según un estudio realizado en la zona de la La Estrella del Guarco, Costa Rica, el ingreso mensual es ₡1 200 000, produciendo 400 sacos de carbón de 10 kg cada uno (4 000 kilogramos en total) y en donde cada saco se vende a ₡3000 (₡300/kg) [36]. En este caso la producción es mucho mayor en comparación a la empresa del presente estudio ya que esta por año produce 6 302 kg, según cantidad de residuos de teca. Según lo determinado en el estudio el valor de venta por kilogramo de carbón sería de ₡667 valor mucho mayor respecto a lo presentado por [36]; sin embargo el ingreso bruto anual esperado es menor (₡ 4 203 434).

En otro estudio realizado en Yucatán, México, los precios de venta varían de 0,16\$ a 0,17\$ (₡ 94,08 a ₡99,96) por saco de 20 kg, con un ingreso anual de 3408 \$ (₡ 2 003 904) [14]. En este caso el ingreso bruto anual es menor al encontrado en el estudio (₡ 4 203 434). Sin embargo es proporcional según tipo de cambio y costo de vida de dicho país. Por otra parte la variación en los ingresos percibidos por la actividad es muy variable, ya que en su mayoría el precio de venta en patio difiere al precio de venta de almacén, en donde en algunas ocasiones los intermediarios perciben mayores ganancias que los productores [24].

4. Caracterización del carbón de teca y dos carbones comerciales

Propiedades físicas

La densidad encontrada por [18] para el carbón es de 0,15 a 0,26 g/cm³ y el contenido de humedad que reportan en su estudio varía de 5,0% a 6,1%, valores muy similares a los encontrados en el estudio (figura 8). Adicionalmente en el cuadro 9 reportado por [10] para diferentes normas que regulan la calidad del carbón, establecen que el contenido de humedad debe variar de 6 a 10 %, por lo que en todos los carbones obtenidos en el presente estudio y en especial el de madera de teca (figura 8a) se encuentran en dicho rango, por tanto cumple con las condiciones para su comercialización.

Propiedades energéticas

En el cuadro 9, se observan algunos parámetros que determinan la calidad del carbón, especialmente para la comercialización en dichos países, entendiéndose que los carbones deben encontrarse en el rango descrito a continuación para determinarse como carbones de calidad (cuadro 9) [10].

Cuadro 9. Estándares de calidad de acuerdo con las características fisicoquímicas del carbón vegetal para uso doméstico [10].

Mercado	Norma	Pureza química			
		Carbono fijo (%)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Humedad (%)
Bélgica	NBN M11-001	75	12	-	7
Francia	NFN846 E	75	12	-	7
Alemania	DIN 51749	78	16	6	8

Mercado	Norma	Pureza química			
		Carbono fijo (%)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Humedad (%)
Rusia	GOST 7657-84	77	14	3	6
Serbia	SRPS D.B9.020	80	5	5	10
Estados unidos	DIN EN 1860-2	75	9	8	8
Japón	-	76	12	4	7,5

Poder calorífico entre 29 000 y 35 000 kJ/kg, son valores aceptables para el carbón vegetal, valores muy superiores al de la madera cuyos valores oscilan entre el 12 000 y 21 000 kJ/kg [10] y [7]. En este caso los carbones evaluados se encuentran en dicho rango, ya que se obtienen valores entre 31 294 y 32 649 kJ/kg (figura 9a). El contenido de carbón fijo es la característica más importante, ya que determina la calidad y cantidad de la brasa y un carbón fijo menor de 70% es considerado de mala calidad [1]. Según las normas y los estándares internacionales, la calidad del carbón se debe ajustar a que el contenido de cenizas sea menor al 8%; el contenido de volatilidad o producción de elementos volátiles menor al 16% y además se considera la densidad [14] y [10] en cuadro 9. Bajo este escenario el carbón producido por la empresa se encuentra dentro de esos parámetros ya que se obtiene porcentajes de carbono fijo entre 73,32 y 83,81% (cuadro 7), cenizas 1,51 a 2,01% (figura 9b) y volátiles entre 9,47 y 18,53% (figura 9c), sin embargo en este caso algunos tratamientos (aserrada-húmeda, carbón X y Y) no cumplen con el parámetro de calidad. Algunos carbones supera dichos parámetros y en donde el tratamiento troza-seca y troza-húmeda son los que mejor cumplen con todos los parámetros ya que se encuentra valores de carbono fijo de 80,05%, cenizas 1,51%, volátiles 14,28 % (figura 9 y cuadro 7) y mayor densidad (figura 8b) para el tratamiento troza-seca y valores de carbono fijo de 83,81 %, cenizas 2,01 %, volátiles 9,47 % en el tratamiento troza-húmeda (figura 9 y cuadro 7).

Por su parte, en [18] reportan para la especie *Eucalyptus camadulensis* Dehnh., valores de porcentaje de cenizas de 7,2 a 4,4%, porcentaje de volátiles de 32,1 a 20,9% y porcentaje de carbono fijo 54,6 a 69,7%. Los valores obtenidos en el

estudio (figura 9 y cuadro 7) superan en calidad a los reportados para *E. camadulensis*, según cuadro 9.

En la especie *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea*, sí reportan valores muy similares a los obtenidos en este estudio para la especie, ya que se encuentra valores de porcentaje de volátiles de 5,46%, porcentaje de ceniza de 1,96%, porcentaje de carbono fijo de 91,85% y poder calórico de 31 000 kJ/Kg [38] y próximos a los detallados en el cuadro 7 y figura 9 para el presente estudio.

En el caso de la especie *Quercus* sp. se reportan valores de contenido de volátiles de 23,09%, contenido de cenizas de 3,74%, porcentaje de carbono fijo de 73,17% y poder calórico de 31 200 kJ/Kg [39], al igual que en el caso anterior los datos reportados en el estudio son muy similares a los obtenidos en el estudio (cuadro 7 y figura 9).

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas han sido poco estudiadas, sin embargo [40] menciona que la resistencia a la compresión del carbón vegetal es una característica física importante, ya que si el carbón posee resistencias bajas, al transportarlo y manipularlo puede que se convierta en carbonilla fina o polvo, en este caso la resistencia reportada para los carbones (cuadro 7) que se encuentra es relativamente buena ya que es similar a lo encontrado en algunas maderas resistentes [1].

Propiedades químicas

Por su parte [10], en un análisis elemental encuentran valores para el carbón de la especie *Quercus sideroxyla*, de %C de 76 a 89, % H con valores de 2 a 3, valores de %O de 3 a 9, %N de 0,2 a 0,4 y valores de %S de 0,01 a 0,04, según lo determinado en el estudio se encuentran valores muy similares a los reportados en el cuadro 7.

Por otra parte [38], determinó para la especie *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea*, valores de %C de 93,07, %H de 1,06, %N de 0,35 y %O de 3,56, comportamiento muy similar a los carbones de *T. grandis* del presente estudio (cuadro 7).

[41] presenta los resultados de micro y macroelementos en la especie, con edades de 3 a 18 años y en la zona del Canal de Panamá (cuadro 10) y en donde se aprecia los valores del carbón de la especie son muy similares a los encontrados en la madera del tronco de la misma especie (cuadro 8).

Cuadro 10. Concentración de macro y micro elementos, presentes en el tronco de la especie *Tectona grandis*, de 3 a 18 años en Canal de Panamá [41].

	% masa						mg/kg				
	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
Teca	0,27	0,05	0,11	0,08	0,19	0,02	125	2,4	20,2	2,6	3,1

Conclusiones y recomendaciones

El flujo de producción que desarrolla la empresa es el esperado para la actividad. Sin embargo se recomienda antes del vertido de tierra utilizar cartón húmedo y no pasto. Este método de producción obtuvo un rendimiento de 13%; sin embargo; el tratamiento troza-seca registra 24% con un alto porcentaje de carbón grueso (18%), por lo que se recomienda utilizar materia prima en dicha condición, la fosa tuvo una duración de 103 horas (4,32 días) en promedio para la carbonización y el consumo de leña promedio fue de 12 kilogramos. Otros tratamientos se quemaron (AH y TH) por lo que no se puede asegurar que estos obtengan un menor rendimiento respecto al tratamiento troza-seca. En el caso de la concentración de los gases para convertirse en materia sólida fue de 0,13 g/ml, representa una actividad poco rentable y contaminante; por lo tanto no se recomienda realizar.

El costo de inversión de las dos fosas de tierra fue de ₡64 475 y el costo de producción ronda los ₡668 252 por semana para producir 302 kilogramos de carbón. Sin embargo, el costo de producir un kilogramo de carbón es de ₡ 203, sin considerar los costos de equipo ni materia prima, ya que la empresa cuenta con ambos. La producción estimada para la empresa es de 6 302 kilogramos de carbón al año, lo que representaría un ingreso bruto anual de ₡4 203 434, según el rendimiento obtenido por la fosa. Sin embargo, el ingreso puede aumentar si se aumenta el rendimiento de la fosa, en ese caso recomienda a la empresa designar a un trabajador para el cuidado en las horas nocturna y en la madrugada, ya que la abertura de hoyos produce la quema del carbón, por ende, su pérdida y también se recomienda cambiar el método tradicional por uno más tecnológico como horno tipo retorna en donde se esperarían se obtengan mayores rendimientos y menor contaminación ambiental.

Respecto a las propiedades físicas, calóricas, mecánicas y químicas se encuentran valores similares entre el carbón producido y el carbón comercial, además en la mayoría de los carbones se cumplen los parámetros de calidad impuestos por varias normas internacionales para su comercialización. Sin embargo para esto se recomienda usar tozas secarlas o húmedas, ya que los tratamientos troza-seca y troza-húmeda fueron los que superaron los parámetros de calidad en todos los casos.

Agradecimientos

A mi familia por todo el apoyo brindado, en especial a mi madre Ingrid Méndez Madrigal y Eliza Berrocal Méndez.

A Roger Moya, por ser mi guía en este proyecto y compartir su conocimiento.

A Cynthia Salas, por ser un gran apoyo en esta etapa así como en otras.

Al personal de CIF; Robert Cubero, Didier Tencio, Johanna Gaitán, Carolina Tenorio, Freddy Muñoz y en especial a Carlos Olivares.

A EcoBosques, por aportar la ayuda necesaria para culminar este proyecto y brindarme la oportunidad.

Al profesor Jaime Quesada, por el apoyo brindado.

A mis amigas Sharon Villareal, Elvira Retana, Rudy Bello, Irene Corrales, Juliana Chaves, Arleth Porras y Sofia Moreno, por el apoyo siempre dado y la lucha de todos estos años, que esta amistad perdure para siempre.

A todos los profesores, personal de área administrativa como de mantenimiento y todos los compañeros que compartieron sus conocimientos en esta etapa; que me enseñaron a ser una mejor profesional.

A todo el personal de Taller Infantil Psicopedagógico del Tecnológico (TIPTEC) y en especial a la directora doña Maritza Gómez.

Referencias

- [1] M. Díaz, A. Gonzales, D. Sifuentes, and E. Gonzales. (2010). "El carbón vegetal: alternativa de energía y productos químicos", *XILEMA*. Vol.837, no.1, pp.95-103,2010.
- [2] A. Hilbert, "El uso de los residuos de origen vegetal en la generación de energía", *Bolsa de Comercio de Rosario*, vol.20, n.1, pp. 30-36, 2012.
- [3] M. Díez, "Del carbón vegetal al coque en la industria del hierro y del acero", *FundiPress*, vol.45, no.1, pp. 48-56, 2013.
- [4] V. Bustamante, Carrillo. A, F. Garza. "Economía en el manejo sustentable de los recursos naturales", en Factores económicos a considerar en la producción de carbón vegetal en un sistema tipo fosa, F. Garza, A. Carrillo. México, Universidad Autónoma de Nueva León, 2011, pp 113-126.
- [5] M. Antal, and M. Gronli, (2003). "The Art, Science, and Technology of Charcoal Production", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol.42, no.1, pp. 1619–1640, 2003.
- [6] A. Comou, A. Ghilardi, T. Mwampamba, M. Serrano, T. Ortiz, E. Vega, K. Oyama, and O. Maserà, "Análisis de la producción de carbón vegetal en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México: implicaciones para una producción sustentable", *Investigación ambiental*. vol.6, no. 2, pp. 127-138, 2014.
- [7] FAO. "Transición al carbón vegetal". Roma. Pp. 11-32, 2017.
- [8] L. Judd, "Physical and Chemical Analyses of Two Biochars Produced from Pine Wood Chips and Rice Hulls and Their Effects on Container Substrates" *ProQuest*, 2016.
- [9] J. Adam, "Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort-kiln (Eco-charcoal)". *Renewable Energy*, vol. 34, no. 8, pp. 1923–1925, 2009.
- [10] V. Bustamante, P. Carrillo, H. González, F. Garza, J. Prieto, J. Corral, and D. Vega, "Tecnologías para la transformación de la biomasa en carbón vegetal". *Técnicas en el manejo sustentable de los recursos naturales*, F. Garza, J.

- Guevara, H. Villalón, and A. Carillo. México, Universidad Autónoma de Nueva León, 2014, pp. 141-164.
- [11] P. Basu, (2010). "Biomass Characteristics", In Biomass Gasification and Pyrolysis. *Elsevier*. Oxford, 2010, pp. 27-63.
- [12] O. Navas, "El horno metálico transportable". *Revista Tecnológica En Marcha*, vol. 11, no.5, pp. 62-79, 2016.
- [13] E. Stassen, "Nuevas tecnologías de producción de carbón vegetal", *Revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, vol. 53, no. 1, pp. 1-34, 2002.
- [14] M. Manzón, M. "Evaluación del impacto socioeconómico de la producción del carbón vegetal en una comunidad forestal en la Península de Yucatán, México", CATIE, 2015, pp 1-39.
- [15] O. Navas, O., S. (2002). "Análisis de los parámetros de la calidad de carbón vegetal". *Revista Tecnología En Marcha*, vol.15, no. 1, pp. 16-43, 2002.
- [16] D. Patiño, and Q. Smith, 2008. "Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistemático", *Revista energética*. Vol.39, no.1, pp. 19-36, 2008.
- [17] R. García, M. Márquez, T. Aguiar, P. Arauso, A. Carballo, L. Orea, R. Zanzi, "Rendimiento de los productos de la descomposición térmica de la madera de *Eucalyptus saligna* Smith a diferentes alturas del fuste comercial". *Revista Chapingo*. Vol.15, no. 2, pp. 147-154, 2009.
- [18] J. Valverde, D. Arias, R. Campos, M. Guevara, "Caracterización física y química del carbón de tres segmentos de fuste y ramas de *Eucalyptus camadulensis* Dehnh", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. vol.16, no.20, septiembre, pp. 16-23, 2018.
- [19] F. Castro, and J. Raigosa, "Crecimiento y propiedades fisico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis*) de 17 años de edad en San Joaquín de Abangares, Costa Rica". *REDALCY*. vol.24, no.2, pp. 07-23, 2000.

- [20] FONAFIFO, "Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L. f) en Costa Rica. Heredia, Costa Rica". FONAFIFO, Costa Rica, pp. 1-25, 2003.
- [21] R. Moya, C. Tenorio, (2013). "Características de combustibilidad de diez especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica". *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol.10, no.24. Enero, pp. 26-33, 2013.
- [22] R. Serrano, R. Moya, (2011). "Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico". *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. Vol.8, no.21, septiembre, pp.1-12, 2011.
- [23] E. Ortiz, Atlas digital de Costa Rica 2014. (CD-ROM). Cartago, CR: Instituto Tecnológico de Costa Rica. 1CD-ROM, 2014.
- [24] FAO. "Performance comparativa de los sistemas de carbonización", en *Métodos simple para producir carbón vegetal*, FAO, Roma, pp.1-154, 1983
- [25] S. Canul, (2013). "Evaluación del proceso de producción de carbón vegetal elaborado en horno tipo fosa con subproductos forestales de *Piscidia piscipula* (L.) sarg. y *Lonchocarpus castillo standl*", *Universidad Autónoma de Nuevo León*, pp.1-55, 2013.
- [26] ASTM, "D4442-16 Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials (D4442-16)". *Book of Standards. Section 6.Vol 0.6.01.Pensylvania, US*, pp.224, 2016.
- [27] ASTM, "Standard Practice for Collection of a Gross Sample of Coal (D2234/D2234M)". *Book of Standards. Section 6.Vol 0.6.01.Pensylvania, US*. Pp. 224, 2017.
- [28] ASTM, "Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis (D2013/D2013M)". *Book of Standards. Section 6.Vol 0.6.01.Pensylvania, US*. Pp. 224, 2018.
- [29] ASTM. "Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal (D1762-84)". *Book of Standards. Section 6.Vol 0.6.01.Pensylvania, US*, pp.224, 2013.

- [30] ASTM. "Standard Test Method for Proximate Analysis of Coal and Coke (D3172-15)". Book of Standards. Section 6.Vol 0.6.01.Pensylvania, US, pp.224, 2015.
- [31] ASTM. "Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke (ASTM D5865)". Book of Standards. Section 6.Vol 0.6.01.Pensylvania, US, pp.224, 2013.
- [32] FAO, "Evaluación de la calidad del carbón vegetal producido en hornos retorna y hornos metálicos portátiles en el El Salvador", FAO, pp. 1-178, 1983.
- [33] S. Ayuso, (2009). "Producción de carbón vegetal mediante carboneras en zonas rurales empobrecidas". *Universidad Carlos III de Madrid*, pp.1-87 , 2009.
- [34] C. Argueta, "Descripción y análisis de dos métodos de producción de carbón vegetal en el estado de Tamaulipas, Chapingo, México". *Universidad Autónoma de Chapingo*, pp.1-51, 2006.
- [35] T. Mwampamba, M. Owen, and M. Pigaht, "Opportunities, challenges and way forward for the charcoal briquette industry in Sub-Saharan Africa".*ELSEVIER*, vol.17, no.1, Octubre, pp. 158-170, 2012.
- [36] CATIE, "Producción de carbón vegetal en la Estrella del Guarco, Cartago, Costa Rica". Costa Rica, pp. 1-84, 2018.
- [37] A. Carrillo, R. Foroughbakhch, and V. Bustamante, "Calidad del carbón de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *Ebenopsis ébano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes elaborado en horno tipo fosa". *Revista de Ciencias Forestales*, vol.4, no.17, pp. 62-71, 2013.
- [38] M. Márquez, A. Cordero, J. Rodríguez, J. Rodríguez, "Estudio del potencial energético de biomasa de *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* y *Pinus tropicalis* Morelet (PT); *Eucalyptus saligna* Smith (Es) y *Eucalyptus citriodora* HooK(Ec) y *Eucalyptus pellita* F. Muell (Ep); de la provincia del Pinar del Rio", *Revista Chapingo*, vol.7, no.1, pp. 83-89, 2001.

- [39] U. Bautista, F. Ruiz, and W. Santiago, "Evaluación de la calidad del carbón vegetal elaborado a partir de madera de encino en horno de ladrillo", *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, vol. 4, no.2, pp.127-137, 2017.
- [40] I. Ríos, J. Santos, C. Gutiérrez. "Biocombustibles sólidos: una solución al calentamiento global", *Ciencia*, vol. 68, no. 4, Octubre, pp. 1-7, 2017.
- [41] R. Murillo, A. Alvarado, J. Mark, (2015). "Concentración foliar de nutrientes en plantaciones de teca en la cuenca del Canal de Panamá". *Agronomía Costarricense*, vol.39, no.3, pp. 117-136, 2015.