

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CARBÓN DE PINO Y DE ENCINO, PRODUCIDO EN
HORNOS DE LADRILLO; GRANADOS, BAJA VERAPAZ

TESIS DE GRADO

EDIN HORACIO SIS PITÁN

CARNET 23884-07

SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ, NOVIEMBRE DE 2017

CAMPUS "SAN PEDRO CLAVER, S . J." DE LA VERAPAZ

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CARBÓN DE PINO Y DE ENCINO, PRODUCIDO EN
HORNOS DE LADRILLO; GRANADOS, BAJA VERAPAZ

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

POR

EDIN HORACIO SIS PITÁN

PREVIO A CONFERÍRSELE

EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES EN EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO

SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ, NOVIEMBRE DE 2017

CAMPUS "SAN PEDRO CLAVER, S . J." DE LA VERAPAZ

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.
VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO
VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS
SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

DECANA: LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ
SECRETARIO: MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA
DIRECTOR DE CARRERA: MGTR. JOSÉ MANUEL BENAVENTE MEJÍA

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
MGTR. EDWIN ESTUARDO VAIDES LÓPEZ

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN
MGTR. CLAUDIO ALBERTO LOPEZ RIOS
ING. JOSÉ JAVIER CÓRDOVA MÉNDEZ
ING. ROBERTO WALDEMAR MOYA FERNÁNDEZ

San Juan Chamelco, 28 de noviembre de 2017

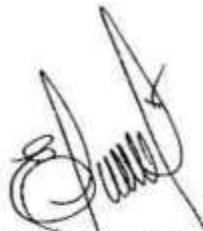
Honorable Consejo de Facultad
Ciencias Ambientales y Agrícolas
Presente.

Estimados Miembros del Consejo:

Por este medio hago constar que he asesorado el trabajo de gradación del estudiante Edin Horacio Sis Pitán, carné 2388407, titulada: "Evaluación del Rendimiento de Carbón de Pino y Encino, Producido en Hornos de Ladrillo; Granados, Baja Verapaz".

La cual considero que cumple con los requisitos establecidos por facultad, previo a su autorización de impresión.

Atentamente,



M.Sc. Edwin Estuardo Vaidés López

Colegiado No. 2556

Cod. URL 9907

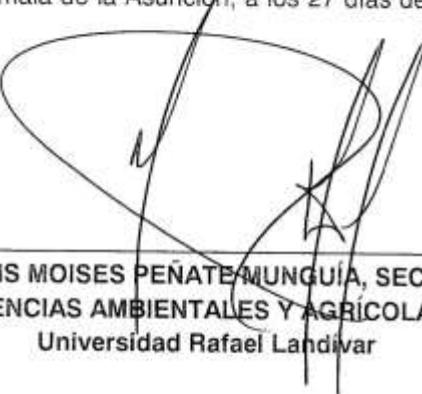
Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante EDIN HORACIO SIS PITÁN, Carnet 23884-07 en la carrera LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES, del Campus de La Verapaz, que consta en el Acta No. 06201-2017 de fecha 17 de noviembre de 2017, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CARBÓN DE PINO Y DE ENCINO, PRODUCIDO EN HORNOS DE LADRILLO; GRANADOS, BAJA VERAPAZ

Previo a conferírsele el título de INGENIERO FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 27 días del mes de noviembre del año 2017.



MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA, SECRETARIO
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
Universidad Rafael Landívar

AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Que me dio la vida, salud, sabiduría y la bendición de superarme.

A mi esposa:

María Ignacia Xitumul Jerónimo, por haberme apoyado en todo momento para poder lograr y culminar con esta investigación.

A mi asesor:

MGTR. Edwin Estuardo Vaides López, por su asesoría, revisión y corrección de la presente investigación.

A la Universidad Rafael Landívar:

Facultad de ciencias agrícolas y ambientales, por ser parte de mi formación académica.

A los señores:

Manual de Jesús Ruiz Rosales y José Odilio García García, por su apoyo incondicional brindado en el desarrollo de la presente investigación en finca las Dantas, Granados, B.V.

Al Ingeniero:

Claudio Alberto López Rios, por el apoyo incondicional en la elaboración de la presente investigación.

Al Ingeniero:

Julio Estuardo Cuellar Segovia por su apoyo incondicional, en la revisión y corrección de la presente investigación.

DEDICATORIA

A:

Dios: Que siempre me da su infinito amor, fortaleza para superar las diferentes etapas de la vida.

A mi esposa: María Ignacia Xitumul Jerónimo, quien amo con todo el corazón y es el complemento de mi vida.

A mi abuela: Dolores Tipol, por su apoyo día a día y ser la luz que ilumina mis senderos.

A mi hijo: Dereck Edín Sis Xitumul, a quien amo con todo el corazón, quien es la razón de mi esfuerzo y motivación constante de superación.

A mis tías: Aura Pitan Tipol y Cecilia Mejicanos de Sis, a quienes quiero mucho por su inmenso amor, consejos y apoyo incondicional, desarrollando el papel de madres hacia mi persona.

A mis Primos: Helder Sis Mejicanos y Everardo Sis Pop, por su apoyo incondicional para el cumplimiento de esta meta, y hacer el papel de hermanos.

A mi amigo: Axel Juan Carlos López y López por su apoyo incondicional y ser como un hermano.

ÍNDICE

RESUMEN	i
1 INTRODUCCIÓN	1
2 MARCO TEÓRICO	2
2.1 ANTECEDENTES	2
2.2 EL CARBÓN VEGETAL.....	3
2.2.1 Usos del carbon vegetal	4
2.2.2 Composición de la madera	5
2.2.3 Cómo se transforma la madera en carbón vegetal	5
2.3 ESPECIFICACIONES Y NORMATIVIDAD EN LA CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL.	8
2.3.1 Humedad	11
2.3.2 Poder calorífico.....	11
2.3.3 Carbono fijo.....	11
2.3.4 Sustancias volátiles	12
2.3.5 Cenizas.....	12
2.4 CARBÓN PARA USO DOMESTICO	13
2.5 CARBÓN METALURGICO	13
2.6 FORMAS DE FABRICAR CARBON.....	13
2.6.1 Fosas y parvas.....	13
2.6.2 Hornos carboneros	14
2.7 ESPECIES FORESTALES SELECCIONADAS	15
2.7.1 Pinus oocarpa Schiede	15
2.7.1 Quercus purulhana Trel	17
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	19
3.2 JUSTIFICACIÓN.....	20
4 OBJETIVOS	21
4.1 OBJETIVO GENERAL	21

4.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	21
5	HIPÓTESIS.....	22
5.1	HIPÓTESIS ALTERNA	22
5.2	HIPÓTESIS NULA.....	22
6	METODOLOGÍA.....	23
6.1	LOCALIZACIÓN DEL TRABAJO	23
6.2	MATERIAL EXPERIMENTAL.....	23
6.3	FACTORES ESTUDIADOS.....	23
6.4	DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS.....	24
6.5	DISEÑO EXPERIMENTAL	24
6.6	MODELO ESTADÍSTICO	24
6.6.1	Establecer las Hipótesis:.....	24
6.6.2	Cálculos de las estadísticas de prueba:.....	25
6.6.3	Definición de nivel de significancia y zona de rechazo:	25
6.7	UNIDAD EXPERIMENTAL	25
6.8	CROQUIS DE CAMPO	26
6.9	MANEJO DEL EXPERIMENTO	26
6.9.1	Actividades preliminares de campo	26
6.9.2	Actividades de aprovechamiento y medición en campo	27
6.10	VARIABLES RESPUESTA.....	29
6.10.1	Variables para evaluar el rendimiento de la producción de carbón.....	29
6.10.2	Variables para evaluar la calidad del carbón vegetal producido	31
6.10.1	Variables para evaluar la rentabilidad del carbón vegetal producido	31
6.11	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	32
7	RESULTADOS Y DISCUSION	33
7.1	RENDIMIENTO DE PROCESO	33
7.1.1	Rendimiento en peso (kg).....	33
7.1.2	Rendimiento en volumen (m ³)	36
7.2	VARIABLES DE CALIDAD DEL CARBON.....	39
7.2.1	Densidad del Carbón	39

7.2.2	Humedad del carbón.....	40
7.2.3	Material volátil del carbón	42
7.2.4	Cenizas del carbón	42
7.2.5	Carbono fijo.....	44
7.2.6	Poder calorífico del carbón	45
7.3	INDICADORES FINANCIEROS EN LA PRODUCCION DE CARBÓN VEGETAL	47
8	CONCLUSIONES	52
9	RECOMENDACIONES.....	54
10	BIBLIOGRAFÍA	56
11	ANEXOS.....	59
11.1	Hornos utilizados en la carbonización de leña de las especies de <i>Quercus purulhana</i> Trel y <i>Pinus oocarpa</i> Schiede.....	59
11.2	Toma de datos de humedad de leña de las especies de <i>Quercus purulhana</i> Trel y <i>Pinus oocarpa</i> Schiede	60
11.3	Boleta para la recolección de información en campo	61
11.4	Colecta de carbón vegetal de las especies de <i>Quercus purulhana</i> Trel y <i>Pinus oocarpa</i> Schiede.	62
11.5	Elaboración de leña de las especies de <i>Quercus purulhana</i> Trel y <i>Pinus oocarpa</i> Schiede.	63

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Efecto de la temperatura de carbonización sobre rendimientos y composición del carbón vegetal.....	7
Cuadro 2.	Requisitos de calidad del carbón vegetal para exportación.	9
Cuadro 3.	Requisitos de calidad del carbón vegetal para exportación a Alemania.	10
Cuadro 4.	Características del carbón vegetal para altos hornos en Brasil.	10
Cuadro 5.	Tratamientos evaluados para la producción de carbón vegetal en hornos de ladrillo.....	24

Cuadro 6. Volumen total de leña por repetición de cada especie evaluada en la producción de carbón vegetal.	28
Cuadro 7. Promedio de porcentaje de humedad inicia y final (al momento de ingresar al horno) por cada repetición de las dos especies evaluadas.	29
Cuadro 8. Promedio del rendimiento en peso (kg), porcentaje de conversión, porcentaje de finos y su relación; estos del carbón vegetal de la especie <i>Quercus purulhana</i> Trel.	33
Cuadro 9. Promedio del rendimiento en peso (kg), porcentaje de conversión, porcentaje de finos y su relación; estos del carbón vegetal de la especie de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede.	34
Cuadro 10. Prueba pareada de T, para la variable relación de producción en kg, en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.	35
Cuadro 11. Rendimiento en volumen m ³ ; porcentaje de conversión, porcentaje de finos y su relación en el proceso de elaboración de carbón vegetal de Encino.	37
Cuadro 12. Rendimiento en volumen m ³ ; porcentaje de conversión, porcentaje de finos y su relación en el proceso de producción de carbón vegetal de Pino.	37
Cuadro 13. Prueba pareada de T, para el rendimiento de producción en m ³ , en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.	38
Cuadro 14. Prueba pareada de T, para la densidad en g/cc, en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.	39
Cuadro 15. Prueba pareada de T, para la humedad en (% en peso), en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.	41
Cuadro 16. Prueba pareada de T del Material Volátil (% en peso), en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.	42
Cuadro 17. Prueba pareada de T de Cenizas en (% en peso), en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.	43
Cuadro 18. Prueba pareada de T de Carbono Fijo en (% en peso), en el proceso de producción de carbón vegetal utilizando hornos.	44
Cuadro 19. Prueba pareada de T del poder calorífico en (Kcal/Kg), en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de regla de decisión de aceptación o rechazo de hipótesis nula.	25
Figura 2. Croquis de campo del experimento, luego de definir la prueba de hipótesis con medias poblacionales dependientes o pareadas, donde los tratamientos se definieron como:	26
Figura 3. Tonel de metal, mediante el cual se calculó el volumen en m ³ de carbón producido por cada repetición.....	30
Figura 4. Prueba de medias de la relación de producción de kg de leña para producir 1 kg de carbón vegetal para las 2 especies evaluadas.....	35
Figura 5. Prueba de medias del rendimiento de producción en m ³ de carbón vegetal obtenidos por cada m ³ de leña ingresada al horno, para las 2 especies evaluadas.....	38
Figura 6. Prueba de medias de densidad en g/cc de carbón vegetal obtenidos para las 2 especies evaluadas.....	40
Figura 7. Prueba de medias de humedad en % en peso de carbón vegetal obtenidos para las 2 especies evaluadas.....	41
Figura 8. Prueba de medias de cenizas en porcentaje de peso de carbón vegetal obtenidos para las 2 especies evaluadas.	44
Figura 9. Carbono fijo en % en peso de carbón vegetal obtenidos para las 2 especies evaluadas.....	45
Figura 10. Poder calorífico en Kcal/Kg en peso de carbón vegetal obtenidos para las 2 especies evaluadas.....	46
Figura 11. Análisis financiero para la producción de carbón de <i>Quercus purulhana</i> Trel, a partir de 1 m ³ de leña ingresada al horno de ladrillo.	48
Figura 12. Análisis financiero para la producción de carbón de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, a partir de 1 m ³ de leña ingresada al horno de ladrillo.	49
Figura 13. Costos directos, indirectos e ingreso bruto por producción, encontrados dentro del proceso de la elaboración de carbón vegetal de 1 metro cúbico de las especies <i>Quercus purulhana</i> Trel y <i>Pinus oocarpa</i> Schiede en hornos de ladrillo.	50

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CARBÓN DE PINO Y DE ENCINO, PRODUCIDO EN HORNOS DE LADRILLO; GRANADOS, BAJA VERAPAZ.

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación fue establecer las diferencias de rendimiento y calidad que presenta el carbón vegetal producido en horno de ladrillo. Las especies evaluadas fueron *Quercus purulhana* Trel y *Pinus oocarpa* Schiede, Las variables analizadas fueron; peso, volumen, humedad, poder calorífico, cenizas, carbón fijado y materiales volátiles. La información fue analizada mediante pruebas de hipótesis de dos medias poblacionales dependientes; la unidad experimental fue de 1 m³ de leña. El mejor rendimiento de conversión fue observado en la especie *Pinus* con promedio de 38%, mientras que en volumen la especie *Quercus* mostro un rendimiento de 47.63%. La calidad del carbón obtenido de ambas especies es similar, en algunas variables deficientes para los requerimientos internacionales. La humedad para las dos especies se califica como aceptable, encontrándose por debajo del máximo de 5%, los materiales volátiles no son adecuados ya que son mayores a los valores aceptables. Para el porcentaje de cenizas presentes solo el *Pinus* está dentro del rango aceptable 1 a 4%, con un valor de 1.18 % y *Quercus* 4.72%, en relación al carbón fijado no se obtuvo un valor ideal para su exportación mayor al 75%, el *Pinus* y *Quercus* contienen 71.3%, el poder calorífico se encuentra dentro del rango ideal, el *Pinus* con 7176 Kcal/kg y *Quercus* con 6571 Kcal/kg. En el aspecto económico, la especie que mejor relación Beneficio/Costo mostró fue *Quercus* con utilidad neta de Q265.81 en comparación a un Q75.35 para *Pinus*.

1 INTRODUCCIÓN

En Guatemala la utilización de carbón vegetal ha ido en aumento, pues según estudios realizados, el mismo se usa principalmente para combustible doméstico, esto promueve que silvicultores produzcan y utilicen métodos de producción más efectivos y convencionales como los hornos mejorados. Sin embargo, anteriormente fueron utilizados métodos tradicionales tipo fosa, en el cual la producción era de menor estándar y calidad.

La calidad del carbón vegetal se define según algunas de sus propiedades, y en cierto modo todas están interrelacionadas, pero se miden y se valúan por separado. Dentro de las principales propiedades químicas que definen su calidad, se pueden considerar los siguientes: carbón fijo, material volátil, cenizas, contenido de humedad y poder calorífico, dichas propiedades se determinan mediante análisis de laboratorio, expresados en porcentajes.

El departamento de Baja Verapaz, específicamente los municipios de Rabinal, Santa Cruz El Chol y Granados, forman parte de los municipios a nivel nacional con la mayor producción de carbón vegetal, distribuyéndose la mayor parte en el mercado local y nacional. En la actualidad el carbón ha crecido en importancia para la economía de las comunidades de los municipios mencionados, para su producción utilizan leña de las especies Encino y Pino.

Devenido de lo anterior, es evidente la necesidad de impulsar acciones y realizar estudios que mejoren y fortalezcan los conocimientos en la producción de carbón vegetal, con el fin de obtener una producción provechosa para los productores. La presente investigación aporta la evaluación de un método de producción en Horno de ladrillo, con la finalidad de generar información valiosa respecto al rendimiento, calidad y rentabilidad de carbón vegetal con las especies de *Quercus purulhana* Trel y *Pinus oocarpa* Schiede.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Se realizó la evaluación del proceso de carbonización y calidad del carbón de *Acacia caven* (mol.) Mol., producido en hornos de barro, el objetivo general fue evaluar el proceso de carbonización y la calidad del carbón de espino que se produce en Chile con hornos de barro, el cual se llevó a cabo en la finca Quilamutay, donde se concluyó que la carbonización con hornos de barro es una actividad de baja eficiencia y baja productividad, con escasa tecnología, y uso poco racional de los recursos que no contribuyen al desarrollo sustentable de dicha actividad, de lo que se desprende la importancia de mejorar las condiciones de dicha actividad con nuevas y más eficientes tecnologías, con un rendimiento de 23.1 % sobre materia seca (Pacheco, 2005).

Una investigación realizada en México estudió la “Descripción y Análisis de dos Métodos de Producción de Carbón Vegetal”, donde se identificó elementos fisiográficos del área de estudio e hizo algunas consideraciones sobre su importancia en la producción de carbón vegetal en el área, concluyó que de acuerdo a la comparación económica entre las dos técnicas utilizadas, la mayor relación beneficio-costos la tiene el sistema de fosas con \$1,178.10/tonelada, superior a la del horno de tierra con \$1,428.57/tonelada y en cuanto a rendimiento el de fosa tiene una conversión de leña de 6.5 m³/tonelada de carbón en promedio y el de tierra de 7 m³/tonelada (Argueta, 2006).

En Honduras se estudió la factibilidad para la Producción de Carbón Vegetal, el objetivo general fue determinar la rentabilidad para la producción de carbón en Honduras (Santa Bárbara Sula, cerro Guatemala). Donde se realizó un análisis de la cartera de clientes actuales de la empresa con el cual determinó que la demanda insatisfecha del carbón con la cartera de clientes de la empresa es de 575 contenedores anuales. Concluye que el proyecto presenta índices de rentabilidad apropiados para tomar la decisión de realizar la inversión. El punto de equilibrio es de 935 toneladas vendidas a un precio de \$306, el precio de equilibrio es de \$277, lo que nos indica el precio puede disminuir un 9% (Abascal, 2011).

Bran (2007). En El Progreso Guatemala estudió "Determinación de rendimientos de Carbón Vegetal" en bosques de encino, empleando dos métodos de producción. Con el objeto de Evaluar el rendimiento, calidad y rentabilidad de carbón vegetal, a través de dos métodos de producción, realizado en finca denominada Corral Viejo, en el municipio de Sansare, El Progreso, con especie forestal *Quercus peduncularis* Neé, concluyó que por cada tratamiento, obtuvo rendimiento de 37.05% en horno mejorado tipo cajón y 29.20%, el tiempo promedio de producción de un metro cúbico de carbón vegetal en horno tipo cajón es de 9.44 días, en el horno tipo fosa de 15.53 días, con diferencia entre tratamientos de 6.09 días, por tanto al utilizar un horno mejorado tipo cajón con mejor alternativa financiera reflejando una rentabilidad del 95% en comparación con un 72% en un horno tradicional tipo fosa.

También, Díaz (2009). En El Progreso Guatemala estudió la implementación de un sistema de Producción de Carbón y Briqueta eco amigable en la finca Cruz, el Progreso Guatemala, con el objeto de sistematizar los procesos llevados a cabo en la empresa Fomentos S.A. El cual se realizó en la Finca Cruz, de El Progreso. La metodología utilizada fue la sistematización de experiencias. Concluye que en la fase actual, se han implementado planes de seguridad industrial, se aumentaron las ventas en un 57%, se logró mantener ingreso de materia prima durante todo el año, y ahora los bosques de la región cuentan con planes de manejo aprobados por el INAB, con los beneficios del PINFOR.

2.2 EL CARBÓN VEGETAL

FAO (1983), establece que el residuo sólido que queda cuando se "carboniza" la madera, en condiciones controladas, en un espacio cerrado, como es el horno de carbón. El control se hace sobre la entrada del aire, durante el proceso de pirolisis o de carbonización, para que la madera no se quemara simplemente en cenizas, como sucede en un fuego convencional, sino que se descomponga químicamente para formar el carbón vegetal.

2.2.1 Usos del carbón vegetal

Según Bran (2007), el carbón vegetal es quizá el primer material de carbón utilizado por el hombre y su uso data probablemente desde el mismo momento en que se comienza a utilizar el fuego; dado que los trozos de madera carbonizada que quedarían en algunas hogueras pueden considerarse un carbón vegetal rudimentario.

Otro uso fundamental del carbón vegetal en la historia de la humanidad es su empleo en la metalurgia. Es la iniciada ya unos 1,200 años a.C. y se desarrolla en Europa durante la “edad del hierro” (700 años a.C. hasta 68 años d.C.), no hubiese sido posible sin el carbón vegetal ya que las elevadas temperaturas que se requieren para fundir los minerales no pueden alcanzarse utilizando simplemente madera o los combustibles de la edad del hierro. Además, el carbono que contiene el carbón vegetal actúa como reductor de los óxidos del metal que forman los minerales y con la técnica apropiada parte de este carbono puede alearse con el hierro para dar lugar al acero, mucho más duro que el hierro, lo cual fue fundamental en el desarrollo de armas y herramientas más resistentes (Bran, 2007).

El uso del carbón vegetal en metalurgia ha perdurado hasta nuestros días, aunque otros combustibles como el coque metalúrgico lo han reemplazado casi por completo, en la actualidad y especialmente en países con abundantes recursos forestales y economías en desarrollo existe un resurgimiento del uso del carbón vegetal en metalurgia, dado que además su uso representa, al menos en principio, un menor impacto ambiental que el del coque metalúrgico (Bran, 2007).

Bran (2007), indica que otra de las aplicaciones del carbón vegetal es la fabricación de pólvora. La pólvora negra se compone de un 75% de salitre (nitrato de potasio), un 12% de azufre y un 13% de carbón vegetal. Estos ingredientes al quemarse producen un gas que tiende a ocupar un volumen 400 veces mayor que la mezcla original, produciendo una fuerte presión en las paredes del recipiente que los contiene.

El carbón vegetal se usa mayoritariamente como combustible, no solo de uso doméstico sino también industrial, especialmente en los países en vías de desarrollo (Bran, 2007).

FAO (1983). Señala que el carbón vegetal es una fuente de energía renovable, lo que aumenta su interés como combustible. No obstante, la producción de carbón vegetal por métodos artesanales tiene un importante impacto ambiental que es necesario disminuir mediante el uso de métodos industriales con control de emisiones.

2.2.2 Composición de la madera

El comportamiento de la madera en la carbonización puede ser representado por la sumatoria de los comportamientos aislados de sus tres componentes que son: Celulosa, hemicelulosa y lignina. Sus efectos interactivos algunas veces pueden despreciarse y el estudio de cada uno representa una buena aproximación del fenómeno como un todo. (OLADE/MEM, 1983).

2.2.3 Cómo se transforma la madera en carbón vegetal

La fase de la carbonización puede ser decisiva en la fabricación de carbón vegetal, a menos que se complete lo más eficientemente posible, puede crear un riesgo para la operación global de la producción de carbón, puesto que los bajos rendimientos en la carbonización repercuten a lo largo de toda la cadena de producción, en la forma de mayores costos y desperdicios de los recursos (FAO, 1983).

a. El agua es absorbida o retenida como moléculas de agua en la estructura celulosa/lignina. La madera secada al aire ó "estacionada" contiene todavía 12- 18% de agua absorbida. La madera en crecimiento, recientemente cortada ó "no estacionada", contiene además agua líquida, llevando el contenido total de agua a alrededor del 40-100%, expresado en porcentaje del peso de la madera seca al horno (FAO, 1983).

b. Antes que la carbonización ocurra, el agua en la madera tiene que ser totalmente eliminada como vapor. Se necesita una gran cantidad de energía para

evaporar el agua, por lo que, si se deja al sol para el pre secado de la madera antes de la carbonización, se mejora mucho la eficiencia. El agua que queda en la madera que tiene que ser carbonizada, deberá ser evaporada o en la fosa o en el horno, y ésta energía deberá proporcionarse quemando parte de la misma madera, que podría ser transformada en carbón vegetal aprovechable.

c. El primer paso, de la carbonización en el horno, es secar la madera a 100 °C. o menos, hasta un contenido cero de humedad, se aumenta luego la temperatura de la madera secada al horno alrededor de 280 °C. La energía para estas etapas viene de la combustión parcial de parte de la madera cargada en el horno o en la fosa.

d. Cuando la madera está seca y calentada alrededor de 280 °C comienza espontáneamente a fraccionarse, produciendo carbón más vapor de agua, ácido acético y compuestos químicos más complejos, fundamentalmente en la forma de alquitranes y gases no condensables, que consisten principalmente en hidrógeno, monóxido y bióxido de carbono. Se deja entrar aire en el horno o fosa de carbonización para que parte de la madera se queme, y el nitrógeno estará también presente en el gas. Este proceso de fraccionamiento espontáneo o carbonización, continúa hasta que queda sólo el residuo carbonizado llamado carbón vegetal. A menos que se proporcione más calor externo, el proceso se detiene y la temperatura alcanza un máximo de aproximadamente 400 °C., sin embargo, este carbón contiene todavía apreciables cantidades de residuos alquitranosos, junto con las cenizas de la madera original.

e. El contenido de cenizas en el carbón es de alrededor del 30% en peso, y el balance es carbono fijo, alrededor del 67-70%. Un ulterior calentamiento aumenta el contenido de carbono fijo, eliminando y descomponiendo aún más los alquitranes. Una temperatura de 500 °C da un contenido típico de carbono fijo de alrededor del 85% y un contenido de materia volátil de cerca del 10%. A esta temperatura, el rendimiento del carbón es de aproximadamente el 33% del peso de la madera secada al horno carbonizada, sin contar la madera que ha sido quemada para carbonizar el remanente.

f. El rendimiento teórico del carbón vegetal varía con la temperatura de carbonización, debido al cambio de contenido de material volátil alquitranado. En el cuadro 1 se muestra el efecto de la temperatura final de carbonización sobre el rendimiento y composición del carbón vegetal.

Cuadro 1. Efecto de la temperatura de carbonización sobre rendimientos y composición del carbón vegetal.

Temperatura de carbonización °C	Análisis químico del carbón		Rendimiento de carbón sobre masa seca al horno (0% de humedad)
	% de carbono fijo	% de material volátil	
300	68	31	42
500	86	13	33
700	92	7	30

(FAO, 1983 citado por Bran, 2007).

Bajas temperaturas de carbonización dan un mayor rendimiento en carbón vegetal, pero de baja calidad, que es corrosivo, por contener alquitranes ácidos, y que no quema con una llama limpia sin humo. Un buen carbón vegetal comercial debería contener carbono fijo alrededor del 75% para lo cual se requiere una temperatura final de carbonización de alrededor de 500 °C (FAO, 1983 citado por Bran, 2007).

El rendimiento del carbón muestra también cierta variación con respecto al tipo de madera, hay cierta evidencia de que el contenido de lignina en la madera tiene un efecto positivo sobre el rendimiento del carbón; un alto contenido de lignina da un elevado rendimiento de carbón vegetal. Una madera densa tiende también a dar un carbón denso y fuerte, la que es también deseable. Sin embargo, madera muy densa produce a veces carbón friable puesto que la madera tiende a desmenuzarse durante la carbonización. La friabilidad del carbón se eleva con el incremento de la temperatura de carbonización y el contenido de carbono fijo aumenta mientras que el contenido de sustancias volátiles decrece. Una temperatura de 450-500 °C ofrece un equilibrio óptimo entre friabilidad y el deseo de un elevado contenido de carbono fijo (FAO, 1983 citado por Ordaz, 2003).

2.3 ESPECIFICACIONES Y NORMATIVIDAD EN LA CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL.

Entre los indicadores tradicionales de la calidad del carbón vegetal, cuenta el sonido metálico que da cuando golpea con un objeto duro y la fractura lisa al romperse, carece de sabor y olor, no mancha objetos que se froten contra la superficie de la fractura, enciende fácilmente y arde sin producir humo. El carbón tiene poca tendencia a absorber colores, gases y olores (Servicio Forestal de México, 1964 citado por Bran, 2007).

Las proporciones óptimas de los componentes químicos de un carbón, para considerarlo de buena calidad, debe estar dentro de los rangos siguientes:

Humedad	2 – 4 %
Materias volátiles	18 – 23 %
Cenizas	1 – 4 %
Carbono fijo	74 – 81 %

Carbón con cantidades relativamente bajas de cuerpos volátiles y en consecuencia con mayor contenido de carbón fijo, es deseable para usos industriales especializados, al poseer un carbón más del 24% de cuerpos volátiles se produce humo al arder. La especie de madera influye en la calidad química del carbón, la densidad y estructura de dicha especie influye en la calidad física del carbón (Servicio Forestal de México, 1964 citado por Bran, 2007).

Para apreciar los usos y calidad del carbón vegetal es preciso conocer sus propiedades físicas y químicas, ya que dicha calidad se define según algunas de sus propiedades y, si bien, todas en cierto modo están interrelacionadas, se miden y se valúan por separado (FAO, 1983 citado por Ordaz, 2003).

Dentro de las principales características que definen la calidad y el uso del carbón vegetal, se pueden considerar los contenidos porcentuales de: carbono fijo, material volátil, cenizas, contenido de humedad, rendimiento leña-carbón y poder calorífico (Pérez y Compean, 1989 y Sánchez, 1996 citado por Ordaz, 2003).

Sánchez (1997), expone que la calidad del carbón vegetal en México presenta variación, prefiriéndose para el consumo nacional con características a simple vista, como: pesado, que no esté húmedo, no se resquebraje fácilmente, tenga brillo, no despida humos, dure suficiente tiempo encendido y que tenga un tamaño aceptable, además de la especie o tipo de madera.

Luego prosigue y expone que, para exportación se deben cumplir ciertos requerimientos de los países compradores, ya que existen estándares y normas que regulan su calidad, agrupándose generalmente en bloques o mercados regionales, tales como: Asiático, Europeo y de América del Norte. Las especificaciones requeridas se presentan en el cuadro siguiente.

Cuadro 2. Requisitos de calidad del carbón vegetal para exportación.

PROPIEDAD	PORCENTAJE (%)
Humedad.	7-8
Ceniza Mínima.	5
Ceniza Máxima.	6
Materia volátil mínimo.	10
Materia volátil máximo.	12
Carbono fijo mínimo.	75
Carbono fijo máximo.	82

(Sánchez 1997, citado por Ordaz, 2003).

En mercado Alemán HIBA (1986), especifica cuales valores de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo se requieren para cumplir con los requerimientos de éste, tal como se especifica en el cuadro siguiente.

Cuadro 3. Requisitos de calidad del carbón vegetal para exportación a Alemania.

Propiedad	Porcentaje (%).
Humedad.	7.14
Ceniza Mínima.	3.73
Ceniza Máxima.	4.02
Materia volátil mínimo.	14.66
Materia volátil máximo.	15.79
Carbono fijo mínimo.	74.47
Carbono fijo máximo.	80.19

(HIBA 1986, citado por Ordaz, 2003).

FAO (1983), citado por Pérez y Compean (1989), presentan las características del carbón vegetal requeridos por altos hornos en Brasil, tal como se especifica en el cuadro siguiente.

Cuadro 4. Características del carbón vegetal para altos hornos en Brasil.

Composición física del carbón vegetal por peso base seco	Variaciones		Promedio Anual (%).	Carbón vegetal considerado bueno a excelente (%).
	Máximo (%).	Mínimo (%).		
Carbono fijo	80	60	70	75 - 80
Cenizas	10	3	5	3 - 4
Sustancia volátil.	26	15	25	20 - 35

(FAO, 1983 citado por Ordaz, 2003).

La norma alemana CEN/TC/281 (1996), para carbón y briquetas además de establecer los métodos para la determinación de valores porcentuales de humedad, materiales volátiles, cenizas y carbón fijo, también especifica los valores mínimos aceptados de estos en el continente europeo, los cuales se enuncian a continuación.

- Carbono fijo. El carbono fijo en el carbón vegetal seco deberá tener un mínimo del 80 % en peso.

- Cenizas. El contenido de cenizas en el carbón vegetal seco no debe exceder más del 5 %.
- Humedad. El contenido de humedad en el carbón vegetal no deberá exceder más del 8 %.
- Material volátil. No presenta algún contenido mínimo

2.3.1 Humedad

Aldana (2002), define la humedad en el carbón vegetal como la cantidad de agua o de otros líquidos impregnados o contenidos en el carbón. Así mismo Pérez y Compean (1989), la definen como la relación porcentual existente entre la diferencia de pesos del carbón vegetal (seco y húmedo) sobre el peso seco del mismo.

Marcos (1989), clasifica con tres tipos de saturación al carbón vegetal de acuerdo a sus porcentajes de humedad, como: carbón vegetal seco al aire si su humedad esta entre 4 y 9.5 % (en base húmeda), carbón vegetal húmedo si ésta entre 10 y 15 % y mojado si su humedad es mayor del 15 %. Es evidente que el carbón vegetal con un elevado contenido de humedad (10 % ó más) tiende a desmenuzarse y produce cisco cuando se calienta en las fundiciones, lo que no es deseable en la producción de hierro.

2.3.2 Poder calorífico

Se define como poder calorífico el número de calorías liberadas en la combustión completa de una unidad de masa del combustible, siendo expresado en Kcal/kg para combustibles sólidos. El valor calorífico de la leña varía desde unos 2,800 a 4900 Kcal/kg, que al transformarse en carbón ésta energía, se concentra por unidad de peso y se eleva a rangos entre los 6,500 a 8,300 Kcal/kg, lo cual depende de la especie, su densidad específica, contenido de lignina y otros aceites esenciales. (Villagrán, 2009).

2.3.3 Carbono fijo

Pérez y Compean (1989), dicen que el carbono fijo puede definirse como la cantidad de carbono elemental que contiene un material de prueba.

Con una carbonización lenta y a alta temperatura se eliminará casi todas las sustancias volátiles y entonces el contenido fijo de carbono es alto (del 90 % aproximadamente); la carbonización rápida y a baja temperatura dará un carbón vegetal con más sustancias volátiles, y por consiguiente, con un menor contenido fijo de carbono.

El contenido de carbono fijo en el carbón vegetal varía desde un mínimo del 50 % hasta uno elevado del 95 %, en cuyo caso el carbón vegetal consiste principalmente en carbono. El contenido de carbono fijo es el componente más importante en metalurgia, puesto que el carbono fijo es el responsable de la reducción de los óxidos de hierro en el hierro fundido durante su producción.

2.3.4 Sustancias volátiles

La materia volátil en el carbón vegetal comprende todos los residuos líquidos y alquitranosos que no fueron eliminados completamente durante el proceso de carbonización (Ordaz, 2003).

Pérez y Compean (1989), citado por Ordaz (2003), comentan que el carbón vegetal con mucha materia volátil se enciende fácilmente pero al quemar produce humo. En cambio FAO (1983), citado por Ordaz (2003), abunda al respecto y comenta que el carbón vegetal de pocos volátiles tiene dificultades al encenderse y su combustión es muy limpia. Un buen carbón vegetal comercial puede tener un contenido de sustancia volátil neta (libre de humedad) del 30 % aproximadamente. El carbón con mucha sustancia volátil es menos quebradizo que el carbón común de fuerte combustión con poco volátil por lo que produce menos cisco durante el transporte y los manipuleos. Es también más higroscópico y tiene por lo tanto un mayor contenido de humedad natural.

2.3.5 Cenizas

Marcos (1989) y Earl (1975), comparten la opinión de que el contenido de cenizas, es directamente proporcional a la cantidad de materia inorgánica de la madera original y es lo que quedaría si la carga de madera fuera incinerada a peso constante.

Pérez y Compean (1989), comparten el comentario de que el contenido de cenizas en el carbón vegetal varía desde alrededor del 0.5 % a más del 5 %, dependiendo de la especie de madera, la cantidad de corteza incluida con la madera en el horno y la cantidad de contaminación con tierra y arena. Típicamente, un pedazo de buen carbón vegetal tiene un contenido de cenizas de alrededor del 3 %.

2.4 CARBÓN PARA USO DOMESTICO

Brito y Barrichelo (1981), citados por Ordaz (2003), concuerdan que el carbón vegetal para uso doméstico, debe ser suave, fácilmente inflamable, no estallar y emitir el mínimo de humos posible. Puede ser obtenido a bajas temperaturas (350 a 400 °C) y su composición química no tiene mucha importancia.

2.5 CARBÓN METALURGICO

Brito y Barrichelo (1981), citados por Ordaz (2003), señalan que el carbón vegetal es utilizado en la reducción de mineral de hierro en altos hornos, fundición y otros. La preparación de este tipo de carbón demanda técnicas más elaboradas, la carbonización debe conducirse a altas temperaturas (mínimo 650 °C) y un proceso de larga duración. En este carbón vegetal se exigen normas mínimas de calidad: desde el punto de vista mecánico debe ser denso, no quebradizo, y tener buena resistencia; en cuanto a su composición química, en la combustión debe presentar bajo contenido de cenizas, baja tasa de materiales volátiles y tener un mínimo de 80 % de carbono fijo.

2.6 FORMAS DE FABRICAR CARBON

2.6.1 Fosas y parvas

Desde la antigüedad se ha fabricado carbón usando métodos muy artesanales y empíricos. La utilización de la tierra como escudo contra el oxígeno y para aislar la madera que se carboniza contra una pérdida excesiva de calor, es el sistema más antiguo de carbonizar y con seguridad se remonta al amanecer de la historia. Aún en la actualidad se usa para hacer quizás, más carbón vegetal que por cualquier otro método. Tiene muchos inconvenientes pero retiene obviamente su lugar por sus ventajas de bajo costo. Donde sea que los árboles crecen hay tierra, y es natural que el

ser humano se ha orientado a este material barato e incombustible, como material aislante para encerrar la madera mientras se carboniza (Villagrán, 2009).

Hay dos modos comunes de usar la tierra como barrera en la fabricación de carbón vegetal; una es la de excavar una Fosa o Trinchera, rellenarla de madera y taparla con la tierra excavada para aislar la cámara. La otra es levantar una Pila (llamada parva) de madera sobre el suelo, tapar con tierra como aislante para impermeabilizar a los gases. En la mayoría de casos estos métodos dependen de la habilidad del carbonero para obtener un buen carbón, dentro de sus limitaciones tecnológicas aunque sea de baja eficiencia (Villagrán, 2009).

Las fosas y parvas no tienen medida estándar y se pueden construir desde 1 metro cúbico y obtener carbón en dos días, hasta fosas muy grandes que pueden tardar hasta tres meses en su proceso de carbonización y enfriamiento. La inversión en capital es mínima; no necesita nada más que una pala, un hacha y una caja de fósforos, pero lamentablemente, es un sistema de alto desperdicio y derroche del recurso forestal, ya que la mayoría de veces tiene una relación de 1:8 en algunos casos se logra una parte de carbón de regular calidad por 6 partes de leña usada. Estos métodos han sido estudiados y se les ha tratado de hacer mejoras, introduciendo el uso de chimeneas externas o centrales con lo que se ha mejorado la velocidad y calidad de carbonización y han sido el paso hacia el diseño de hornos para producir carbón (Villagrán, 2009).

2.6.2 Hornos carboneros

Existen una serie de diseños de hornos usados en todo el mundo desde pequeños, medianos y grandes. Desde los de bajo costo, hasta los más sofisticados, de altos costos de construcción y mantenimiento. Los hornos más comunes y adaptables a nuestra realidad son los de mampostería de ladrillo, también llamados de albañilería, sin embargo los hay de otros materiales como concreto armado, de metal, inclusive portátiles (Villagrán, 2009).

Para tener éxito, el horno de ladrillo debe satisfacer una cantidad de requisitos importantes. Tiene que ser sencillo en su construcción, que las tensiones térmicas al calentarse y enfriarse, relativamente no lo afecten, y que sea suficientemente robusto para aguantar las tensiones mecánicas de la carga y descarga. Por un período de seis a diez años no se perjudican a causa de las lluvias o del clima.

Se debe poder, en cualquier momento, controlar la entrada de aire y durante la fase de enfriamiento, sellar el horno rápida y herméticamente para impedir el ingreso de oxígeno a la cámara. El horno debe permitir –por ser relativamente liviano- un enfriamiento fácil y asegurar un buen aislamiento térmico a la madera sometida a carbonización, puesto que de lo contrario se producirían puntos fríos por el golpe del viento sobre las paredes del horno, que impide la combustión correcta del carbón y una producción excesiva de tizones y bajo rendimiento. La capacidad del horno de ladrillo de conservar el calor de carbonización, es una razón importante de su gran eficiencia en la conversión de madera a carbón vegetal (Villagrán, 2009).

2.7 ESPECIES FORESTALES SELECCIONADAS

A continuación se describen brevemente las dos especies forestales seleccionadas para su utilización en el proyecto de carbonización.

2.7.1 *Pinus oocarpa* Schiede

Taxonomía:

Clase: Equisetopsida C. Agardh

Subclase: Pinidae Cronquist, Takht. Y W. Zimm.

Orden: Pinales Gorozh.

Familia: Pinaceae Spreng. ex Rudolphi

Género: *Pinus* L.

Árbol que alcanza alturas de 45 m y DAP de hasta 1 m, con fuste recto y cilíndrico. Copa: irregular, ramas finas y relativamente ralas, las inferiores horizontales, las superiores más ascendentes. Corteza: color rojizo oscuro a grisáceo, fuertemente

fisurada, se exfolia en bandas largas e irregulares, escamosas. Hojas: en forma de aguja, en grupos de cinco (ocasionalmente 3 o 4), de 14-25 cm de largo, erguidas, gruesas y ásperas, con bordes finamente aserrados. Flores: pequeñas, en inflorescencias terminales en la parte superior de la copa, y las masculinas en las ramas inferiores. Frutos: los conos son fuertes y pesados, ovoides a globosos, de 5-10 cm de largo, de color café oscuro, a veces con tinte verdoso, lustrosos, con escamas leñosas, en grupos de dos a tres en la rama. Las semillas son triangulares, pequeñas (4- 7 mm de longitud), color café oscuro, con una ala membranosa color café de 10-12 mm de largo (CATIE, 2003).

Ecología: La especie forma rodales puros en muchos sitios a lo largo de su rango natural, a menudo asociada con robles y otras especies de pino. Se ha encontrado a altitudes desde 200 hasta 2500 msnm, pero alcanza su mejor desarrollo de 600 a 1800 msnm. En su ambiente natural las temperaturas son de 13 a 23°C y las precipitaciones de 650- 2000 mm, con una época seca de 5-6 meses. Ocasionalmente se le encuentra en áreas donde la precipitación alcanza los 3000mm. Es una especie pionera que se adapta a diferentes tipos de suelo, erosionados e infértiles, delgados, arenosos, pedregosos y accidentados, de ácidos a neutros (4.5-6.8), pero con buen drenaje. Alcanza su mejor desarrollo en suelos profundos y donde la precipitación anual supera los 1200 mm. La especie parece estar asociada a la ocurrencia de fuegos, que aparentemente ayudan a su establecimiento exitoso. Sin embargo, si la frecuencia es demasiado alta (tal y como sucede hoy en día) la regeneración y futura productividad de los pinares se ve amenazada (CATIE, 2003).

Distribución natural: *P. oocarpa* se extiende desde México hasta el noreste de Nicaragua. En Guatemala, Honduras, Nicaragua y El Salvador representa la especie dominante de los bosques de pino (CATIE, 2003).

Usos: La madera es de gran versatilidad y puede usarse en construcción en general (pisos, paredes interiores, puertas, marcos de ventanas), postes de conducción eléctrica, pilotes, durmientes (tratados), cajas, embalajes, molduras, decoración,

chapas, contrachapado, juguetes, artesanías, artículos deportivos y mueblería. También se utiliza como leña. De la resina se obtienen productos como el aguarrás y la calofonia, sustancia sólida utilizada como materia prima para otros productos, como cosméticos. También se utiliza para fines medicinales y como ornamental (CATIE, 2003).

Mercado y oportunidades: Los modelos de manejo y aprovechamiento desarrollados en Guatemala con esta especie, para diferentes calidades de sitio, muestran a la especie creciendo en sitios de calidad I y II, con edades de rotación técnica entre 48 y 87 años. Los resultados de un estudio realizado en los departamentos de Comayagua y Olancho en Honduras indican que la calidad de la madera de esta especie es excelente para pulpa, tableros de fibras, usos estructurales, carpintería y ebanistería. La gravedad específica de la madera es 0.42, considerada como moderada y el contenido de extractivos es bajo (4.5%) (CATIE, 2003).

2.7.1 *Quercus purulhana* Trel

Quercus purulhana Trel.; Mem. Natl. Acad. Sci. 20: 63. 1924.

Sinonimia: *Q. aguana* Trel.; *Q. barbeyana* Trel.

Nombre Común: Roble

Taxonomía:

Clase: Equisetopsida C. Agardh

Subclase: Magnoliidae Novák ex Takht.

Super orden: Rosanae Takht.

Orden: Fagales Engl.

Familia: Fagaceae Dumort.

Género: *Quercus* L.

Se conoce también como los sinónimos *Q. aguana* Trel.; *Q. barbeyana* Trel. El nombre común más utilizado es Roble, pertenece al orden Fagales, familia Fagaceae.

Son Árboles: 6–20 m de alto, corteza: áspera, amarillo-gris a casi negra; tallos: densamente tomentosos con tricomas fasciculados cubriendo totalmente la superficie, glabros y café-rojizos el segundo año, con prominentes lenticelas blancas; yemas ovadas, 4–7 mm de largo y 3–4 mm de ancho. Hojas: elípticas a obovadas, 13–19 cm de largo y 5.5–10 cm de ancho, ápice redondeado a subagudo, base redondeada a subcordada, margen entero a undulado-lobado, raramente dentado, puntas de los dientes engrosadas y curvadas hacia abajo producidas por el nervio marginal y los secundarios, nervio marginal involuto, haz escasamente puberulenta con tricomas multi radiados esparcidos, el nervio principal y los nervios secundarios densamente pubescentes cerca de la base, envés densamente cubierto con tricomas glandulares escasos, multi radiados, fusionados y estrellados, 16–22 pares de nervios secundarios, hundidos en la haz, el nervio principal y los nervios secundarios prominentes en el envés y glabros con la edad, los nervios terciarios ligeramente impresos en la haz, prominentes en el envés, coriáceas; pecíolos 4–8 mm de largo, estípulas lineares, 9–12 mm de largo, densamente pubescentes. (Trelease, Stevens, Ulloa, Pool y Montiel, 2001).

Inflorescencias estaminadas: 4–8 cm de largo, perianto 1–5 mm de largo, pubescente por fuera a lo largo del margen, glabro por dentro, bractéola 2–3 mm de largo; inflorescencias pistiladas: 1.5–4 cm de largo, con 1–4 flores. (Trelease, et al., 2001).

Frutos: 1–3 madurando en el raquis, pedúnculo 10–25 mm de largo; cúpula levemente hemisférica, 9–11 mm de alto y 12–18 mm de ancho en el orificio, escamas ovadas, 2.5–4 mm de largo, ápice agudo y aplicado, densamente tomentulosas, engrosadas en la base, café-rojizas; nuez 12–17 mm de largo y 8–11 mm de ancho, 40–75% incluida en la cúpula, ápice agudo a redondeado, apiculado; pericarpo glabro en la superficie interior. (Trelease, et al, 2001).

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

A nivel nacional existen diferentes sistemas de producción de carbón vegetal y la tecnología disponible de hornos de carbón tiene varias décadas de haberse originado, sin embargo en Guatemala, han sido muy poco difundidos y mucho menos, adoptados por los productores.

Baja Verapaz produce una cantidad significativa de carbón vegetal. Uno de los municipios de incidencia en el tema es Granados, en donde los silvicultores lo producen con el método tipo fosa, el cual es conocido desde hace muchos años, por su fácil manipulación.

Últimamente algunos productores han implementado hornos de ladrillo para mejorar su proceso de producción, pero carecen de información que le sirva de base para guiar sus actividades productivas así como la toma de decisiones sobre el manejo de los productos forestales y mejorar sus ingresos económicos a partir de los rendimientos, calidad y la rentabilidad en la producción de carbón vegetal producido.

Las especies con las que se produce carbón son demandados por su uso energético y maderable, siendo las especies de pino y encino las predominantes en el área y las autorizadas por el Instituto nacional de bosques (INAB), para producción de leña y por ende su transformación a carbón.

3.2 JUSTIFICACIÓN

En Guatemala, la producción de carbón vegetal se realiza mediante conocimientos tradicionales aún más en zonas rurales y su comercialización se realiza en las zonas o áreas urbanas.

El principal problema que afecta al tema del carbón son los bajos rendimientos en la carbonización, que se reflejan en altos costos de producción y poca eficiencia en el uso de los recursos. Además, no existe información sobre calidad y rentabilidad en la producción de carbón vegetal en hornos de ladrillo, que pueda permitir a los productores aumentar su competitividad en los mercados locales y nacionales.

Debido a las exigencias y competitividad del mercado se tuvo la necesidad de adoptar el método de producción con hornos mejorados, al mismo tiempo ofrecer, generar y documentar información básica sobre rendimientos, calidad y rentabilidad de carbón vegetal, resultado de la utilización de hornos de ladrillo y que puedan servir de base para los productores de carbón de la región y el país.

En finca Sin Nombre ubicado en las Dantas, municipio de Granados, se cuenta con un inventario forestal general y se planteó un plan de manejo con fines de aprovechamiento forestal, el cual se está ejecutando. Este plan solamente consideró la extracción primaria para trozas de aserrío y el cálculo de producción de "leña" asciende a 1,853.03 m³ para todo el plan, el cual será transformado a carbón.

Por tal razón se determinaron la calidad, el rendimiento y la rentabilidad de carbón de cada uno de las especies forestales, y con ello poder definir cuál de las especies cumple con los estándares de calidad fisicoquímicas que exigen los mercados locales y nacionales.

El beneficio que se obtuvo en este trabajo de investigación, es determinar el rendimiento, rentabilidad de la transformación de leña a carbón de las especies de pino y encino, implementando hornos de ladrillo mejorado.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el rendimiento y la calidad del carbón vegetal para las especies de Encino (*Quercus purulhana* Trel) y Pino (*Pinus oocarpa* Schiede), producidos en horno de ladrillo, en finca Las Dantas, municipio de Granados departamento de Baja Verapaz.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Evaluar el Rendimiento del carbón vegetal de las especies de Encino (*Quercus Purulhana* Trel) y Pino (*Pinus oocarpa* Schiede), utilizando horno de ladrillo.

Evaluar la Calidad del carbón vegetal de las especies de Encino (*Quercus Purulhana* Trel) y Pino (*Pinus oocarpa* Schiede), utilizando horno de ladrillo

Evaluar la rentabilidad en la producción del Carbón Vegetal de las especies de Encino (*Quercus Purulhana* Trel) y Pino (*Pinus oocarpa* Schiede), utilizando horno de ladrillo.

5 HIPÓTESIS

5.1 HIPÓTESIS ALTERNA

Existen **DIFERENCIAS** estadísticamente significativas en el rendimiento del carbón vegetal proveniente de las especies de Encino (*Quercus purulhana* Trel) y Pino (*Pinus oocarpa* Schiede), producido en horno de ladrillo.

Existen **DIFERENCIAS** estadísticamente significativas en la calidad del carbón vegetal proveniente de las especies de Encino (*Quercus purulhana* Trel) y Pino (*Pinus oocarpa* Schiede), producido en horno de ladrillo.

5.2 HIPÓTESIS NULA

No existen **DIFERENCIAS** estadísticamente significativas en el rendimiento del carbón vegetal proveniente de las especies de Encino (*Quercus purulhana* Trel) y Pino (*Pinus oocarpa* Schiede), producido en horno de ladrillo.

No existen **DIFERENCIAS** estadísticamente significativas en la calidad del carbón vegetal proveniente de las especies de Encino (*Quercus purulhana* Trel) y Pino (*Pinus oocarpa* Schiede), producido en horno de ladrillo.

6 METODOLOGÍA

6.1 LOCALIZACIÓN DEL TRABAJO

El área donde se realizó la investigación se localiza en la región conocida como Las Dantas, jurisdicción del municipio de Granados, Departamento de Baja Verapaz, geográficamente en Latitud Norte: 14° 49´ 15.5” y Longitud Oeste: 90° 33´ 26.0”, propiedad del señor Manuel de Jesús Ruíz Rosales. El área de estudio se encuentra en una masa forestal regular, conformada por bosque mixto de dos especies principales, siendo estas Encino (*Quercus purulhana* Trel) y Pino (*Pinus oocarpa* Schiede). La masa forestal tiene una extensión de 66.86 hectáreas, la que fue seleccionada por poseer características representativas de la zona de producción de carbón en la Región Forestal II, conocida como Las Verapaces. Al momento de la evaluación, la finca contaba con una licencia de manejo forestal aprobada por el Instituto Nacional de Bosques -INAB-.

6.2 MATERIAL EXPERIMENTAL

Se definió como material experimental la leña utilizada en el proceso de producción de carbón vegetal de las dos especies evaluadas, detallados a continuación:

- **Leña de encino** (*Quercus purulhana* Trel): Para el proceso de carbonización, con resultado final el carbón vegetal.
- **Leña de pino** (*Pinus oocarpa* Schiede): Para el proceso de carbonización, con resultado final el carbón vegetal.
- **Horno de ladrillo**: Infraestructura donde se realizó el proceso de cocido. (Ver fotografías del horno en Anexo 1)

6.3 FACTORES ESTUDIADOS

Los factores estudiados en la presente investigación se basan en variables que determinan las características, la calidad y la rentabilidad del proceso, resumiendo todas estas en 3 importantes:

- Calidad del Carbón Vegetal producido
- Rendimiento del Carbón Vegetal producido

- Rentabilidad del Carbón vegetal producido

6.4 DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

La investigación se basó en evaluar la producción de carbón de dos especies, siendo estas las más utilizadas en la zona de estudio, considerando cada una de estas como un tratamiento. En el cuadro 5 se detallan los tratamientos evaluados.

Cuadro 5. Tratamientos evaluados para la producción de carbón vegetal en hornos de ladrillo.

No. De Tratamientos	Código de Tratamiento	Descripción del Tratamiento
1	T1	Horneado de leña de Encino (<i>Quercus purulhana</i> Trel)
2	T2	Horneado de leña de Pino (<i>Pinus oocarpa</i> Schiede)

6.5 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la presente investigación se implementó una “Prueba de hipótesis estadística acerca de dos medias poblacionales dependientes o pareadas”, utilizando un mismo tipo de horno, en la cual se efectuó la producción de carbón vegetal a partir de leña. Cada uno de los tratamientos se repitió 8 veces, para poder tener valores importantes para el análisis de resultados.

6.6 MODELO ESTADÍSTICO

Para esta evaluación de la Prueba de hipótesis, se procede con algunos procedimientos importantes, que se detallan a continuación:

6.6.1 Establecer las Hipótesis:

Para este caso, se definieron las hipótesis a evaluar, siendo estas las siguientes:

Ho: $\mu_D = \mu_Q - \mu_P = 0$; que define que la media de las diferencias de las variables evaluadas en la producción de carbón con las dos especies es igual a cero.

Ha: $\mu_D = \mu_Q - \mu_P \neq 0$; que define que la media de las diferencias de las variables evaluadas en la producción de carbón con las dos especies es diferente de cero (López & González, 2016).

6.6.2 Cálculos de las estadísticas de prueba:

Para esta evaluación se utilizaron los siguientes estadísticos de prueba:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

$$S_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}}$$

$$t_o = \frac{\bar{d} - \mu_D}{S_{\bar{d}} / \sqrt{n}}$$

6.6.3 Definición de nivel de significancia y zona de rechazo:

Se utilizó un nivel de significancia de 0.05 (valor “p”) para una prueba bilateral y 7 grados de libertad (n-1); teniendo en este caso como valor crítico de la tabla “t” Student 2.365. En la figura 1, se muestra de forma gráfica esta definición.

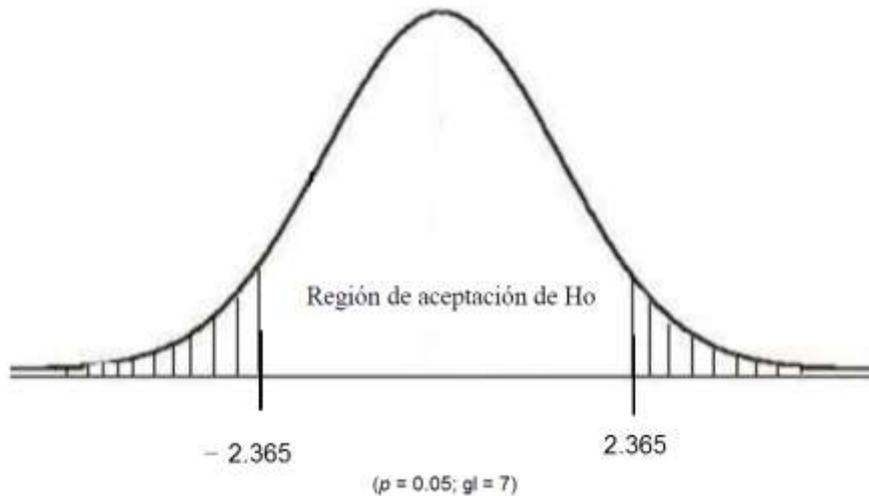


Figura 1. Gráfico de regla de decisión de aceptación o rechazo de hipótesis nula (López & González, 2016).

6.7 UNIDAD EXPERIMENTAL

Cada unidad experimental consistió en un horno de ladrillo, al cual se le adicionó la leña para el proceso de quemado para obtener carbón vegetal, por cada especie. En total con los 2 tratamientos y 8 repeticiones, se establecieron 16 unidades experimentales (López & González, 2016).

6.8 CROQUIS DE CAMPO

Con la finalidad de describir de forma esquemática el diseño en campo de la evaluación se presenta la figura 2 la forma en que se evaluaron los 2 tratamientos.

TRATAMIENTOS		REPETICIONES
A	B	I
A	B	II
A	B	III
A	B	IV
A	B	V
A	B	VI
A	B	VII
A	B	VIII

Figura 2. Croquis de campo del experimento, luego de definir la prueba de hipótesis con medias poblacionales dependientes o pareadas, donde los tratamientos se definieron como:

A = Horneada de leña de la especie de *Quercus purulhana* Trel

B = Horneada de leña de la especie de *Pinus oocarpa* Schiede.

6.9 MANEJO DEL EXPERIMENTO

Con la finalidad de llevar un orden en la ejecución del experimento evaluado, se llevaron a cabo las siguientes actividades.

6.9.1 Actividades preliminares de campo

- **Identificación de la especie de encino:** Se procedió en campo a recolectar muestras de hojas, flores, frutos y corteza de la especie de Encino (género

Quercus; Familia: Fagaceae) evaluada, por constituirse en órganos y tejidos para identificar la especie, los cuales se trasladaron en un herbario, al laboratorio de la Universidad Rafael Landívar, en el campus San Pedro Claver, S.J; con la especie de Pino, se identificó de forma directa en campo, con ayuda de una clave para coníferas de Guatemala.

- **Identificación de los hornos:** Con el fin de estandarizar el mismo tipo de horno, para el experimento, para las dos especies evaluadas, se procedió a identificar los hornos utilizados para la carbonización de leña de las especies de Encino y Pino utilizadas, considerando que tuvieran las mismas características.

6.9.2 Actividades de aprovechamiento y medición en campo

- **Delimitación del área de aprovechamiento:** Se delimitó un área específica en hectáreas de la licencia forestal autorizada en la finca, señalizando el perímetro con pintura color rojo para su identificación, con el fin de que las otras actividades de producción de la finca no interfirieran en los resultados de la investigación.
- **Selección de corta:** Se realizó el marcaje de árboles a aprovechar, sobre la base del porcentaje de intervención aprobada por el INAB, tomando en cuenta que los árboles de las dos especies tienen similares características.
- **Cosecha de la leña:** Con una motosierra se realizó el apeo de los árboles y se procedió al troceado del producto leña, que después fue utilizado para la carbonización. Las dimensiones que se establecieron para el troceado fueron de leños de más de 5 cm de diámetro en el medio del trozo, con una longitud de 50 cm.
- **Cálculo de volumen en metros cúbicos de leña:** Se utilizó la fórmula de Huber, midiendo cada pieza a utilizar en el proceso antes de introducir estos al horno.

$$\text{Volumen} = \pi/4 * (D')^2 * L$$

Dónde:

V = Volumen en metros cúbicos.

π = Constante matemática de “pi”.

D' = Diámetro en metros a la mitad del leño.

L = Longitud del leño en metros.

En el cuadro 6 se muestra el volumen de leña cubicado previo a ingresarlo a cada uno de los hornos para las dos especies evaluadas.

Cuadro 6. Volumen total de leña por repetición de cada especie evaluada en la producción de carbón vegetal.

LEÑA DE ENCINO		LEÑA DE PINO	
REPETICIÓN	VOL INICIAL DE LEÑA (m ³)	REPETICIÓN	VOL INICIAL DE LEÑA (m ³)
I	1.00	I	1.00
II	1.00	II	1.05
III	1.01	III	1.02
IV	1.01	IV	1.00
V	1.00	V	1.01
VI	1.01	VI	1.03
VII	1.07	VII	1.04
VIII	1.00	VIII	1.01
TOTAL	8.09	TOTAL	8.15

- **Apilamiento de leña:** Para facilitar el llenado del horno se colocó la leña a una distancia de 5 metros al costado del horno para su fácil traslado; en el llenado se procedió a ingresar en la base diámetros y longitudes menores y sucesivamente diámetros y longitudes mayores para facilitar el llenado.
- **Determinación de humedad de la leña:** Se seleccionó toda la leña de cada una de los dos tratamientos. Posteriormente, se determinó el contenido de humedad a cada unidad de muestra con un medidor de humedad marca EXTECH, modelo MO230, en tres diferentes secciones a lo largo de cada pieza

de leña, tomados al momento del corte de la leña y al momento de ingresar la leña al horno, con un tiempo de secado al aire libre de 15 días para ambas especies. (Ver fotografías de la toma de datos de humedad en Anexo 2)

Los resultados de esta evaluación de la humedad de la leña al momento de cortarla y al momento de ingresarla al horno, se presenta en el cuadro 7.

Cuadro 7. Promedio de porcentaje de humedad inicial y final (al momento de ingresar al horno) por cada repetición de las dos especies evaluadas.

Repetición	Porcentaje de humedad de Encino		Porcentaje de humedad de Pino	
	Inicial	Final	Inicial	Final
I	31%	15%	23%	13%
II	38%	18%	28%	12%
III	50%	15%	35%	11%
IV	54%	18%	33%	12%
V	52%	15%	35%	11%
VI	52%	14%	36%	12%
VII	53%	18%	36%	12%
VIII	51%	18%	36%	12%
Promedio	48%	16%	33%	12%

Como se observa en el cuadro 7, la leña de encino presenta los mayores porcentajes de humedad al momento de cortarla y también mayor humedad al momento de ingresarla al horno, después de los 15 días que se tuvo secando al aire.

6.10 VARIABLES RESPUESTA

Se definieron variables respuesta para responder a cada uno de los objetivos planteados en la presente investigación, describiendo estas en ese mismo orden.

6.10.1 Variables para evaluar el rendimiento de la producción de carbón

Para evaluar el rendimiento del proceso, se determinó mediante la relación comparativa entre la cantidad de leña ingresada a cada repetición y carbón vegetal resultante del

proceso de carbonización, evaluado ambos volúmenes en metros cúbicos y peso en Kg. Las variables definidas para evaluar estos rendimientos se detallan a continuación.

- **Cuantificación del carbón obtenido en volumen:** La cuantificación se efectuó por volumen de carbón comercial producido, con el siguiente procedimiento: Se colocó el total de carbón comercial producido por repetición en un recipiente de metal tipo silo o tonel con capacidad total de 0.099 metros cúbicos, para obtener el volumen real al cual se le aplicó un factor de conversión de espaciado de 0.60 (INAB, 2004), obteniendo así el volumen de carbón vegetal por repetición en m^3 . En la figura 3 se muestra el esquema del cilindro utilizado para la evaluación del volumen producido.

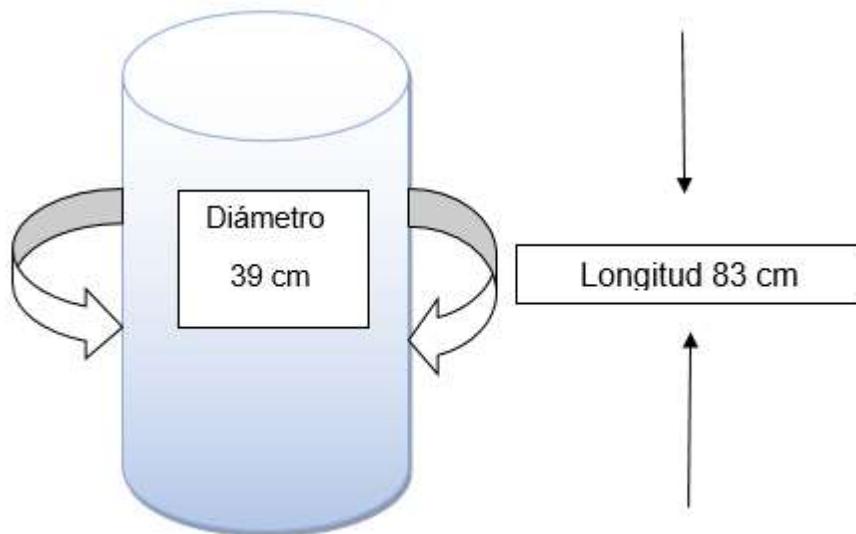


Figura 3. Tonel de metal, mediante el cual se calculó el volumen en m^3 de carbón producido por cada repetición.

- **Cuantificación del carbón obtenido en peso:** Esta variable se obtuvo mediante la medición del peso con una balanza, tomando primero el peso de la leña a ingresar al horno y el peso del carbón vegetal resultante del proceso, expresado en kg para cada repetición.

6.10.2 Variables para evaluar la calidad del carbón vegetal producido

La calidad del carbón se evaluó considerando las siguientes variables:

- **Humedad:** Contenido de humedad de la muestra, expresado en porcentaje (%).
- **Contenido de cenizas:** Materias no combustibles encontradas en la muestra, expresada en porcentaje (%).
- **Materiales Volátiles:** Materias que se perdieron durante el proceso de quema de carbón, y es relacionado al contenido de materias que se volatilizan en siete minutos a 950 grados centígrados, expresado en porcentaje (%).
- **Carbono fijo:** Es la diferencia entre el 100% del peso de la muestra y los porcentajes de materias volátiles + cenizas.
- **Poder calorífico:** Número de calorías liberadas en la combustión completa de una unidad de masa combustible, siendo expresada en kcal por kg.

Esto se llevó a cabo trasladando muestras de dos libras de carbón por repetición de cada tratamiento, para el análisis que se llevó a cabo en laboratorio del Ministerio de Energía y Minas, la cual se evaluó en varios criterios.

6.10.1 Variables para evaluar la rentabilidad del carbón vegetal producido

Para dar respuesta al tercer objetivo planteado, se determinó cuál es la especie con la producción más propicia en función a los indicadores de costos directos e indirectos, ingreso de producción, ingreso neto, evaluadas a partir de analizar la información financiera. Para este análisis se tomaron en cuenta costos de producción.

- **Valor de la madera en pie (Q.):** Este se obtuvo de la tabla de especies y valores de la madera en pie por región, publicado por el Instituto Nacional de Bosques -INAB- mediante Resolución No. JD. 06.28.2015; Acta No. JD.31.2016.
- **Costos de producción de la leña (Q.):** para esta variable se tomaron en cuenta los siguientes costos:
 - o Costos de apeo y producción de leña y
 - o Costo de arrastre hacia el horno de carbón.

- **Costos de operación de la carbonización (Q.):** Carga, operación y descarga.
- **Ingresos por venta de carbón (Q.):** Venta de carbón producido por metro cúbico a precio de mercado.
- **Ingreso bruto de la producción:** Variable que incluye el ingreso obtenido por la actividad sin descontar los costos de producción
- **Utilidad neta:** Variable que representa los valores obtenidos de la diferencia entre los ingresos y los costos por unidad de medida.
- **Rentabilidad por especie evaluada:** Variable expresada en porcentaje, para representar la rentabilidad de la producción de carbón para cada una de las especies evaluadas.

6.11 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para efectuar el análisis de la información se tabularon las variables de rendimiento peso en kg, rendimiento volumen en m³, densidad, humedad, Material Volátil, Cenizas, Carbón Fijo y Poder Calorífico del carbón vegetal, en una hoja electrónica, para luego ser analizadas con la ayuda del software estadístico (INFOSTAT ®) en donde se elaboraron graficas de barras con el fin de hacer las evaluaciones de cada una de las variables obtenidas.

Para el caso del análisis financiero, se utilizó una matriz de costos e ingresos generada en una hoja electrónica a partir de la cual se generaron las variables financieras de Costos directos, Costos indirectos, Ingreso bruto por producción, Costo total, Utilidad neta y Rentabilidad y las comparaciones para la discusión de los resultados obtenidos.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestran los resultados obtenidos por repetición indicando el rendimiento volumétrico (metro cúbico) y peso en kg del producto forestal ingresado al horno versus el carbón vegetal obtenido; así mismo, las variables que determinan la calidad del carbón vegetal tales como: Porcentaje de humedad, contenido de cenizas, materiales volátiles, carbón fijo y poder calorífico, además las variables financieras que determinaron la rentabilidad de producir cada una de las especies.

7.1 RENDIMIENTO DE PROCESO

7.1.1 Rendimiento en peso (kg)

En el manejo del experimento se tuvieron los siguientes resultados en peso inicial de leña y peso final de carbón de cada horneada pudiendo calcular con estos datos, el rendimiento de conversión de leña a carbón, así como una relación del % de carbonilla o finos generados en cada caso, mostrando los datos obtenidos en el cuadro 8 para Encino (*Quercus purulhana* Trel) y en el cuadro 9 para Pino (*Pinus oocarpa* Schiede).

Cuadro 8. Promedio del rendimiento en peso (kg), porcentaje de conversión, porcentaje de finos y su relación; estos del carbón vegetal de la especie *Quercus purulhana* Trel.

REPETICIÓN	PESO LEÑA INICIAL (Kg)	PESO CARBÓN FINAL (Kg)	PORCENTAJE DE CONVERSION %	RELACION	FINOS %
I	1134.091	169.091	14.91	1:6.7	7.25
II	1246.818	238.182	19.10	1:5.2	7.25
III	1051.818	239.091	22.73	1:4.4	6.84
IV	929.091	274.545	29.55	1:3.4	9.43
V	1265.455	201.364	15.91	1:6.3	6.55
VI	1121.818	319.545	28.48	1:3.5	7.54
VII	1010.909	245.455	24.28	1:4.1	2.22
VIII	960.909	217.727	22.66	1:4.4	3.13
PROMEDIO	1090.114	238.125	22.20	1:4.8	6.28

Cuadro 9. Promedio del rendimiento en peso (kg), porcentaje de conversión, porcentaje de finos y su relación; estos del carbón vegetal de la especie de *Pinus oocarpa* Schiede.

REPETICIÓN	PESO LEÑA INICIAL (Kg)	PESO CARBÓN FINAL (Kg)	PORCENTAJE DE CONVERSION	RELACION	FINOS
I	827.727	327.95	39.62	1:2.52	3.05
II	880.909	327.95	37.23	1:2.69	4.15
III	862.273	329.09	38.17	1:2.62	2.76
IV	786.364	282.73	35.95	1:2.78	5.63
V	899.091	287.73	32.00	1:3.12	4.27
VI	774.091	328.18	42.40	1:2.36	3.46
VII	820.000	320.45	39.08	1:2.56	4.25
VIII	861.818	345.45	40.08	1:2.49	2.37
PROMEDIO	839.034	318.693	38.07	1:2.64	3.74

El rendimiento del carbón vegetal, en peso, está determinado por la relación del peso del carbón vegetal obtenido y el peso de leña ingresada al horno, expresado en porcentaje, encontrando que en peso existe un mayor rendimiento en la producción de carbón de pino (*Pinus oocarpa* Schiede).

Según los datos anteriores, en general con la especie de *Quercus purulhana* Trel, en promedio se obtuvo una relación de una parte de carbón por cada 4.76 partes de leña, equivalente a un 22.20% de rendimiento de conversión. Para la especie de *Pinus oocarpa* Schiede se obtuvo una relación de una parte de carbón por cada 2.64 partes de leña, equivalentes a 38.07% de rendimientos de todos los tratamientos en la conversión de leña a carbón vegetal.

En cuanto a la obtención de carbón, se generó cierto porcentaje de finos, que por su tamaño de partículas no es utilizado y se compone de cenizas, polvo de carbón y pequeños pedazos de carbón no mayores de 25 mm, al hacer las mediciones, el porcentaje más alto se generó en *Quercus purulhana* Trel con 6.28% y el carbón que

produjo menos finos fue *Pinus oocarpa* Schiede con 3.74%. FAO, reporta rangos aceptables de finos entre 10 y 20% por lo que lo obtenido en este estudio está ajustado a esos parámetros.

En la figura 4, se presenta la comparación a partir de una prueba de T pareada, mostrando diferencias entre la variable relación de producción, expresada a partir de la relación de cuantos kg de leña se requieren para producir un kg de carbón vegetal, incluyendo los finos.

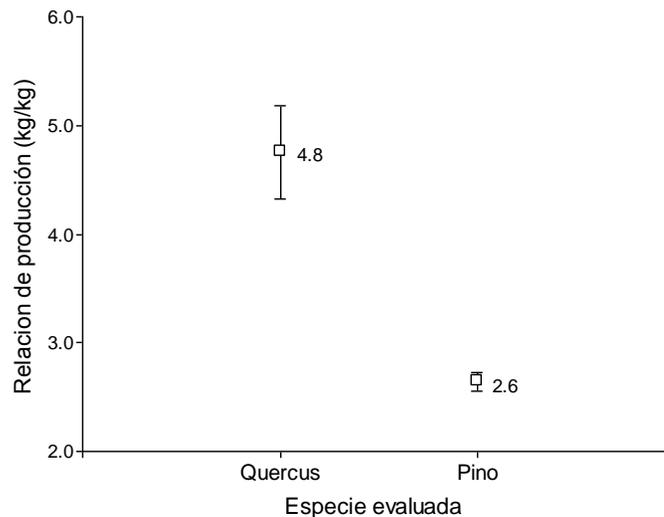


Figura 4. Prueba de medias de la relación de producción de kg de leña para producir 1 kg de carbón vegetal para las 2 especies evaluadas.

En el cuadro 10, se presenta la prueba de “t” pareada para las dos especies evaluadas, tomando en consideración las 8 repeticiones de cada evaluación, para una prueba bilateral, obteniendo un valor de p menor a 0.05 (0.0013), lo que indica la diferencia en el rendimiento para las dos especies.

Cuadro 10. Prueba pareada de T, para la variable relación de producción en kg, en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.

Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	LI (95%)	LS (95%)	T	Bilateral
2.11	4.76	2.64	1.15	1.15	3.07	5.19	0.0013

Nota: 1 hace referencia a *Quercus* y 2 a *Pino*.

Comparando los resultados generales obtenidos el rendimiento más bajo se obtuvo en la producción de carbón de encino (*Quercus purulhana* Trel) con 22.20% y la más alta se obtuvo en el carbón de pino (*Pinus oocarpa* Schiede) con 38.07%. La leña de pino (*Pinus oocarpa* Schiede) presenta un 16% más de eficiencia en su conversión a carbón que la leña de encino (*Quercus purulhana* Trel). FAO en 1983, establece que, en estudios realizados en Guyana, se obtuvo una relación de una parte de carbón por cada 3.56 partes de leña, equivalentes a un 28% de conversión, mostrando valores intermedios a los obtenidos en esta investigación.

Cabe resaltar que las dos especies evaluadas, se secaron en las mismas condiciones y tiempos, y el encino fue ingresado al horno con 16% de humedad y el pino con 12%, lo que significa que en condiciones similares de secado la leña de *Quercus purulhana* Trel presenta mayor humedad y eso influye en el rendimiento a carbón, considerando la relación de producción en peso.

7.1.2 Rendimiento en volumen (m³).

En el manejo del experimento se obtuvieron resultados en volumen inicial de leña en m³ y volumen final en m³ de carbón de cada proceso de horneado, a partir de los cuales se calcularon el rendimiento de conversión de leña a carbón, la relación del % de carbonilla o finos generados en cada caso, mostrando estos datos en los cuadros 11 y 12.

El rendimiento del carbón vegetal, en volumen, está determinado por la relación del volumen de carbón vegetal obtenido y el volumen de leña ingresado al horno, expresado en porcentaje, encontrando que en volumen existe un similar rendimiento para las dos especies, contrario a lo encontrado con el rendimiento en peso.

De acuerdo a los resultados obtenidos, con la especie de *Quercus purulhana* Trel, en promedio se obtuvo una relación de una parte de carbón vegetal obtenido por cada 2.14 partes de leña ingresadas, equivalente a un 47.63% de rendimiento de conversión. Para la especie de *Pinus oocarpa* Schiede se obtuvo una relación de una parte de

carbón por cada 2.19 partes de leña, equivalentes a un 45.89% de rendimiento en la producción.

Cuadro 11. Rendimiento en volumen m³; porcentaje de conversión, porcentaje de finos y su relación en el proceso de elaboración de carbón vegetal de Encino.

REPETICIÓN	VOLUMEN INICIAL (m ³)	VOLUMEN FINAL (m ³)	PORCENTAJE DE CONVERSION (%)	RELACION	FINOS %
I	1.00	0.338	33.82	1:2.95	7.40
II	1.00	0.487	48.84	1:2.05	6.57
III	1.01	0.500	49.44	1:2.02	8.40
IV	1.01	0.493	48.85	1:2.02	10.14
V	1.00	0.453	45.38	1:2.21	5.29
VI	1.01	0.574	56.90	1:1.75	7.49
VII	1.07	0.519	48.52	1:2.06	3.08
VIII	1.00	0.494	49.28	1:2.02	3.64
PROMEDIO	1.013	0.482	47.63	1:2.14	6.50

Cuadro 12. Rendimiento en volumen m³; porcentaje de conversión, porcentaje de finos y su relación en el proceso de producción de carbón vegetal de Pino.

REPETICIÓN	VOLUMEN INICIAL (m ³)	VOLUMEN FINAL (m ³)	PORCENTAJE DE CONVERSION (%)	RELACION	FINOS %
I	1.002	0.476	47.52	1:2.10	10.08
II	1.049	0.459	43.78	1:2.28	15.68
III	1.017	0.516	50.68	1:1.97	8.72
IV	1.000	0.416	41.64	1:2.40	18.75
V	1.008	0.468	46.45	1:2.15	12.82
VI	1.028	0.476	46.29	1:2.16	6.30
VII	1.039	0.433	41.69	1:2.40	9.70
VIII	1.006	0.494	49.11	1:2.04	4.85
PROMEDIO	1.019	0.467	45.89	1:2.19	10.86

En referencia a los porcentajes de finos obtenidos, hay más en relación al volumen de carbón en pino que en encino, lo cual es una desventaja en los sistemas de producción, porque se pueden considerar pérdida si no se les consigue mercado.

Como se observa en la figura 5, la comparación a partir de una prueba de T pareada, muestra que no se presentan diferencias entre la variable rendimiento, expresada a partir de la relación de cuantos m³ de carbón se producen por cada m³ de leña ingresado en el proceso del horneado.

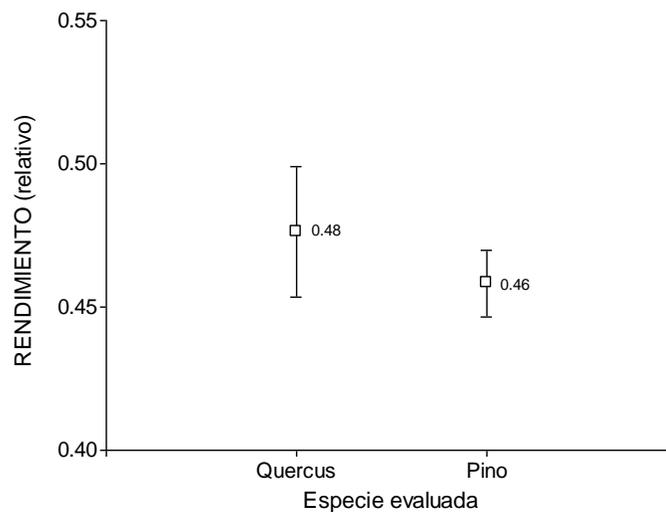


Figura 5. Prueba de medias del rendimiento de producción en m³ de carbón vegetal obtenidos por cada m³ de leña ingresada al horno, para las 2 especies evaluadas.

En el cuadro 13, se presenta la prueba de “t” pareada para las dos especies evaluadas, tomando en consideración las 8 repeticiones de cada evaluación, para una prueba bilateral, obteniendo un valor de p mayor a 0.05 (0.5288).

Cuadro 13. Prueba pareada de T, para el rendimiento de producción en m³, en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.

Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	LI (95%)	LS (95%)	T	Bilateral
0.02	0.48	0.46	0.08	-0.05	0.08	0.66	0.5288

Nota: 1 hace referencia a *Quercus* y 2 a Pino.

Con esta prueba se puede ver que no existen diferencias en la producción de carbón vegetal, considerando el rendimiento en volumen. Esta comparación es importante, debido que permite diferenciar la evaluación del rendimiento en volumen, que depende en gran medida de la densidad de la madera y de la humedad con la que se ingresa la leña en el proceso de horneado para la producción de carbón.

7.2 VARIABLES DE CALIDAD DEL CARBON

En los cuadros 14 al 19, se presentan los resultados de las pruebas estadísticas de densidad y las variables que determinan la calidad del carbón vegetal producido en horno mejorado de las especies de *Quercus purulhana* Trel y *Pinus oocarpa* Schiede, utilizando el software (INFOSTAT ®).

7.2.1 Densidad del Carbón

En el manejo del experimento se obtuvieron resultados en volumen final de carbón en m³ y peso en kg de carbón de cada proceso de horneado, a partir de los cuales se calcularon las densidades. En el cuadro 14, se presenta la prueba de “t” pareada para las dos especies evaluadas, tomando en consideración las 8 repeticiones de cada evaluación, para una prueba bilateral, obteniendo un valor de p menor a 0.0001.

Cuadro 14. Prueba pareada de T, para la densidad en g/cc, en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.

Media (dif)	Media (1)	Media (2)	DE (dif)	LI (95%)	LS (95%)	T	Bilateral
-0.19	0.49	0.68	0.05	-0.24	-0.14	-9.8	<0.0001

Nota: 1 hace referencia a *Quercus* y 2 a Pino.

Como el valor "p" (bilateral) de la prueba de T es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula; por lo que se puede llegar a concluir que existen diferencias entre las medias de densidad del carbón de *Quercus purulhana* Trel y *Pinus oocarpa* Schiede, siendo el segundo el de mayor densidad.

La densidad del carbón vegetal es una propiedad física importante, ya que densidades altas suponen a igualdad de peso, volúmenes pequeños; por lo tanto, una disminución de costos a la hora de transportar el producto (Marcos, 1989). Para Ordaz (2003), en parte el carbón vegetal obtenido a baja temperatura suele ser más denso que el que se obtiene a alta temperatura debido a que contiene más sustancias volátiles las cuales disminuyen progresivamente conforme aumenta la temperatura de carbonización superior; los valores observados en general son altos y se pueden considerar buenos. Para este caso en particular las dos especies se ornearon a similares temperaturas.

La densidad resultante después del orneado del carbón muestra diferencias significativas con respecto a la relación g/cc (Figura 6).

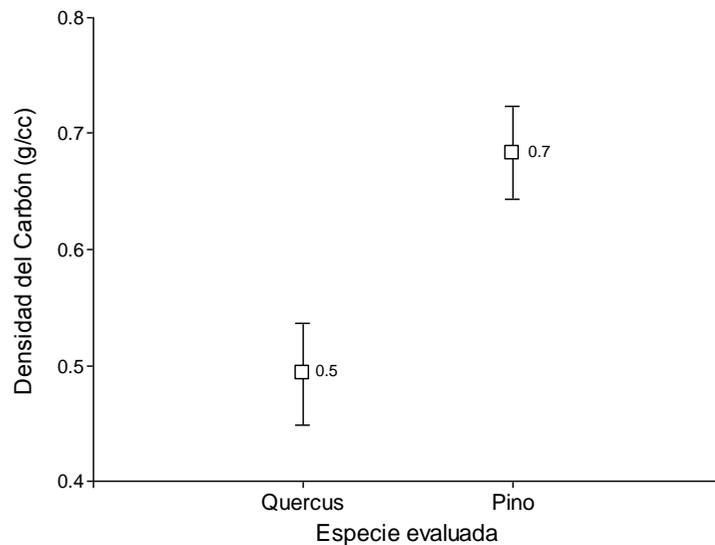


Figura 6. Prueba de medias de densidad en g/cc de carbón vegetal obtenidos para las 2 especies evaluadas.

7.2.2 Humedad del carbón

La humedad del carbón obtenido es una variable importante en la calidad de este producto. En el cuadro 15, se presenta la prueba de “t” pareada para las dos especies evaluadas, para una prueba bilateral, obteniendo un valor de p de 0.4768.

Cuadro 15. Prueba pareada de T, para la humedad en (% en peso), en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.

Media (dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	LI (95%)	LS (95%)	T	Bilateral
0.25	3.96	3.71	0.95	-0.54	1.05	0.75	0.4768

Nota: 1 hace referencia a *Quercus* y 2 a Pino.

Como el valor "p" (bilateral) de la prueba de T es mayor a 0.05, se acepta la hipótesis nula, que se interpreta como la no existencia en las diferencias de esta variable en el carbón obtenido para las dos especies (Figura 7).

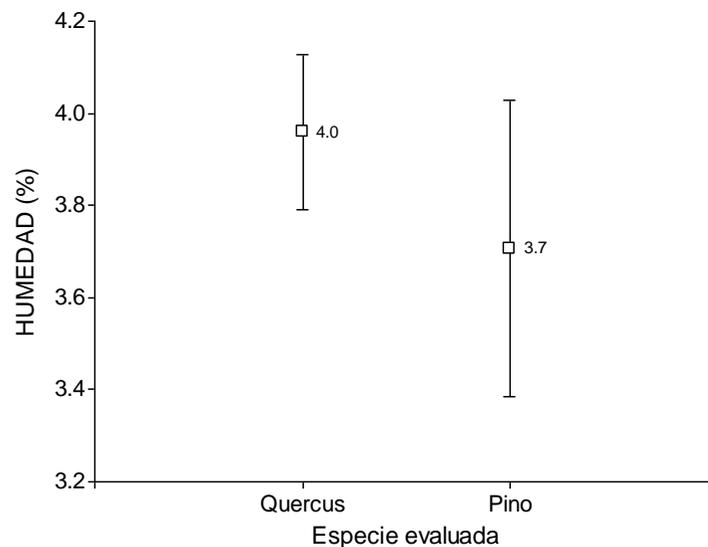


Figura 7. Prueba de medias de humedad en % en peso de carbón vegetal obtenidos para las 2 especies evaluadas.

Los valores de humedad son considerados buenos para los dos tratamientos, obteniendo valores por debajo de 5%, adecuados para carbón vegetal. De acuerdo con los parámetros que establece el Servicio Forestal de México y Características del carbón vegetal para altos hornos en Brasil, se consideran carbón de buena calidad, mas no para los estándares de calidad que se exigen para exportación, que requieren más bajos porcentajes de humedad.

7.2.3 Material volátil del carbón

Los materiales volátiles en el carbón vegetal producido, es una variable que define como requerimiento estar entre 18% y 23%, según los criterios establecidos por el Servicio Forestal Mexicano. Para esta investigación, en el cuadro 16, se presenta la prueba de "t" pareada para las dos especies evaluadas, obteniendo un valor de p de 0.5983.

Cuadro 16. Prueba pareada de T del Material Volátil (% en peso), en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.

Media (dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	LI (95%)	LS (95%)	T	Bilateral
-1.30E-03	27.54	27.54	0.01	-0.01	4.10E-03	-0.55	0.5983

Nota: 1 hace referencia a *Quercus* y 2 a Pino.

Como valor "p" (bilateral) de la prueba de T es mayor a 0.05, se da una igualdad estadística entre los resultados de esta variable entre las dos especies, para el carbón vegetal producido en horno de ladrillo.

Los altos contenidos obtenidos en esta evaluación son superiores a los valores establecidos, pudiendo ser una de las causas, la temperatura adecuada, es decir, que en el proceso de orneado, se tuvieron temperaturas por debajo de los 500 grados centígrados, lo que es perjudicial desde el punto de vista energético, pues inciden en la disminución del contenido de carbón fijo y con ello del poder calorífico del carbón vegetal.

7.2.4 Cenizas del carbón

Los resultados de las cenizas obtenidas en el proceso del orneado del carbón vegetal se presentan en el cuadro 17, mostrando también la prueba de "t" pareada para las dos especies evaluadas, donde se obtuvo un valor de p menor a 0.0001.

Cuadro 17. Prueba pareada de T de Cenizas en (% en peso), en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.

Media (dif)	Media (1)	Media (2)	DE (dif)	LI (95%)	LS (95%)	T	Bilateral
3.54E+00	4.72	1.18	0.54	3.09	3.99E+00	18.61	<0.0001

Nota: 1 hace referencia a *Quercus* y 2 a Pino.

Como valor "p" (bilateral) de la prueba de T es menor a 0.05, se comprueba la diferencia entre esta variable y el carbón vegetal obtenido de las dos especies evaluadas. Los promedios del contenido de cenizas, como se puede observar en la prueba de T, van de 4.72% para *Quercus purulhana* Trel y 1.18% para el *Pinus oocarpa* Schiede. De estos valores, se consideran aceptables los obtenidos de pino, si tomamos como punto de comparación las proporciones óptimas de los componentes químicos del carbón vegetal establecidos por el Servicio Forestal Mexicano, los cuales están en el rango de 1 al 4%. (Servicio Forestal de México, 1964), no así los obtenidos para *Quercus purulhana* Trel.

Hay dos aspectos importantes en el hecho de obtener un bajo contenido de cenizas, primero, la ceniza por ser una materia inerte no reacciona en la combustión, por lo tanto, no genera calor y por el otro lado los desechos y residuos al final de la combustión serán muy escasos. Un alto contenido de cenizas puede dar una falsa idea de buen rendimiento en volumen del carbón, pero éste tendrá un menor poder calorífico.

Otro criterio considera que obtener cenizas en rangos que oscilan entre los 3 a 5%, es obtener un buen producto final, que se puede considerar como un producto de óptima calidad, como se observan las medias obtenidas en la figura 8, aunque para el caso de *Quercus*, se puede observar que la parte alta de la varianza está superior a 5.

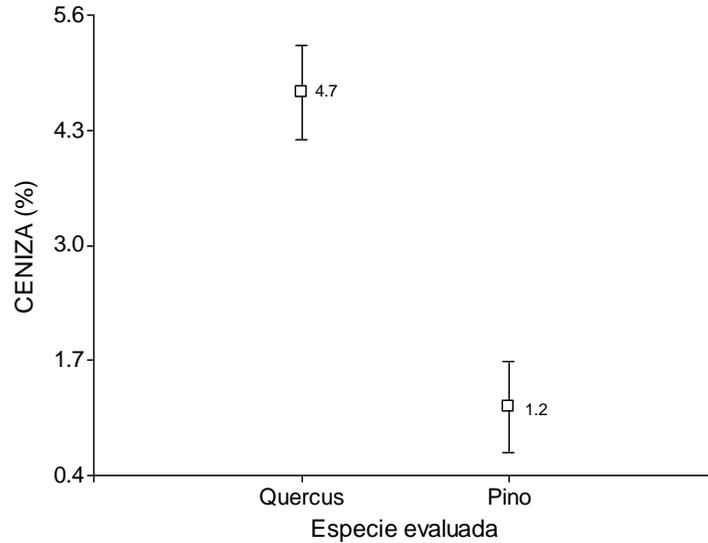


Figura 8. Prueba de medias de cenizas en porcentaje de peso de carbón vegetal obtenidos para las 2 especies evaluadas.

7.2.5 Carbono fijo

En la elaboración de carbón, como resultante el mayor porcentaje debe encontrarse como carbono fijo, y algunas fuentes citan que debe estar por arriba a 75% del carbón producido.

En el cuadro 18, se presenta la prueba de “t” pareada, para una prueba bilateral, obteniendo un valor de p menor a 0.05 (0.0001), que indica una diferencia en este porcentaje entre el carbón obtenido de las dos especies bajo evaluación.

Cuadro 18. Prueba pareada de T de Carbono Fijo en (% en peso), en el proceso de producción de carbón vegetal utilizando hornos.

Media (dif)	Media (1)	Media (2)	DE (dif)	LI (95%)	LS (95%)	T	Bilateral
-3.54E+00	67.74	71.28	0.54	-4	-3.09E+00	-18.49	<0.0001

Nota: 1 hace referencia a *Quercus* y 2 a Pino.

Los valores promedio del carbón fijo obtenido en las diferentes muestras de los tratamientos evaluados, como puede observarse en el cuadro 18, presentan resultados inferiores a los ideales, (para la especie de *Quercus Purulhana* Trel 67.74% y para *Pinus oocarpa* Schiede valores promedio de 71.28%) como se observa en la figura 9.

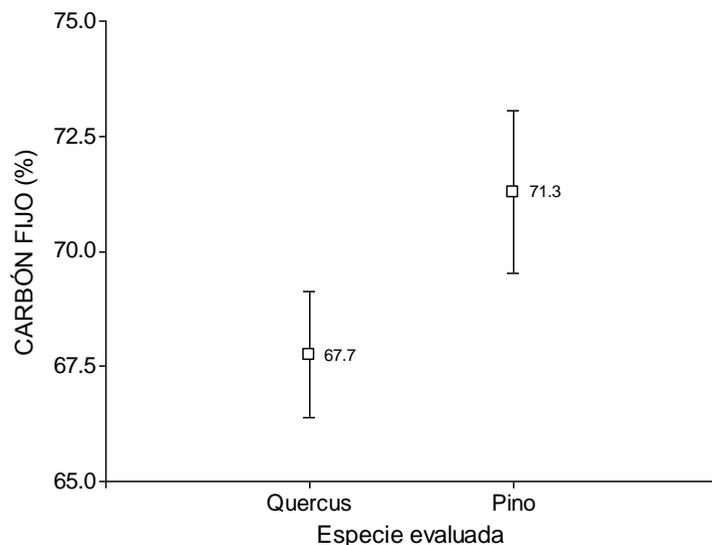


Figura 9. Carbono fijo en % en peso de carbón vegetal obtenidos para las 2 especies evaluadas.

De acuerdo a estos resultados obtenidos, el carbón obtenido de las dos especies, no es aceptable en comparación con las proporciones óptimas de los componentes químicos del carbón vegetal establecidos por el Servicio Forestal Mexicano, los cuales deben oscilar entre 74 a 81%. Al encontrar estos valores, se pueden interpretar que el proceso de carbonización no fue realizado a una temperatura aceptable, y su comportamiento está directamente relacionado con el contenido de materias volátiles.

7.2.6 Poder calorífico del carbón

Para evaluar esta variable se utilizó la dimensional Kcal/Kg de carbón producido, mostrando los resultados y la prueba de “t”, para medias pareadas en el cuadro 19.

Cuadro 19. Prueba pareada de T del poder calorífico en (Kcal/Kg), en el proceso de producción de carbón vegetal a partir de hornos.

Media (dif)	Media (1)	Media (2)	DE (dif)	LI (95%)	LS (95%)	T	Bilateral
-6.04E+02	6571.88	7176.13	152.15	-731.45	-4.77E+02	-11.23	<0.0001

Nota: 1 hace referencia a *Quercus* y 2 a Pino.

Como el valor "p" (prueba bilateral de “t”) es menor a 0.0001, indica que existe diferencia en el poder calorífico entre el carbón obtenido a partir de las dos especies, obteniendo un valor medio mayor para *Pinus oocarpa* Schiede (Figura 10).

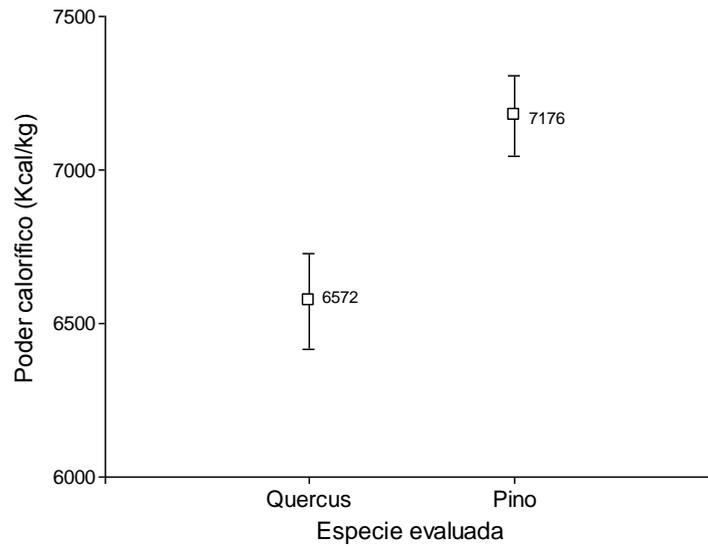


Figura 10. Poder calorífico en Kcal/Kg en peso de carbón vegetal obtenidos para las 2 especies evaluadas.

Los valores obtenidos de poder calorífico se encuentran dentro de los parámetros establecidos como adecuados por el Servicio Forestal Mexicano para la producción de carbón vegetal. A pesar de haber obtenido valores por debajo del ideal en carbono fijo, esta variable se utiliza en casos como estos, para corroborar la calidad del carbón vegetal obtenido, no considerando únicamente la variable anterior. Según se reporta, el carbón deseable es aquel que mayor cantidad de kilocalorías aporte por kilogramo de peso, entre un rango descrito de 5000 a 8500 Kcal/kg.

Los resultados, permiten catalogar al carbón de Encino (*Quercus Purulhana* Trel) y al carbón de Pino (*Pinus oocarpa* Schiede), producido a partir de la presente investigación, como de alto poder calorífico, según el rango anteriormente reportado.

Los resultados de rendimiento y las variables que determinan la calidad están relacionados entre sí como se puede observar en la relación que existe entre el alto contenido de materiales volátiles y el rendimiento, ya que las materias volátiles incrementan el rendimiento del carbón vegetal, al mismo tiempo por ser una sustancia

que al reaccionar en la combustión no aporta poder calorífico y genera humo lo que deprecia la calidad del carbón vegetal.

7.3 INDICADORES FINANCIEROS EN LA PRODUCCION DE CARBÓN VEGETAL

En las figuras 11 y 12, se muestran los resultados promedios de costos totales, ingreso bruto, utilidad neta y rentabilidad del proceso de producción de carbón vegetal de las especies de *Pinus oocarpa* Schiede y *Quercus purulhana* Trel.

Para considerar algunas referencias en la producción de carbón vegetal, utilizados para los siguientes cuadros tenemos:

- La cantidad de producto ingresado al horno y analizado es de 1 metro cúbico,
- 1 libra de carbón es equivalente a 0.0011 metros cúbicos
- El costo del transporte del carbón puesto en el mercado de la terminal de la zona 4, en Ciudad de Guatemala es de 1.45 Q/libra.
- La producción de leña y transporte hacia el horno se tomó en cuenta en base al costo del personal contratado para este trabajo (jornales se tomaron en base al salario mínimo de Q. 87.00 por día.
- Los costos de aditivos y aceite se basan en el costo del mercado local.

Figura 11. Análisis financiero para la producción de carbón de *Quercus purulhana* Trel, partir de 1 m³ de leña ingresada al horno de ladrillo.

CONCEPTO	Unidad de medida	Cantidad	Costo (Q)	
			Unitario	Total
A COSTOS DIRECTOS				324.8
1 MATERIALES				20
Empaque de polipropileno	Costal	4	5	20
2 PRODUCCIÓN DE MADERA				44.2
Valor de la madera en pie	m ³	1	14	14
Apeo, elaboración y jateo de leña	m ³	1	20	20
Combustible	Gl	0.15	23	3.45
Aditivos (autolub)	Lt	0.15	45	6.75
3 MANTENIMIENTO DE MOTOSIERRA				27.5
Aceite 20 W 50	Lt	0.15	50	7.5
Transporte de leña hacia el horno	m ³	1	20	20
4 PRODUCCIÓN DE CARBÓN				64.1
Llenado del horno	m ³	1	20	20
Operación del horno	m ³	1	20	20
Descarga carbón y limpieza/horno	m ³	0.482	25	12.05
Clasificación y embasado	m ³	0.482	25	12.05
5 MANTENIMIENTO DEL HORNO				87
Mano de obra para mantenimiento	Jornal	1	87	87
6 TRANSPORTE DE PRODUCTO	m ³	0.482	170	82
B COSTOS INDIRECTOS				44.75
1 Administración	Jornales	1	21.75	21.75
2 Imprevistos	%	5		23
C COSTO TOTAL				369.55
D INGRESOS BRUTO/ PRODUCCIÓN	m ³	0.482	1318.18	635.36
E UTILIDAD NETA				265.81
F RENTABILIDAD				71.93

Figura 12. Análisis financiero para la producción de carbón de *Pinus oocarpa* Schiede, a partir de 1 m³ de leña ingresada al horno de ladrillo.

CONCEPTO	Unidad de medida	Cantidad	Costo (Q)	
			Unitario	Total
A COSTOS DIRECTOS				321.43
1 MATERIALES				20
Empaque de polipropileno	Costal	4	5	20
2 PRODUCCIÓN DE MADERA				44.2
Valor de la madera en pie	m ³	1	14	14
Apeo, elaboración y jateo de leña	m ³	1	20	20
Combustible	Gl	0.15	23	3.45
Aditivos (autolub)	Lt	0.15	45	6.75
3 MANTENIMIENTO DE MOTOSIERRA				27.5
Aceite 20 W 50	Lt	0.15	50	7.5
Transporte de leña hacia el horno	m ³	1	20	20
4 PRODUCCIÓN DE CARBÓN				63.34
Llenado del horno	m ³	1	20	20
Operación del horno	m ³	1	20	20
Descarga carbón y limpieza/horno	m ³	0.467	25	11.67
Clasificación y embasado	m ³	0.467	25	11.67
5 MANTENIMIENTO DEL HORNO				87
Mano de obra para mantenimiento	Jornal	1	87	87
6 TRANSPORTE DE PRODUCTO	m ³	0.467	170	79.39
B COSTOS INDIRECTOS				44.75
1 Administración	Jornales	1	21.75	21.75
2 Imprevistos	%	5		23
C COSTO TOTAL				366.18
D INGRESOS BRUTO/ PRODUCCIÓN	m ³	0.467	945.45	441.53
E UTILIDAD NETA				75.35
F RENTABILIDAD				20.58

Los costos para cada una de las especies en la elaboración de carbón vegetal son similares, ya que consisten en los mismos trabajos de elaboración en cuanto a corte y tumbe, acarreo y todo el proceso hasta su carbonización. Si analizamos los costos bajo la visión del productor, este puede tomar decisiones de elaborar carbón con cualquiera

de las dos especies forestales, también por que la diferencia del rendimiento final no es grande.

Tomando en consideración el análisis de la producción y venta del producto de las dos especies, la diferencia principal la hace el ingreso, en función del precio pagado en campo por el carbón de Encino (*Quercus purulhana* Trel), que tiene una mayor aceptación en el mercado, con respecto del carbón de Pino (*Pinus oocarpa* Schiede). Este factor de preferencia por el mercado del consumo de carbón de encino no puede ser influenciado por el productor, a pesar de que, para este estudio, las diferencias entre la calidad del producto obtenido no son muy evidente (Figura 13).

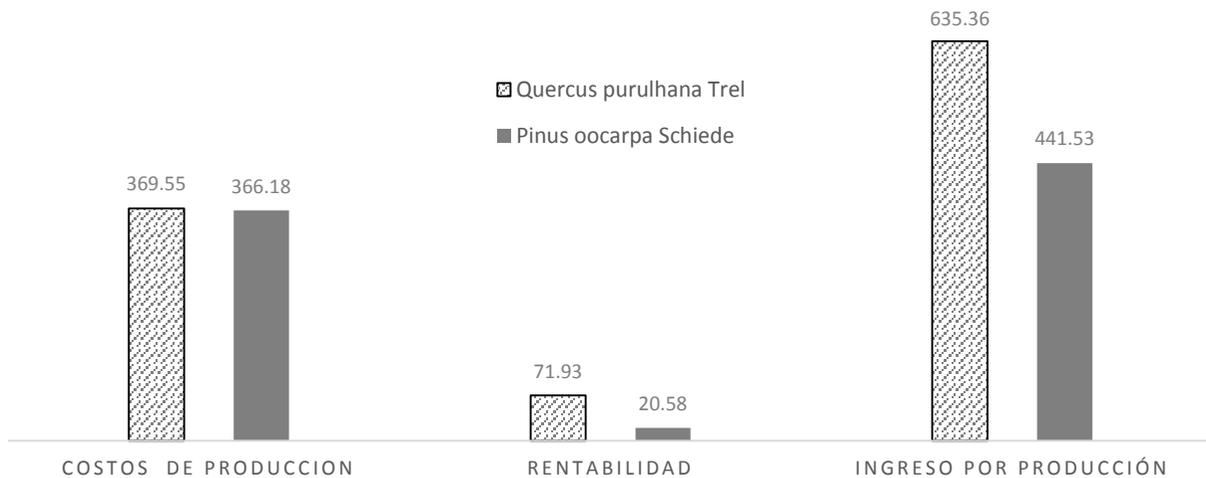


Figura 13. Costos de producción, Rentabilidad e Ingreso por producción, encontrados dentro del proceso de la elaboración de carbón vegetal de 1 metro cúbico de las especies *Quercus purulhana* Trel y *Pinus oocarpa* Schiede en hornos de ladrillo.

El producto elaborado se comercializa en el mercado de la terminal de la zona 4, de la ciudad capital, con un costo de Q. 1.45 por libra para el carbón vegetal de *Quercus purulhana* Trel, y para *Pinus oocarpa* Schiede un valor de Q. 1.04 por libra.

Desde la perspectiva de rentabilidad que se obtiene al analizar los costos e ingresos de la producción del carbón vegetal, se define que la especie de *Quercus purulhana* Trel,

es la más eficiente con una rentabilidad del 71.93%, mientras que el carbón de *Pinus oocarpa* Schiede, cuenta con una rentabilidad del 20.58%.

8 CONCLUSIONES

- 8.1 La evaluación del rendimiento tomó en cuenta el peso y el volumen, obteniendo un mejor rendimiento en la primera variable al elaborar carbón vegetal a partir de la especie *Pinus oocarpa* (38.07%) con respecto a la especie *Quercus purulhana*. Y con relación al volumen, no se obtuvieron diferencias significativas en el rendimiento con relación a las dos especies, obteniendo una leve diferencia mayor con carbón de *Quercus* (47.63%) con respecto a *Pinus* (45.9%).
- 8.2 Las variables humedad y poder calorífico determinadas para el carbón vegetal de la especie de *Quercus purulhana* Trel cumplen con los estándares establecidos para su exportación, pero deficientes en las variables de material volátil, cenizas y carbón fijo. Para la especie de *Pinus oocarpa* Schiede las variables humedad, cenizas y poder calorífico cumplen con los estándares establecidos para su exportación, pero deficientes en las variables de carbono fijo y material volátil. Por ello el carbón de ambas especies no cumple las condiciones ideales en algunas variables para poderse exportar; pero si están en los rangos ideales para considerarse carbón bueno e ideal para el mercado local y nacional.
- 8.3 En el mercado nacional, para el cual es producido el carbón, existe una preferencia por producto del genero *Quercus*, lo que refleja conveniencia en la elaboración de carbón de la especie de *Quercus purulhana* Trel en horno de ladrillo, debido a que representa una rentabilidad del 71.93% en comparación a un 20.58% obtenido para la especie de *Pinus oocarpa* Schiede, esto debido al precio que tienen estos productos en el mercado.
- 8.4 Para la elaboración de carbón de la especie de *Quercus* tiene en costo directo de Q. 324.80, costos Indirectos Q. 44.75, haciendo un total de Q. 369. 55, en 1 m³ de leña; con el carbón producido se obtuvo un ingreso de Q. 635.36 en 0.482 m³ de carbón vegetal, de esto una rentabilidad de 71.93%.

- 8.5 Para la elaboración de carbón de la especie de *Pinus* tiene en costo directo de Q. 321.43, costos Indirectos Q. 44.75, haciendo un total de Q. 366.18, en 1 m³ de leña; con el carbón producido se obtuvo un ingreso de Q. 441.53 en 0.467 m³ de carbón vegetal, de esto una rentabilidad de 20.58%.
- 8.6 Existen diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento del carbón vegetal, teniendo como mejor rendimiento la especie de *Pinus oocarpa* Schiede, por tanto se acepta la hipótesis alterna.
- 8.7 Existen diferencias estadísticamente significativas para las variables de densidad, carbón fijo del carbón vegetal, teniendo como mejor la especie de *Pinus oocarpa* Schiede, por tanto se acepta la hipótesis alterna.
- 8.8 No existen diferencias estadísticamente significativas para las variables de cenizas, material volátil del carbón vegetal, por tanto se acepta la hipótesis nula.
- 8.9 Existen diferencias estadísticamente significativas para la variable Cenizas del carbón vegetal, teniendo como mejor la especie de *Quercus purulhana* Trel, por tanto se acepta la hipótesis alterna.

9 RECOMENDACIONES

- El producto de carbón vegetal obtenido es resultado de leña con una base de humedad entre 12 y 16% con un secado de 15 días, sin embargo, es necesario proyectar nuevas investigaciones, con un enfoque de madera con base seca o con periodos de secado entre 25 a 30 días, con el fin de mejorar en la calidad de producto obtenido.
- Se recomienda ofertar el carbón producido de la especie de *Quercus purulhana* Trel, debido que algunas de las variables que determinan su calidad están en los parámetros establecidos para exportación y otras en el rango ideal para considerarse carbón bueno. En base a la variable económica es más rentable producir carbón de *Quercus purulhana* Trel, siempre y cuando los precios y la demanda se mantengan superiores a pino, ya que el mercado no tiene preferencia por alguna especie en particular de encino, ni alguna localidad en la producción de carbón vegetal.
- Para poder producir carbón vegetal que cumpla con los estándares de calidad internacional, deberá de elaborarse a una temperatura mínima de 650 °C, con leña base seca con cero contenidos de humedad y la adecuada manipulación del horno.
- Considerar la utilización de un termómetro para el control de la temperatura en la cual se vaya a producir el carbón, tomando como referencia la obtención de carbón vegetal de buena calidad.
- Si se deseara la exportación del carbón vegetal que se produce se tendría que mejorar el proceso de carbonización y previo a eso se deberá de utilizar materia prima en base seca, o en este caso con más días de secado al sol para que ingresen al horno con la menor humedad que se pueda.

- Se recomienda ofertar el carbón producido a la industria metalúrgica por presentar bajo contenido de cenizas, siempre y cuando se mejore la metodología de carbonización para bajar el contenido de volátiles.
- Se recomienda realizar estudios en el mismo sentido que el presente trabajo con otras tecnologías utilizadas en el país, con el fin de comparar los productos obtenidos y poder recomendar distintas alternativas para este sistema productivo.
- Replantear nuevas investigaciones en la región con otras especies forestales, para obtener resultados de rendimientos y calidades de carbón vegetal utilizando métodos de producción en hornos de ladrillos, debido a la alta demanda que tiene el carbón en el mercado local.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Abascal, J. (2011). Estudio de factibilidad para la producción de carbón vegetal, Corral Viejo en Honduras, Tesis. Agro negocios. Honduras, Honduras, ZAMORANO. 27 P.
- Aldana, F. (2002). Diccionario Ibalpe Enciclopédico. Ediciones Ibalpe, Mazatlán, Sinaloa, México. 1614 p.
- Argueta, C. (2006). Descripción y análisis de dos métodos de producción de Carbón Vegetal en el estado de Tamaulipas, Tesis. Ing. Agr. México, Universidad Autónoma Chapingo. 68 P.
- Aus, R. (1994). Técnicas de producción y calidad del carbón vegetal, en los Robledales de Altura de Costa Rica (en línea). Costa Rica, CATIE. Consultado 06 agosto. 2014. Disponible en <http://www.metabase.net/docs/simas/02360.html>.
- Bran, C. (2007). Determinación de rendimientos de Carbón Vegetal en bosques e Encino del Departamento de el Progreso, empleando dos métodos de producción. Tesis. Ing. Agr. Guatemala, Guatemala, URL. 55 p.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). (2003). Árboles de Centro América. [CD-ROM].
- Corado, M. (1984), Determinación de la Calidad Gravimétrica de Carbón Vegetal, Producido a partir de diferentes especies forestales y en diferentes tipos de Hornos, Tesis. Ing. Agr. Guatemala, Guatemala, USAC. 100 p.
- Díaz, J. (2009). Implementación de un sistema de producción de Carbón y Briqueta eco amigable en la finca Cruz el Progreso, Guatemala. Tesis. Ing. Agr. Guatemala, Guatemala, URL. 49 p.
- Díaz, J. (2009). Implementación de un sistema de producción de carbón y briqueta eco amigable en la finca Cruz, el Progreso, Guatemala, Tesis. Ing. Agr. URL. Guatemala, 49 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (1983) Métodos simples para la fabricación de carbón vegetal. Consultado 5 mayo. 2017. Disponible en Web <http://www.fao.org/docrep/x5595s/x5595s00.htm-11k>.

- Guardado, M. y Rodríguez, J. (2010). Evaluación de la calidad del carbón vegetal producido en hornos de retorta y hornos Metálicos portátiles en el salvador, Tesis. Ing. Agr. Antiguo Cuscatlán, el Salvador, San Salvador, JOSÉ SIMEÓN CAÑAS. 151 p.
- HIBA. (1986). Contrato de exportación de carbón vegetal a Alemania. 35 p.
- Instituto Nacional de Bosques -INAB-. (1999). Manual técnico forestal (1 ed.). Guatemala: Autor. p 6.
- Instituto Nacional de Bosques -INAB-. (2004). Guía práctica para la cubicación de madera (2 ed.). Guatemala: Autor. p 20.
- Instituto Nacional de Bosques -INAB-. (2016). Valor de la madera en pie por región, especie y tipo de producto, Resolución JD.06.28.2015. Guatemala: Autor.
- Juárez, C. (2015). Plan de manejo forestal, finca Sin nombre. Aldea las Dantas, Granados. Autor.
- López, E. González B. (2016). Fundamentos y Aplicaciones en Agronomía y ciencias a fines. Guatemala.
- Marcos, M. (1989). El Carbón Vegetal. Propiedades y Obtención Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 117 p.
- OLADE (Organización Latinoamericana de Energía, CL) / MEM (Ministerio de Energía y Minas, GT). (1983). Florestal Acesita, BR. v. 1.
- Ordaz, J. (2003). Análisis de la calidad del carbón vegetal de encino producido en horno tipo colmena brasileño en huayacocotla, Veracruz, Tesis. Ing. ftal. Industrial. Chapingo, México, 74 p.
- Patiño, F. y Pezet, M. (1993). Tecnología para la construcción y operación de hornos de mampostería. Instituto nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias. Yucatán, México.
- Pacheco, G. (2005), Evaluación del proceso de carbonización y calidad del carbón de Acacia Caven (Mol.). Producido en Hornos de barro, Tesis. Ing. Forestal, Santiago de Chile, Chile, Escuela de Ciencias Forestales. 59 p.

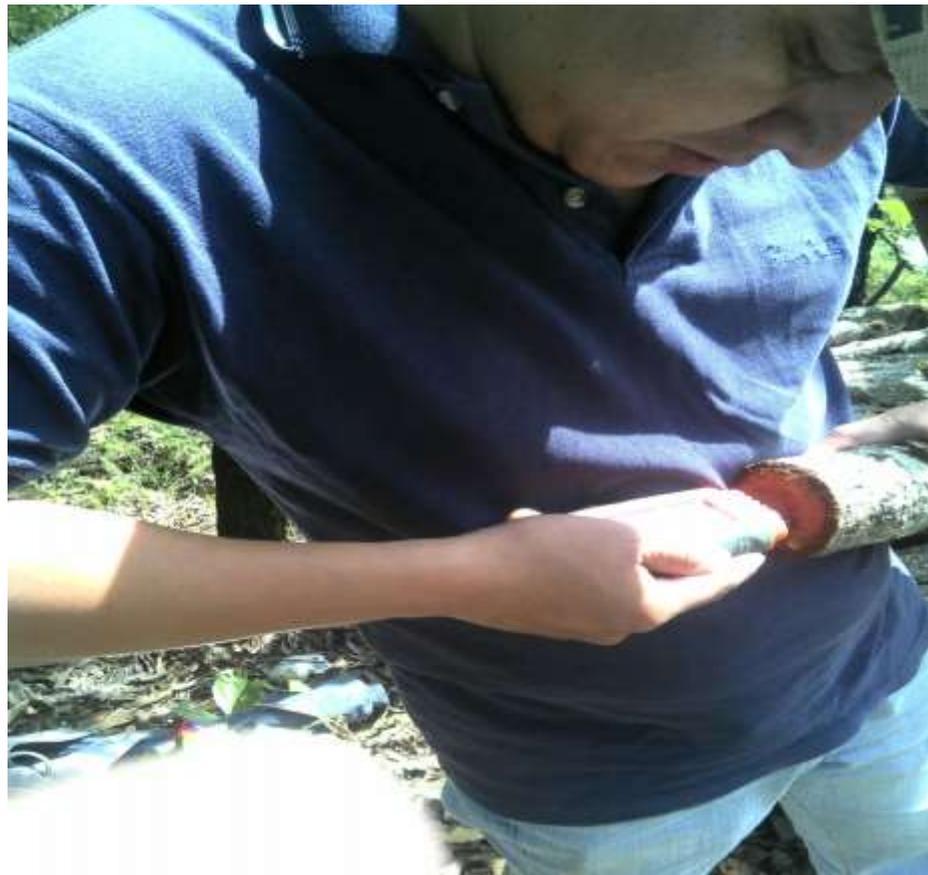
- Pedroni, L. (1991). Sobre la producción y calidad del carbón vegetal, en los Robledales de Altura de Costa Rica (en línea). Costa Rica, CATIE. Consultado 06 julio. 2017. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A6166E/A6166E.PDF>.
- Pérez M. y Compean, G. (1989). Características físico-químicas y de producción en carbón de tres tipos de leñas de Durango. INIFAP-Durango. Memorias de la Primera Reunión Nacional Sobre Dendro energía. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México.
- Robinson, L. Rhodes, S. Keith, W. (2003). Assessment of potential carbon dioxide reductions due to biomass-coal cofiring in the Unites States. Environmental Science & Technology. p 9.
- Servicio Forestal de México. (1964). Carbón de leña, producción y uso. México, guerrero: Autor. 167 p.
- Trelease, Stevens, Ulloa, Pool y Montiel. (2001). Flora de Nicaragua. Missouri Botanical Garden Press. EEUU. Consultado 15 de jun. 2017. Disponible en <http://www.tropicos.org/name/13100322?projectid=7>
- Villagrán, E. (2009). Procesamiento y aceptación del Carbón obtenido en Horno Media Naranja de las especies forestales Pinus maximinoii M., Liquidámbar styraciflua L. y Quercus brachistachys B. En condiciones de la Finca Chilax, San Juan Chamelco, Alta Verapaz. Tesis. Ing. Agr. Guatemala, Guatemala, USAC. 144 p.

11 ANEXOS

11.1 Hornos utilizados en la carbonización de leña de las especies de *Quercus purulhana* Trel y *Pinus oocarpa* Schiede



11.2 Toma de datos de humedad de leña de las especies de *Quercus purulhana* Trel y *Pinus oocarpa* Schiede



11.3 Boleta para la recolección de información en campo

BOLETA DE TOMA DE DATOS						
INFORMACION GENERAL						
NOMBRE DE LA FINCA						
PROPIETARIO						
NO. DE HORNOS		COORDENADAS			X=	
					Y=	
INFORMACION DEL PRODUCTO						
NO. DE TRATAMIENTOS		ESPECIE	VOLUMEN m³	PESO kg		
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
INFORMACION DEL PROCESO DE HORNEADO						
FECHA INICIO DE HORNEADO						
HORA DE INICIO DE HORNEADO						
FECHA DE APAGADO DEL HORNO						
HORA DE PAGADO DEL HORNO						
HORA DE COMIENZO DE ENFRIADO						
VOLUMEN TOTAL DEL PRODUCTO EN m³						
PESO TOTAL DEL PRODUCTO EN kg						

11.4 Colecta de carbón vegetal de las especies de *Quercus purulhana* Trel y *Pinus oocarpa* Schiede.



11.5 Elaboración de leña de las especies de *Quercus purulhana* Trel y *Pinus oocarpa* Schiede.

