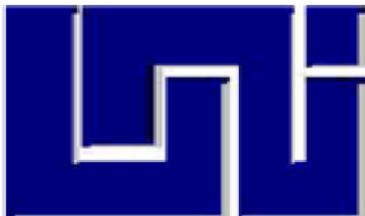


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Mon
662.74
M473
2012



**EVALUACIÓN TECNOLÓGICA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL
CARBÓN VEGETAL FABRICADO EN LA COOPERATIVA DE PRODUCTORES
AGROFORESTALES DE POSOLTEGA, LEÓN**

TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:

Br. Eleazar A. Mayorga Valdez

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

TUTOR

Ing: Silvio Solórzano Moody

Managua, Nicaragua
Junio, 2012

OPINIÓN DEL CATEDRÁTICO GUÍA

Managua, 22 de junio del 2012.

Ing. Leonardo Chavarría Calderón.
Decano Facultad Ingeniería Química (F.I.Q.)
UNI-RUSB
Su despacho.

Estimado Ing.:

Por medio de la presente me dirijo a usted, con el fin de comunicarle que el **Br. Eleazar A. Mayorga Valdez**, ha finalizado la elaboración de su trabajo monográfico titulado: **“EVALUACIÓN TECNOLÓGICA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL CARBÓN VEGETAL FABRICADO EN LA COOPERATIVA DE PRODUCTORES AGROFORESTALES DE POSOLTEGA, LEÓN”**, a través del cual y de su correspondiente defensa optará al título de Ingeniero Químico.

El mencionado trabajo lo realizó de manera criteriosa, los datos fueron recopilados en ensayos efectuados en el sitio de producción del carbón vegetal y verificado por mi persona, de igual manera los análisis realizados en el Laboratorio del Programa Biomasa y siguiendo los procedimientos establecidos, con los elementos antes mencionados considero que el trabajo mencionado da cumplimiento con los objetivos planteados en su protocolo presentado ante la Facultad de Ingeniería Química y llenando los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Ingeniería.

Extiendo la presente a solicitud de la parte interesada, como requisito para realizar su defensa monográfica.

Sin otra razón, reciba mis respetuosos y atentos saludos.

Atentamente


Ing. Silvio Ramón Solerzano Moody
Docente, UNI-RUPAP.

“Toda acción tiene un propósito, pero somos inconcientes de ello; por tanto, se consiente del propósito de tus acciones y podrás determinar tu destino e inclusive no solo el propio”

El autor...

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres, por otorgarme el apoyo para superarme en la vida.

Agradezco a todos los profesores que se involucraron en mi formación en ésta universidad.

Quiero darle las gracias a todo el personal de COPAPO, PROLEÑA y del programa BIOMASA que abrieron sus puertas para poder realizar este trabajo monográfico.

De manera especial agradezco al Ing. Silvio Moody por su enorme disposición para la tutoría de este trabajo.

También de forma especial agradezco al Ing. Néstor Fong por su inmenso apoyo y disposición para realizar este estudio.

DEDICATORIA

A mis padres...

A Yolanda. Vanegas.

LISTA DE ABREVIATURAS

COPAPO: Cooperativa de Productores Agroforestales de Posoltega

ONG: Organización No Gubernamental

TPI: Tropical Products Institute

FAO: Food and Agriculture Organization (Organización de Agricultura y Alimentos)

PCS: Poder Calorífico Superior

PCI: Poder Calorífico Inferior

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN.....	3
II. ANTECEDENTES.....	4
III. JUSTIFICACIÓN	5
IV. OBJETIVOS	6
4.1. Objetivo General.....	6
4.2. Objetivos Específicos	6
V. MARCO TEÓRICO.....	7
5.1. Descripción del proceso de carbonización.....	7
5.1.1. Carbonización de la celulosa	8
5.1.2. Carbonización de la hemicelulosa	8
5.1.3. Carbonización de la lignina	8
5.2. Efectos de la temperatura y la humedad	8
5.3. Calidad de la materia prima (Leña)	9
5.3.1. Densidad aparente.....	9
5.3.2. Humedad.....	10
5.3.3. Tamaño	10
5.3.4. Composición química	10
5.4. Calidad del producto primario de la carbonización (carbón vegetal).....	11
5.4.1. Propiedades químicas	11
5.4.2. Propiedades físicas.....	13
5.5. Fracción comercial y no comercial.....	14
5.6. Eficiencia de conversión.....	14
5.7. Tecnologías de carbonización.....	15
5.7.1. Parvas.....	15
5.7.2. Horno de ladrillo: Media Naranja.....	16
5.7.3. Hornos metálicos: TPI	17
5.7.4. Hornos metálicos: Contenedor.....	19
5.8. Costos de producción.....	23
VI. METODOLOGÍA.....	24
6.1. Descripción del área de trabajo.....	24
6.2. Caracterización del proceso de producción	25
6.2.1. Puntos de muestreo e instrumentos utilizados para los análisis en campo	26
6.2.2. Caracterización de la Materia prima	26
6.2.3. Descripción del pesaje de la leña.....	26
6.2.4. Proceso de carbonización.....	27
6.2.5. Pesaje del carbón vegetal.....	28
6.2.6. Obtención de la fracción comercial, no comercial, densidad a granel y muestras de carbón vegetal	28
6.3. Formulación del balance de materia del proceso productivo de carbón vegetal	29
6.4. Toma y número de muestras	29
6.5. Manejo de las muestras de leña y de carbón vegetal	29
6.6. Análisis de laboratorio	30
6.7. Determinación de los costos de producción	30

6.8. Análisis comparativo	30
VII. RESULTADOS	31
7.1. Descripción del proceso productivo de carbón vegetal de COPAPO utilizando el horno Contenedor	31
7.1.1. Obtención del financiamiento	31
7.1.2. Corte de leña	31
7.1.3. Transporte de la leña	34
7.1.4. Secado de la leña	34
7.1.5. Análisis de contenido de humedad de la leña	36
7.1.6. Proceso de carbonización de la leña	36
7.1.6.1. Carga y arranque	36
7.1.6.2. Quemado de gases	38
7.1.6.3. Monitoreo de la temperatura de carbonización	38
7.1.6.4. Fin de la carbonización y enfriado	39
7.1.6.5. Descarga del carbón vegetal	40
7.2. Medición de la fracción comercial, fracción no comercial y la densidad a granel del carbón vegetal	41
7.3. Análisis de contenido de humedad en el carbón vegetal	42
7.4. Análisis químicos del carbón vegetal	42
7.5. Criterios de calidad del carbón vegetal	44
7.6. Costos unitarios de proceso productivo del carbón vegetal	45
VIII. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	46
8.1. Problemas del proceso productivo de carbón vegetal en COPAPO	46
8.2. Factores determinantes de la calidad según el proceso productivo actual	49
8.3. Balance de materia del proceso productivo	49
8.4. Acerca de la eficiencia de conversión leña-carbón	54
8.5. Definición de criterios y establecimiento de la calidad del carbón vegetal	56
8.6. Acerca de la densidad aparente y la fracción comercial y no comercial	59
8.7. Acerca de los costos de producción	61
8.8. Comparación del carbón obtenido en el horno contenedor con el producido en parva	64
8.8.1. Comparación del modo de operación de la parva y del horno Contenedor	64
8.8.2. Calidad del carbón vegetal de la parva y del horno Contenedor	65
8.8.3. Eficiencia de conversión leña-carbón de la parva y del horno Contenedor	67
8.8.4. Costo unitario de producción de la parva y del horno Contenedor	68
IX. CONCLUSIONES	70
X. RECOMENDACIONES	71
XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
XII. ANEXOS	xi
A.1. Formato de recolección de datos de campo	xi
A.2. Determinación de la densidad a granel	xxiv
A.3. Análisis químicos	xxv
A.4. Determinación del poder calorífico (método de bomba calorimétrica)	xxix
A.5. Certificado de plantación forestal	xxxiii

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos.....	1
Tabla 2. Influencia de la temperatura de carbonización en el carbono fijo y el rendimiento. 9	
Tabla 3. Porcentajes de componentes según el tipo de árbol.	11
Tabla 4. Efecto de la temperatura en el poder calorífico.....	13
Tabla 5. Resumen de las propiedades químicas y físicas.....	13
Tabla 6. Especificaciones técnicas del horno Contenedor de COPAPO.....	21
Tabla 7. Propósito de los puntos de muestreo utilizados.....	26
Tabla 8. Datos del secado de 2 trozos de leña al aire libre.....	35
Tabla 9. Porcentaje de contenido de humedad de la leña.	36
Tabla 10. Datos registrados de cada ensayo de carbonización.....	40
Tabla 11. Planificación de los ensayos de carbonización.....	40
Tabla 12. Datos de la fracción comercial, fracción no comercial y densidad a granel.	41
Tabla 13. Porcentaje de contenido de humedad del carbón vegetal.....	42
Tabla 14. Resultado de los análisis químicos del carbón vegetal.....	43
Tabla 15. Normas de calidad para la exportación-importación de carbón vegetal para.....	44
Tabla 16. Costos estimados de la primera etapa del proceso productivo de carbón	45
Tabla 17. Costos estimados de la segunda etapa del proceso productivo de.....	45
Tabla 18. Eficiencia de conversión leña-carbón obtenida para cada ensayo.....	54
Tabla 19. Propuesta de valores normativos de la calidad del carbón	57
Tabla 20. Resumen de opciones de costos del proceso productivo de COPAPO usando	63
Tabla 21. Contenido de humedad de la leña de la parva y el horno.....	65
Tabla 22. Análisis químicos del carbón de parva y del horno Contenedor.	65
Tabla 23. Contenido de humedad del carbón de parva	66
Tabla 24. Densidad a granel, Fracción comercial y no comercial del carbón de parva y del horno Contenedor.	67
Tabla 25. Porcentaje de eficiencia de conversión de.....	67
Tabla 26. Capacidades productivas y costos totales de producción de la parva y el horno Contenedor.	68

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema del avance del frente de carbonización en la madera.	7
Figura 2. Esquema de una parva para producir carbón vegetal.....	15
Figura 3. Horno “Media Naranja” Argentino.	16
Figura 4. Esquema de funcionamiento del horno Contenedor	22
Figura 5. Flujograma simplificado del proceso productivo de COPAPO usando el horno Contenedor y los puntos de muestreo usados para éste estudio.	25
Figura 6. Esquema simplificado de los puntos de medición de temperatura en el horno contenedor.	27
Figura 7. Momento del quemado de gases en la escala del tiempo de carbonización.....	38
Figura 8. Flujograma de la operación de adquisición, acondicionamiento y transporte de la leña del proceso productivo de carbón vegetal de COPAPO.	52
Figura 9. Flujograma de la operación de carbonización del proceso productivo de carbón vegetal de COPAPO.	53

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Página
Fotografía 1. Parva cargada de leña (Izq). Parva en funcionamiento (Der).	16
Fotografía 2. Carga del Horno Media Naranja con leña (Izq.). Horno Media Naranja en funcionamiento gases saliendo por las ventanas (Der.).....	17
Fotografía 3. Horno metálico TPI.....	18
Fotografía 4. (a), (b), (c), (d), (e), (f).....	19
Fotografía 5. Horno Contenedor y sus componentes.	20
Fotografía 6. Horno Contenedor con la leña en su interior.	21
Fotografía 7. Horno Contenedor siendo montado sobre su base.....	22
Fotografía 8. Macro localización de la Cooperativa de Productores Agroforestales de Posoltega. COPAPO.....	24
Fotografía 9. Pesaje de la leña a ser cargada dentro del Horno Contenedor.	27
Fotografía 10. Pesaje del carbón producido (izquierda), leña sin carbonizar (derecha).	28
Fotografía 11. Determinación de la densidad a granel y fracciones comercial y no comercial.	28
Fotografía 12. Lote de madera comprado.....	31
Fotografía 13. Corte del árbol (Izq), limpieza de ramas y medición (cen), trozado (Der). 32	
Fotografía 14. Carga de leña del sitio de corte al remolque.	32
Fotografía 15. Base de los rebrotes cortados.....	33
Fotografía 16. Diámetros y longitud de la leña cortada.	33
Fotografía 17. Descarga de la leña a la par de los hornos.	34
Fotografía 18. Leña apilada a la par de los hornos y al sol para permitir su secado.	34
Fotografía 19. Carga de leña: 1er nivel a medio completar (Izq), 2do nivel completo (Der).	37
Fotografía 20. Contenedor con la tapa puesta (Izquierda), Contenedor alzado y siendo posicionado sobre la base (Derecha).	37
Fotografía 21. Izquierda: proceso de carbonización antes de encender el quemador de gases. Derecha: proceso de carbonización con el quemador de gases en funcionamiento.	38
Fotografía 22. Registro de la temperatura de carbonización.....	39
Fotografía 23. Enfriado del Contenedor.	39
Fotografía 24. Descarga del carbón y empacado, para lo cual se usa una pala plana.	41
Fotografía 25. Carga del ensayo 3 (Izq), Carga del ensayo 11 (Der).	48
Fotografía 26. Carbonización dispereja en el ensayo 1 (Izq), Ensayo 11 (Der).	48
Fotografía 27. Carga del ensayo 2 (Izq), ensayo 13 (Der).	55

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 1. Relación entre la eficiencia de conversión leña-carbón, el contenido de humedad y el tiempo de carbonización.	55
Gráfico 2. Consistencia de los análisis químicos obtenidos de cada ensayo.....	58
Gráfico 3. Tendencia del carbón producido y su densidad a granel.....	59
Gráfico 4. Promedio de las Fracciones comercial y no comercial.	60
Gráfico 5. Porcentaje de cada costo en el gasto total estimado del proceso productivo de carbón vegetal de COPAPO.	61

RESUMEN

Se realizó un seguimiento al proceso productivo de carbón vegetal usando un horno tipo Contenedor en COPAPO, Posoltega, León, con los objetivos de determinar la calidad del producto primario, detectar problemas en el proceso productivo, e indagar sobre los factores que más influyen en la calidad del carbón vegetal.

Se realizaron 13 ensayos de carbonización que permitieron obtener los valores promedios que se presentan en la siguiente tabla. El análisis químico del producto primario de la carbonización, el carbón vegetal obtenido, se realizó en el laboratorio del Programa Biomasa en el RUPAP, así como los análisis de contenido de humedad tanto para la leña como para el carbón vegetal. Los demás análisis fueron realizados In Situ.

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos.

(*Eucalyptus calmaldulensis*, Horno Contenedor, Febrero 2011, Posoltega, León)

Balance de materia		Análisis físicos		Análisis químicos	
Leña	(Kg) 763.3	Contenido de humedad de la leña (% bh)	24.62	Contenido de carbono fijo (%)	74.51
Carbón vegetal Producido	(Kg) 174.0	Fracción Comercial (%)	94.9	Contenido de materia volátil (%)	23.19
Leña sin carbonizar	(Kg) 25.3	Fracción no comercial (%)	5.1	Contenido de ceniza (%)	2.30
Tiempo Carbonización	(h) 11:24	Densidad a granel (Kg/m ³)	197.5	Poder calorífico Superior (Kcal/Kg)	7626.52
Eficiencia conversión leña-carbón	(%) 31.70	Contenido de humedad del carbón (% bh)	2.14	-	*

Se estimó el costo unitario de producción con esta tecnología, según el proceso productivo de la cooperativa, en C\$ 5.70/Kg de carbón vegetal. El 49.75% del costo total de la operación productiva se destinó al pago de personal y un 31.01% a la compra de materia prima que genera el pago de ese personal.

La materia prima que compra la cooperativa a sus socios es de baja calidad porque son árboles muy jóvenes, de 1 a 3 años de edad, además de ser el doble de costosa (C\$ 551.30/2.28 m³ adquirida en la zona aledaña a la cooperativa contra C\$ 250/2.28 m³ en el Tránsito, León).

Es ésta materia prima de baja calidad uno de los factores que tiene mayor influencia en la calidad del carbón producido, es directamente responsable de la baja densidad a granel del carbón vegetal y el contenido de carbono fijo.

Los otros dos factores principales del proceso productivo que afectan la calidad son el contenido de humedad de la leña inicial que tiene que ver con el tiempo de secado (muy corto) y el otro la falta de experiencia en el uso de la tecnología, que se tradujo en tiempos de carbonización insuficientes y mal manejo del equipo, lo que representa problemas menores.

Se realizó un análisis comparativo entre dos técnicas, la del horno contenedor y la parva (datos de la parva fueron proporcionados por PROLEÑA de un estudio propio en el municipio de el Transito, en el departamento de León en el año 2010.) de todas la características antes mencionadas del carbón vegetal y se concluyó que el horno contenedor otorga una mejor calidad y cantidad de carbón vegetal, pero debido a la forma como se opera esta tecnología se tiene una ganancia mucho menor que con la parva, pero representa una mejora significativa en el aprovechamiento de los recursos dendroenergeticos del país y en el cuidado del medio ambiente.

I. INTRODUCCIÓN

El carbón vegetal es una fuente de energía renovable si se maneja adecuadamente, desafortunadamente en este país esto no sucede. El carbón vegetal es un insumo utilizado principalmente por el sector doméstico y por el sector comercial del país; por otra parte, el carbón vegetal presenta varias ventajas en comparación con la leña, entre ellas: es de fácil ignición (si es de mediana calidad), de combustión limpia, se disminuyen los costos de transporte, y es fácil de almacenar. Son estas y otras razones las que justifican la elaboración de carbón vegetal a partir de leña. La producción de carbón vegetal tiene mayor auge en las zonas rurales de los departamentos de Managua, León, y en menor proporción Chinandega, Bluefields y Puerto cabezas.

El proceso para obtener carbón vegetal a partir de la leña se denomina carbonización, pero químicamente es una “pirólisis” de los componentes de la madera (celulosa, hemicelulosa y lignina) que se reducen en su mayor parte al carbono que contienen; obteniéndose carbón y otros subproductos como alquitranes, ácidos, gases y en mucha mayor cantidad agua. La técnica más utilizada en el país es también una de las más ancestrales: la parva cuyo uso tiene como consecuencia un bajo rendimiento en la conversión de la leña al carbón, (una parte de carbón por cada seis partes de leña iniciales), de baja calidad (definida por algunas de sus propiedades) y altas pérdidas por producir partículas menores.

En la Cooperativa de Productores Agroforestales de Posoltega, COPAPO, cuya sede está ubicada en el municipio de Posoltega, en el Km. 109 carretera a Chinandega, fue construido y es operado un horno metálico, del tipo Contenedor. El horno es alimentado con Leña de Eucalipto reforestado en plantaciones de los socios de COPAPO. La tecnología inicialmente introducida por la ONG (Organización No Gubernamental) PROLEÑA desde Brasil, posteriormente mejorada en el Programa BIOMASA de la UNI y últimamente por PROLEÑA con el diseño de una nueva versión de estos hornos.

COPAPO actualmente se encuentra produciendo carbón vegetal utilizando esta tecnología y necesitaban conocer la calidad del carbón producido para poder explotarlo comercialmente de manera mas competitiva; mediante este trabajo se realizaron 13 ensayos para obtener muestras que permitieron determinar la calidad del carbón vegetal producido con esta tecnología, además de obtener la eficiencia de conversión de leña a carbón del horno, sus costos de operación.

Se revisó todo el proceso productivo de COPAPO usando esta tecnología para detectar problemas y los factores que mas influyen en la calidad del producto primario y comparar todas estas características contra el método tradicional de la parva. Esto finalmente permite conocer a ciencia cierta si la tecnología de carbonización de horno contenedor permite un mejor aprovechamiento del recurso dendroenergético del país.

II. ANTECEDENTES

De acuerdo al Balance Energético Nacional del año 2006¹, la leña representó el 47.8% del consumo neto de energía final, el carbón vegetal 0.4%, los residuos orgánicos vegetales (bagazo, cascarilla de algodón, café) el 1.5%, los derivados del petróleo el 40.6% y la energía eléctrica el 9.8%. Aunque los datos son de hace 5 años, se mantiene la tendencia de consumir leña mayormente. El carbón vegetal producido proviene en un 87% de micro y pequeños productores y el 13% restante de medianos y grandes productores.

En el mismo Balance del 2006, el sector residencial reflejó un decremento de consumo de carbón con respecto al 2005 en un 36.5% debido principalmente al consumo de leña, por lo tanto la fuente energética de mayor importancia sigue siendo la leña en un 89.9% y el carbón vegetal representó el 0.4% del consumo de este sector, en el sector “comercio, público y servicios” la leña representó el 16.9% y el carbón vegetal 1.4% del consumo de ese sector, en el sector industrial se dio un consumo de leña de 20.7% y de carbón vegetal de 0.1% y el sector agropecuario presentó un consumo de leña de 9.9% y carbón vegetal en 0.1%. Estos datos reflejan la importancia que tiene la leña y el carbón vegetal en nuestro país como fuentes de energía.

En la actualidad, el mayor consumo de carbón vegetal por parte del sector comercio, público y de servicio se mantiene, esto sumado a la devaluación de la moneda y a el aumento en los precios del petróleo, causaron un aumento de aproximadamente del 250% en el precio del saco de carbón vegetal entre la década 1999-2009. El mercado para el carbón vegetal menos exigente desde el punto de vista de la calidad es el domestico.

La ONG PROLEÑA ha promovido una nueva generación e introducción de hornos metálicos y también ha realizado validaciones en hornos media naranja y parvas en la comunidad de Apompuá, El Tránsito, en el municipio de Nagarote, departamento de León, a unos 52km de la ciudad de Managua, en el año 2010.

¹ Ultimo Balance Energético Nacional oficial publicado por el MEM.

III. JUSTIFICACIÓN

Los resultados que se obtuvieron de la evaluación tecnológica del proceso de producción del carbón vegetal constituyen una información fundamental para los miembros de COPAPO, dado que a partir de éstos se podrá trazar una estrategia de comercio y mejora del negocio. El desconocimiento de la calidad del carbón producido les impide efectuar comparaciones con el carbón que se comercializa a nivel interno (producido en su mayoría usando la técnica de parva) y por tanto, dejan de explotar una posible ventaja competitiva que es el caso de obtener, tal como se espera, una mejor calidad.

Otro aspecto importante que se aborda en éste trabajo es la determinación de la eficiencia de la conversión de la leña en carbón usando el horno tipo Contenedor, parámetro que indica el rendimiento de producto en función de la materia prima alimentada, el cual afecta directamente la rentabilidad.

Los costos de producción del carbón usando el horno tipo Contenedor son desconocidos actualmente por los miembros de la COPAPO. Su determinación les permitirá establecer un mayor control de los recursos destinados a la producción e incluso, les será de utilidad para comparar con otras tecnologías y determinar si alguna otra tiene ventajas significativas desde el punto de vista económico.

Desde una perspectiva más amplia, los datos que se aprecian en el presente trabajo podrán ser utilizados por otros productores, organismos o entidades que están interesados en desarrollar investigaciones o proyectos que permitan el aprovechamiento racional del recurso dendroenergético en el país de una forma más eficiente.

IV. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

- Realizar la evaluación tecnológica del proceso de producción del carbón vegetal fabricado por la Cooperativa de Productores Agroforestales de Posoltega, COPAPO, Posoltega, León.

4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el proceso de producción de carbón vegetal de COPAPO haciendo énfasis en los parámetros de la materia prima y del proceso de carbonización que influyen en el producto final.
- Formular el balance de materia del proceso productivo.
- Determinar la eficiencia de conversión leña-carbón y las fracciones comercial y no comercial del proceso de producción de carbón vegetal en COPAPO.
- Definir los criterios para la calidad del carbón vegetal y establecer la calidad del carbón vegetal obtenido en el horno tipo Contenedor mediante análisis químicos.
- Determinar los costos unitarios de producción de carbón vegetal en el proceso productivo de COPAPO.
- Realizar el análisis comparativo del carbón vegetal obtenido en el horno tipo Contenedor versus el método tradicional de Parva, referido a la calidad del producto, la eficiencia de conversión leña-carbón y los costos de producción.

V. MARCO TEÓRICO

En este acápite se presenta la teoría básica para entender el proceso de carbonización, las variables más importantes que afectan el proceso, así mismo se mencionan algunas de las tecnologías que permiten producir carbón vegetal y los criterios de calidad de la materia prima y el producto.

5.1. Descripción del proceso de carbonización

“La fase de la carbonización puede ser decisiva en la fabricación de carbón vegetal, si bien no se trata de la más costosa. 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).

Un balance sencillo de la operación de carbonización deberá tomar en cuenta tanto lo que entra al sistema, como lo que sale del sistema, esto es: la leña, el carbón producido (producto primario), la leña no carbonizada, el vapor de agua proveniente de la leña, los gases producto de la carbonización (CO_2 , CO , entre otros), alquitranes y ácidos piroleñosos (productos secundarios). De aquí se pueden obtener: la eficiencia de conversión leña-carbón, la fracción comercial y no comercial de producto.

La carbonización empieza cuando se combustiona una parte de la carga de madera, aportando la energía necesaria para iniciar el secado del resto de la madera, esto ocurre cuando se alcanza una temperatura de $100\text{ }^\circ\text{C}$; seguido a esto se llega al punto de cero contenido de humedad, hasta ese momento las reacciones que ocurren son del tipo endotérmico. Una vez secado el material, alcanza rápidamente una temperatura de $280\text{ }^\circ\text{C}$.

Al alcanzar los $280\text{ }^\circ\text{C}$ y seguir aumentando la temperatura, los componentes de la madera (celulosa, hemicelulosa y lignina) empiezan a fraccionarse espontáneamente produciendo: carbón, alquitranes, compuestos químicos complejos y gases condensables e incondensables.

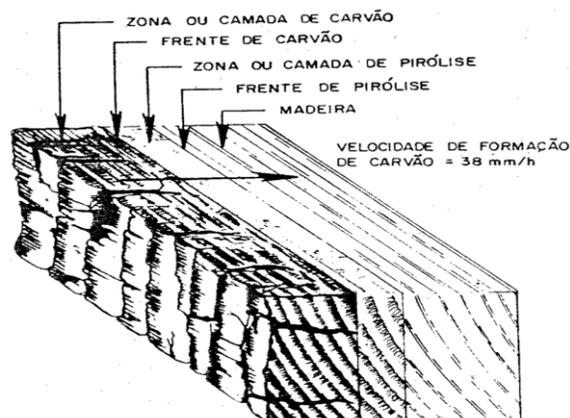


Figura 1. Esquema del avance del frente de carbonización en la madera.

Fuente: Cassia, Semana academica-UFFRJ Vicosa Mg

En resumen, la carbonización es una descomposición térmica de los compuestos de la madera en ausencia de oxígeno dejando principalmente como producto una parte del carbono que contenía la madera, se trata entonces de una pirólisis extrema.

5.1.1. Carbonización de la celulosa

La celulosa es el componente que más fácilmente puede ser aislado del resto de componentes que tiene la madera, por tanto es el más estudiado. La celulosa en una atmósfera de nitrógeno a unos 300 °C produce 34.2% de carbón pero esto decae a un 5% si se duplica la temperatura por tanto se concluye que la celulosa tiene poco aporte potencial al producto final. Sus etapas de degradación comprenden: una vigorosa descomposición, la continuación de la descomposición con la volatilización de los productos y finalmente la evolución de esos productos volátiles. (Santos et al., 2001)

5.1.2. Carbonización de la hemicelulosa

La hemicelulosa constituye el componente de la madera con más responsabilidad en la formación de la mayor parte del ácido acético en el proceso de carbonización, es el componente de la madera menos estable debido a su naturaleza amorfa, su descomposición se da en dos etapas: en la primera, la molécula se descompone en fragmentos menores.

En la segunda, sigue una despolimerización de las cadenas pequeñas formando monómeros y empieza una gran cantidad de formación de volátiles, tanto a partir de los monómeros antes formados como a partir del polímero. La hemicelulosa tiene un rendimiento en carbón de apenas un 10% a 500 °C lo que indica que tampoco aporta importante cantidad al producto final. (Santos et al., 2001)

5.1.3. Carbonización de la lignina

La lignina es el componente de la madera más difícil de aislar, por eso los estudios relacionados con su proceso de descomposición son escasos. Los mecanismos de descomposición de la lignina no están bien definidos debido a su estructura relativamente compleja que ocasiona rupturas y formación de innumerables compuestos. El comportamiento de la lignina frente al proceso de carbonización la hace el principal responsable de la formación del carbón.

El producto más importante en la descomposición de la lignina es el carbón, mostrando un rendimiento en carbón a temperaturas de 450 a 550 °C de 55%, lo cual es compatible con las temperaturas a las que trabajan los hornos y demuestra la importancia de la lignina en la producción de carbón vegetal. (Santos et al., 2001)

5.2. Efectos de la temperatura y la humedad

De todo lo que se ha descrito anteriormente pueden deducirse dos efectos: si la madera inicialmente tiene mucha humedad deberá quemarse mayor cantidad de madera para evaporar esta agua y por tanto se baja el rendimiento del proceso (si quema más madera se hace menos carbón). El otro efecto lo provoca la temperatura de carbonización, el % de

carbono que se convierte en producto está en función de ésta y si aumenta la temperatura aproximadamente a 700 °C el carbono fijo puede llegar a un 92% (véase la Tabla 2.) pero, el rendimiento baja, ya que se requiere quemar más madera para llegar a esa temperatura.

Tabla 2. Influencia de la temperatura de carbonización en el carbono fijo y el rendimiento.

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

Fuente: FAO, 1983.

5.3. Calidad de la materia prima (Leña)

La materia prima siempre es constituida por todas aquellas maderas con bajo contenido de humedad pero, los diversos estudios que se han realizado a lo largo del tiempo y en diversos países se han definido cuales son los mejores parámetros con los que debe contar toda materia prima destinada a producir carbón vegetal, estos se detallan a continuación.

5.3.1. Densidad aparente

La densidad aparente es una de las características de suma importancia en la materia prima, ya que influye en la capacidad de producción de carbón vegetal de un horno (a mayor densidad mayor masa de madera y por tanto mayor masa de carbón producido en un mismo volumen del horno) esta propiedad va desde los 0.2 a 0.86 g/cm³ y varía según la edad, especie, suelo y clima en que se encuentre el árbol.

Sin embargo, descartando estos factores y tomando en cuenta solo la densidad celular (ó densidad verdadera sin los poros de la madera) todas las maderas tienen un valor de 1.53 g/cm³ sin importar la especie (Santos et al, 2001). Una madera de 0.86 g/cm³ se considera muy pesada y tiende a producir un carbón muy frágil. El *Eucalyptus* es una especie ejemplar de las latifoliadas ó también llamadas frondosas (Arango y Tamayo., 2008) y tiene una densidad aparente comprendida entre 0.3 y 0.5 g/cm³.

Según Santos et al (2001), Las variaciones en la densidad a lo largo del tallo son menos consistentes que los que en la dirección radial. La proporción de madera juvenil en la dirección longitudinal del vástago tiende a aumentar. En *Eucalyptus grandis*, por lo general la densidad aumenta con el tiempo, a pesar de que una disminución inicial puede estar presente. La densidad, no debe considerarse como un índice de calidad de madera aislado. La composición química y las características anatómicas son factores que también deben ser considerados.

En la producción de carbón vegetal, la densidad de la madera afecta a la cantidad de carbón producido, porque para un volumen dado del horno la densidad de madera resulta en un

mayor rendimiento en peso. Además, la madera más densa produce carbón con una mayor densidad, con ventajas para algunos de sus usos. Para la madera de eucalipto se han encontrado algunas correlaciones entre la densidad de la madera y otros parámetros anatómicos y químicos para la producción de carbón, que son:

- El aumento de densidad de la madera es seguido por un aumento de espesor de pared de las fibras, reduciendo la albura y el aumento de la longitud de la fibra.
- A medida que aumenta la lignina y extractivos aumenta proporcionalmente la densidad.
- Se reduce la densidad de la madera con un contenido mayor de holocelulosa.
- Madera más porosa produce carbón de mayor porosidad.
- Los árboles más densos producen carbón más denso.

Estas correlaciones son importantes porque ayudan a seleccionar la madera y a tener el debido cuidado en el manejo de la madera que se utiliza para producir carbón vegetal.

5.3.2. Humedad

La madera tiene como componentes esenciales a la celulosa, lignina y agua que se encuentra de manera higroscópica y capilar. Al momento del corte de leña esta, puede poseer entre un 60 y 80% de peso en agua (base seca).

Para la carbonización es necesario un contenido de humedad de 20 a 30% (Santos et al., 2001), ya que producir carbón con leña de alto contenido de humedad provoca que el carbón sea quebradizo y frágil y por tanto generar gran cantidad de material fino al ser transportado y también genera mayores pérdidas ya que hay que quemar más madera para evaporar el agua reduciendo la cantidad de madera disponible para la pirólisis.

5.3.3. Tamaño

Aunque en teoría cualquier tamaño de leña puede ser carbonizado, la experiencia² ha demostrado que trozos muy grandes (mayores a 20 cm de diámetro) producen carbón muy frágil y trazos muy pequeños (menores a 10 cm de diámetro) aumentan el tiempo de acomodo de la leña dentro del horno con lo cual se incrementan los costos de producción del carbón vegetal (Santos et al., 2001).

5.3.4. Composición química

La estructura de todo árbol está basada en fibras que le dan su resistencia mecánica y en sistemas basculares que le permiten el transporte de diversas sustancias en su interior. En sí toda madera se compone básicamente de Carbono 50%, Oxígeno 44% y Hidrógeno 6%. Dichos elementos están distribuidos en los compuestos primordiales de la madera:

² Además por experiencia propia del autor.

Tabla 3. Porcentajes de componentes según el tipo de árbol.

Componente	% en Latifolias	% en Coníferas
Celulosa	40-45	*
Hemicelulosa	20-30	*
Lignina	18 - 25	25 - 35
Extractivos	3-8	*
Cenizas	0,4	*

* Mismo que el de la latifolias

Fuente: Santos et al, 2001.

Según Santos et al (2001), las mejores propiedades químicas de carbón, niveles más altos de carbono fijo, y una menor concentración de sustancias volátiles y cenizas se asocian con altos niveles de lignina, para ciertas condiciones de carbonización. Maderas con alto contenido de extractivos y lignina producen mayores cantidades de carbón, con una mayor densidad y más resistente en términos de propiedades físicas y mecánicas.

La lignina comienza a degradarse lentamente a temperaturas bajas, desde 150 °C y continua con la pérdida de peso a temperaturas superiores a 500 °C, resultando en un residuo carbonoso el 55% del peso en lignina. El otro 45% se divide en alquitrán (15%), el líquido condensado (20%) y los gases no condensables (10%). La temperatura de carbonización de la lignina es la temperatura media de los hornos utilizados actualmente para producir carbón vegetal.

5.4. Calidad del producto primario de la carbonización (carbón vegetal)

La calidad del carbón vegetal ha sido mejorada con el pasar de los años, como su principal demandante a nivel mundial son las siderurgias, estas son quienes han dado la pauta de la calidad del carbón vegetal, en palabras sencillas un buen carbón vegetal no debe de producir humo al quemarse y no debe de producir demasiado fino al manipularse. La calidad del carbón vegetal se define según algunas de sus propiedades que se miden y evalúan por separado aunque todas están interrelacionadas en mayor o menor medida.

5.4.1. Propiedades químicas

El carbón vegetal se compone principalmente de tres fracciones: carbono fijo, materiales volátiles distintos del agua y contenido de ceniza, la suma estas debe ser igual a 100%. El poder calorífico es otra propiedad de suma importancia, a continuación se describirá a que se refiere cada una de ellas.

5.4.1.1. Carbono fijo

Cardoso (2010), define al carbono fijo como la cantidad de Carbono presente en el carbón vegetal. El rendimiento en carbono fijo presenta una relación directamente proporcional a los contenidos de lignina, extractivos y densidad de la madera, e inversamente proporcional al contenido de holocelulosa (Se llama holocelulosa al total de carbohidratos poliméricos que hay en el material, es decir a la suma de celulosa y hemicelulosa). El contenido de

carbono fijo es inversamente proporcional al rendimiento gravimétrico (ó eficiencia de conversión) del carbón vegetal.

5.4.1.2. Volátiles

Los materiales volátiles pueden ser definidos como sustancias que desprende la madera, como los gases durante la carbonización y/o quema del carbón. Los factores que influyen ó influyen en la cantidad de materias volátiles en el carbón son la temperatura de carbonización, tasa de calentamiento y composición química de la madera, siendo la temperatura el principal parámetro que regula los contenidos de materias volátiles y carbono fijo (Cardoso, 2010).

5.4.1.3. Ceniza

La ceniza es un residuo mineral proveniente de los componentes minerales de la leña y de la corteza, además de los recogidos del suelo durante el proceso de producción. Generalmente, el carbón vegetal presenta menor contenido de cenizas comparado con el coque mineral (Cardoso, 2010). Las cenizas se componen de sustancias minerales, como la arcilla, sílice y óxidos de calcio y de magnesio, etc.

El contenido de cenizas en el carbón vegetal varía desde alrededor del 0,5% al 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 trozo de buen carbón vegetal tiene un contenido de cenizas de alrededor del 3% (FAO, 1983)

5.4.1.4. Poder calorífico

El poder calorífico se define como la cantidad de calor liberada en una combustión completa por unidad de masa de combustible, carbón vegetal en este caso en particular. Se expresa en Kcal/Kg ó KJ/Kg, tanto en combustibles sólidos y líquidos; en gases es en Kcal/m³ (Cardoso, 2010). Existen dos formas de medir el poder calorífico: la experimental, mediante una bomba calorimétrica y la analítica, por medio de los porcentajes de los componentes elementales del combustible; así también hay dos clases de poder calorífico: el superior (PCS) y el inferior (PCI) (Véase la lista de abreviaturas).

La diferencia entre ambos radica en que el PCS toma en cuenta la cantidad de calor disponible debido a la condensación de agua que poseía el combustible; mientras que el PCI no toma en cuenta dicho calor suponiendo que este se pierde, en otras palabras que el agua que contenía el combustible no condensa y por tanto no cede ese calor que utilizó para evaporarse. De lo anterior pueden deducirse dos cosas: una es, que el poder calorífico depende del contenido de humedad del combustible y entre mayor sea este, menor será el poder calorífico del combustible; la otra, es que el poder calorífico también depende del contenido elemental del combustible, siendo el carbón vegetal mayormente compuesto por carbono, y este a su vez depende de la temperatura de carbonización, un carbón hecho a altas temperaturas (>500 °C) tendrá menor poder calorífico, debido a la disminución en el % de volátiles.

Tabla 4. Efecto de la temperatura en el poder calorífico.

Temperatura de Carbonización	300 °C (Kcal/Kg)	500 °C (Kcal/Kg)	700 °C (Kcal/Kg)
1 ^a medida	7012	8109	7647
2 ^a medida	7122	8141	7693
3 ^a medida	7085	8101	7563
4 ^a medida	6980	8199	7720
5 ^a medida	7151	8185	7671
Media	7070	8147	7659

Fuente: Santos et al, 2001.

5.4.2. Propiedades físicas

Las propiedades físicas del carbón son muchas, tales como densidad aparente y verdadera, friabilidad, resistencia mecánica, entre otras pero, no se tomarán en cuenta en este trabajo porque no resultan de interés, debido a los fines de comercio hacia el sector doméstico que tiene el carbón producido en COPAPO, en cambio sí el destino de dicha producción fuera a una siderurgia, sí sería necesario determinar las demás propiedades.

5.4.2.1. Densidad a granel

Se define como la cantidad de masa de carbón vegetal que ocupa un volumen determinado, generalmente 1 m³. Esta densidad se ve fuertemente influenciada por la granulometría del carbón y es de mucha importancia para los productores debido a que el carbón se comercializa por sacos, es decir por volumen. La densidad del carbón vegetal está directamente relacionada con la de la madera que se utilizó, generalmente la densidad del carbón vegetal está comprendida entre 200 y 300 Kg/m³.

5.4.2.2. Humedad

El carbón recién sacado del horno contiene muy poca humedad, menos del 1% (FAO, 1983). Obviamente esto es debido a las altas temperaturas con que se trabaja, sin embargo en cuanto es expuesto al ambiente comienza a absorber humedad, por lo que esta puede alcanzar de 5 a 10% del peso del carbón vegetal y en casos extremos 15%. El contenido de humedad afecta el poder calorífico disminuyendo la cantidad disponible de calor.

Tabla 5. Resumen de las propiedades químicas y físicas (base seca).

Carbono fijo	75 - 80%
Cenizas	3 - 4%
Sustancia volátil	20 - 25%
Densidad a granel (Kg/m³)	250 - 300
Contenido de humedad	10% máx.

Fuente: FAO, 1983.

5.5. Fracción comercial y no comercial

La fracción comercial es considerada toda aquella fracción que es atrapada por una malla de 12.5 mm y la fracción no comercial se le llama a toda aquella fracción que pasa por una malla de 12.5 mm. Esto diferencia los trozos grandes que pueden venderse de los minúsculos que serán vistos como desperdicio por el consumidor.

Según COTTA (1996) citado por Santos et al., (2001), es de recalcar que la granulometría se ve influenciada por el tamaño de la leña inicial, si esta es muy grande tiende a producir carbón más fino, debido a la variabilidad que hay en la velocidad de carbonización en la sección transversal de la leña de gran diámetro y por un contenido de humedad alto en la leña inicial que inevitablemente provocará un desmenuzamiento del carbón vegetal, debido al aumento de la presión de vapor en la madera que se convierte en carbón.

5.6. Eficiencia de conversión

La eficiencia de conversión se define como la cantidad de carbón total incluyendo el carbón fino que se produjo, entre la cantidad de leña que se utilizó (restando la leña que no fue carbonizada). Normalmente se expresa en porcentaje. Tomando en cuenta que la leña al ser cargada en el horno tiene un importante contenido de humedad, mientras que el carbón al ser extraído del horno contiene porcentajes mínimos de humedad; es necesario realizar este cálculo en base seca (Santos et al., 2001). Por tanto se requiere conocer de antemano el contenido de humedad en la madera inicial para poder aplicar la siguiente fórmula:

$$EC = \frac{MC}{MMS} * 100 \quad (5.1)$$

Donde:

EC: es la eficiencia de conversión leña-carbón en un horno (%)

MC: es la masa de carbón vegetal obtenido de la carbonización (Kg)

MMS: es la masa seca de leña utilizada (disponible) para producir el carbón vegetal (Kg)

Para evitar confusiones esta fórmula se puede reescribir como:

$$EC = \frac{MC}{MMSi - MMSsq} * 100 \quad (5.2)$$

En donde:

MMSi: es la masa inicial de leña seca que se introdujo en el horno (Kg)

MMSsq: es la masa de leña sin carbonizar que se extrajo del horno (la cual está seca) (Kg)

El peso del carbón que se produce en cada hornada en una carbonera metálica transportable se relaciona con diferentes factores físicos. Según Cardoso (2010), los factores fundamentales que contribuyen a obtener resultados máximos son:

- Elevada densidad de la madera.
- Bajo contenido de humedad en la madera.
- Condiciones secas de operación y un sitio bien drenado para el horno.
- Elevada densidad de empaque de la carga, gracias al tamaño y forma regulares de la materia prima.

En la práctica se ha hallado que raramente pueden juntarse estas condiciones y por consecuencia los rendimientos y las eficiencias de conversión difieren en manera considerable (FAO, 1983).

5.7. Tecnologías de carbonización

El humano a fabricado carbón vegetal desde los tiempos de las cavernas, de hecho hasta la Naturaleza lo fabrica, sólo necesita materia orgánica, presión, temperatura y mucho tiempo, el resultado será lo que se llama carbón mineral pero, este método no es objetivo de éste acápite, sin embargo se describirán de manera sencilla las tecnologías antiguas hasta las más recientes que se han utilizado para producir carbón vegetal.

En síntesis puede decirse que cualquier método ó tecnología produce carbón de buena calidad pero a expensas del rendimiento de la operación de carbonización y de la cantidad de trabajo humano; la humanización del trabajo es lo que ha incentivado la creación de nuevas tecnologías de carbonización a lo largo de los años.

5.7.1. Parvas

En Nicaragua ésta es la técnica más usada, se basa en excavar una fosa de buena profundidad y de forma rectangular la cual se carga con la leña destinada para convertirse en carbón, luego esta es tapada por una cama de hojas y maleza para formar el sostén de la tierra que es la cubierta final, por último se tiene que encender la fosa por medio de orificios previamente hechos para este fin y se controla el ingreso de aire con orificios similares. El proceso culmina cuando el humo desprendido se torna transparente.

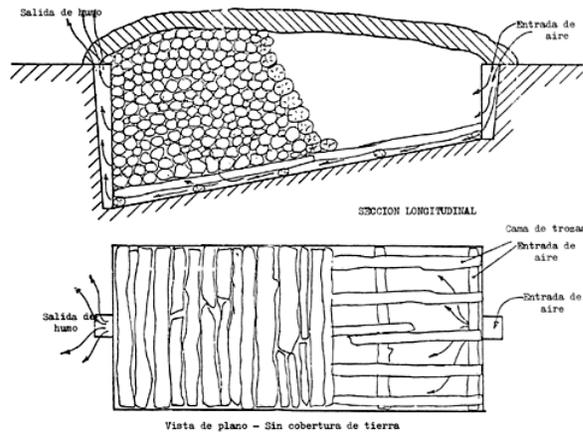


Figura 2. Esquema de una parva para producir carbón vegetal.

Fuente: FAO, 1983.

Como consecuencia del uso de esta técnica se tiene un bajo rendimiento en la conversión de la leña al carbón, (una parte de carbón por cada seis partes de leña iniciales) también baja calidad y cantidad de carbón útil, es decir se obtiene poco carbón comercializable debido a que una parte de la leña se quema completamente (se convierte en ceniza) y otra no se quema (se forma un tizón).



Fotografía 1. Parva cargada de leña (Izq). Parva en funcionamiento (Der).
Fuente: PROLEÑA, 2010.

5.7.2. Horno de ladrillo: Media Naranja

Los hornos de ladrillo son una evolución de la tecnología y han sido desarrollados por diversos países del mundo algunos de ellos son EE.UU., Brasil y Argentina; pero todos tienen en común su construcción con ladrillos ó cemento armado. Su funcionamiento es sobre la superficie de la tierra, tienen una geometría semiesférica y son una fuente económica para aumentar la calidad, el control y el rendimiento del proceso de carbonización.

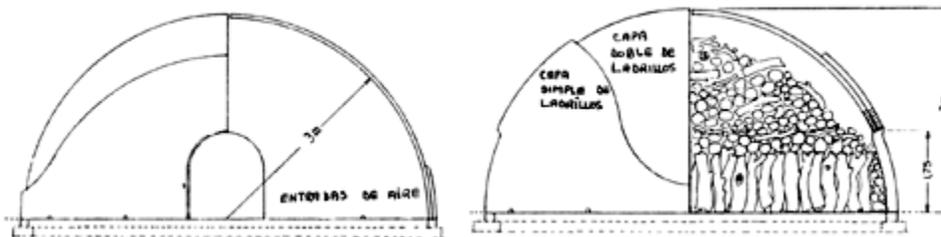


Figura 3. Horno “Media Naranja” Argentino.
Fuente: FAO, 1983.



Fotografía 2. Carga del Horno Media Naranja con leña (Izq.). Horno Media Naranja en funcionamiento gases saliendo por las ventanas (Der.).

Fuente: PROLEÑA, 2010.

5.7.3. Hornos metálicos: TPI

En los años 30 se difundió en Europa para la fabricación de carbón vegetal el empleo de hornos metálicos cilíndricos transportables. Durante la Segunda Guerra Mundial ésta técnica fue desarrollada aún más por el Reino Unido (U.K) en su laboratorio de investigación de productos forestales (UK Forest Products Research Laboratory). Diversas versiones del diseño original fueron usadas de un extremo al otro en el Reino Unido, esta tecnología fue transferida a los países en vía de desarrollo a fines de los años 60 (FAO, 1983).

El Tropical Products Institute (TPI) que es una unidad científica de la Overseas Development Administration, ha adquirido considerable experiencia en el funcionamiento de diversos modelos de hornos transportables de metal tanto en el Reino Unido como en muchos países en desarrollo. El modelo de horno transportable ha evolucionado hasta llegar a un modelo que se considera ahora ser óptimo en economía de construcción, robustez y durabilidad, funcionamiento sencillo con eficiencia y productividad máxima para las situaciones de los países en desarrollo (FAO, 1983).

El horno metálico TPI tiene la gran ventaja de ser móvil, por tanto no tiene que ser planificado junto con el deterioro del bosque en el cual funcionará, sino que este horno puede “avanzar” con el frente de corte, también posee una eficiencia de conversión que llega al 28.12% base seca (FAO, 1983), con un carbón de buena calidad lo cual significa que permite un mejor control del proceso de carbonización.

El horno TPI consta de dos partes cilíndricas (una superior y otra inferior) las cuales se colocan una sobre la otra. La parte inferior tiene diversos canales diseñados para el encendido de la carga, otros para el control del aire y otros para el evacuado de los gases de carbonización.



Fotografía 3. Horno metálico TPI.

Fuente: FAO, 1983.

5.7.3.1. Principales características del horno TPI

Según FAO (1983), el horno TPI común tiene las siguientes características en cuanto a sus materiales de construcción y geometría:

- Se usa una chapa de acero de 3 mm de espesor para fabricar la sección del fondo del horno; para la sección superior y para la tapa se usa chapa de acero de 2 mm de espesor.
- Las dos secciones principales del horno son cilíndricas.
- Se usan repisas con perfiles de hierro-ángulo de 50 mm para soportar la sección superior y la tapa. Estos soportes están soldados en la parte interna del borde más alto de las dos principales secciones cilíndricas.
- Los ocho tubos de entrada/salida ubicados debajo de la sección inferior del horno se abren en la base. Alrededor del hueco en la cara superior de cada canal, se ha previsto un collar para sostener la chimenea durante el funcionamiento del horno.
- En la tapa del horno hay cuatro bocas a igual distancia para la liberación del vapor.

De estas características principales se han ido desglosando un gran número de variantes que incluyen: forma cónica en la sección superior del horno (no es cilíndrico), uso de tubos rectangulares cerrados para la descarga de los gases y alquitranes, también han surgido variantes con más espesor en la chapa que se usa en el fondo con lo cual se logra aumentar la vida útil del horno aunque se eleva un poco el costo de elaboración, pero en sí, todos se han mantenido fieles a la idea original de que el horno sea transportable y duradero.

5.7.3.2. Montaje y operación del horno TPI

FAO (1983), presenta la siguiente serie de fotografías donde se aprecia el montaje y operación del horno TPI:



Fotografía 4. (a)
Colocación de los canales.



(b)
Colocación de la leña.



(c)
Material de ignición.



(d)
Introducción de la carga.



(e)
Encendido de la carga.



(f)
Carga en carbonización.

En la Fotografía 4 (a) se aprecia el montaje del cilindro inferior del horno y la distribución de los canales de descarga de alquitranes y gases. De (b) a (d) se puede notar el acomodo de la leña dentro del horno con lo cual intenta propiciar la buena distribución de los gases de combustión en toda la sección transversal del horno. En (e) y (f) se demuestra el método de encendido y el inicio de la carbonización, respectivamente.

Luego de estos pasos solamente resta sellar las entradas de aire controlando el color de la emisión de gases y cuando se tornen transparentes se cierran todas las posibles entradas de aire y se deja enfriar el horno. El proceso de carbonización en total dura aproximadamente 24 horas (durante el cual se requiere supervisión constante) y 24 horas más para el enfriado del horno (el cual se sabe por el tacto). Las desventajas más importantes del horno TPI por decir algunas: debido a falta de mantenimiento los conductos de gases se pueden bloquear con alquitrán acumulado, también puede haber daño en las paredes del horno debido a los focos de altas temperatura que se generan por la incorrecta circulación de los gases FAO, (1983).

5.7.4. Hornos metálicos: Contenedor

El horno metálico “Contenedor” es un horno de elevada productividad cuando se compara con los hornos tradicionales. Este horno fue desarrollado y perfeccionado en Brasil con el objetivo de mejorar la calidad del carbón producido, aumentar la producción, humanizar el trabajo, y reducir los costos (Santos et al., 2001).

La ONG PROLEÑA, llevó a su cargo la introducción en el país de la tecnología de hornos contenedor para la producción de carbón vegetal desde Brasil, y que posteriormente pasó por una mejora en BIOMASA-UNI y últimamente PROLEÑA ha regresado a la iniciativa con una nueva generación en cuanto al diseño de estos hornos. Ya se cuenta con muchas variantes del diseño de este tipo de hornos pero en esencia todas buscan disminuir el tiempo de carbonización.

La tecnología de estos consiste en un contenedor de forma cilíndrica que se abre por la parte inferior, aquí se carga la leña y mediante un sistema de grúa aérea el contenedor cargado de leña se levanta y se coloca sobre la base desde donde se enciende la carga y se controla la entrada del aire mediante una puerta deslizante; esta tecnología cuenta con un sistema de evacuación de gases mediante un ventilador de succión y posterior a éste un quemador de los gases de carbonización (para evitar la liberación de polución a la atmósfera). En la Fotografía 5 pueden apreciarse todos los componentes del sistema de carbonización de madera mediante hornos Contenedores.



Fotografía 5. Horno Contenedor y sus componentes.

Fuente: COPAPO, 2011.

El diseño del horno contenedor facilita su operación ya que no requiere que se estén revisando el color de los gases de escape constantemente, sino que simplemente se enciende y al cabo de 8 a 10 horas se apaga para que se enfríe.

Permite obtener eficiencias de conversión del 35 al 38% en base seca de la madera inicial lo cual comparado con el 25% a 33% que ofrecen otras tecnologías es una ventaja importante, también provee carbón de mejor calidad ya que el control del proceso siempre es el mismo (Santos et al., 2001).

5.7.4.1. Especificaciones técnicas y operación del horno Contenedor de COPAPO

En la siguiente tabla, se muestran las características técnicas del sistema de carbonización y algunas variables de operación (las cuales no necesariamente son monitoreadas en la operación como la humedad de la madera).

Tabla 6. Especificaciones técnicas del horno Contenedor de COPAPO.

Contenedores metálicos	2 m ³ de volumen bruto Aislamiento de fibro cerámica, 1 1/2” esp. 2 unidades
Tipo de madera	Cualquier madera Humedad óptima 20% Humedad máxima 30% Diámetro máximo 10 cm.
Capacidad grúa viajera	1.5 ton máximo Tecele manual
Tiempo de operación	8 – 12 hrs, en función del contenido de humedad de la madera.
Cámara de combustión de gases	Construida en ladrillos de arcilla Chimenea de 2.5 mts de altura.
Ventilador de succión	Eléctrico, 120 volt, monofásico, 1/3 Hp

Fuente: PROLEÑA, 2011

El procedimiento de carga es simple, se utiliza madera de 86 a 87 cm de largo y de unos 10 cm de diámetro, estas se colocan en dos capas en dirección del eje axial del horno (véase la Fotografía 6), una vez cargado el horno contenedor, se alza con el tecele, se mueve hasta posicionarlo sobre la base del horno y el contenedor es bajado para dejarlo montado sobre ésta, previamente en esta base se coloca leña (que pueden ser ramas) en cantidad suficiente y se ha encendido asegurándose que antes de montar el contenedor, esta leña tenga buen fuego ya que es la que proporciona la energía inicial para la carbonización. En este momento la puerta de entrada de aire debe estar totalmente abierta.

Luego de montado en la base (véase la Fotografía 7) y encendida la leña en el interior del horno se cierra casi totalmente la puerta de regulación del aire con el fin de permitir el mínimo paso hacia el horno y se coloca arena o tierra en la unión que existe entre la base del horno y el contenedor como un sello que impide que entre aire en exceso, solo el oxígeno necesario se admite por la puerta de regulación de aire para que se quemara solo la leña requerida para lograr que el resto de la carga de leña alcance la temperatura adecuada que permita realizar el proceso de la carbonización. PROLEÑA, (2011).



Fotografía 6. Horno Contenedor con la leña en su interior.

Fuente: PROLEÑA, 2011.



Fotografía 7. Horno Contenedor siendo montado sobre su base.
Fuente: PROLEÑA, 2011.

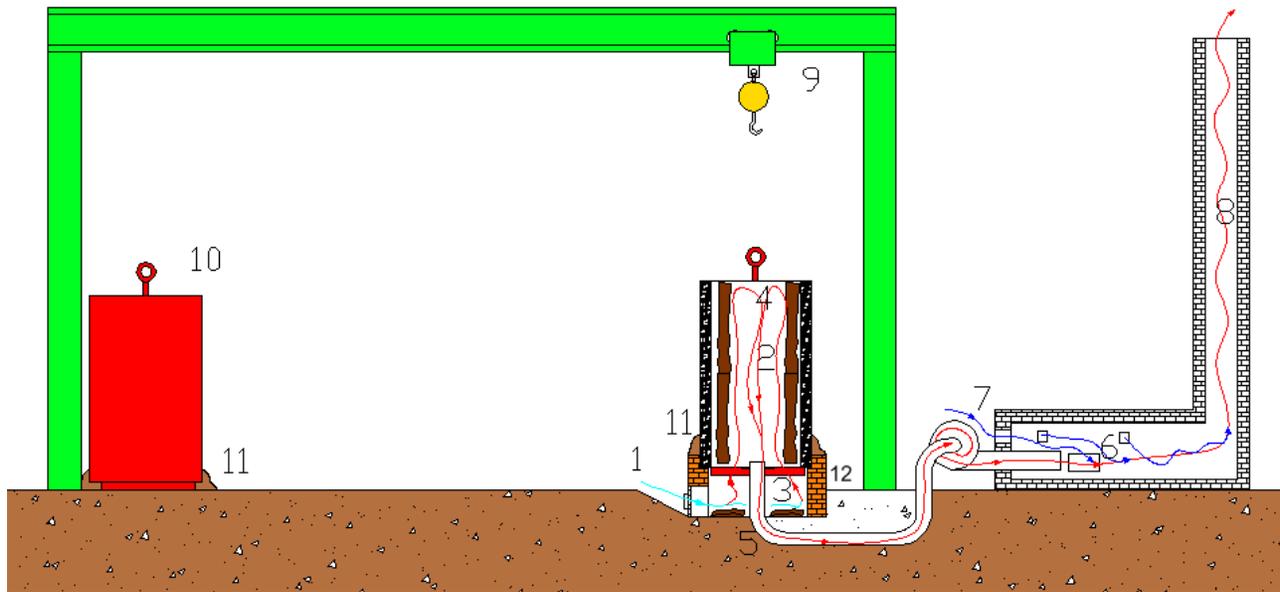


Figura 4. Esquema de funcionamiento del horno Contenedor
Fuente: Elaboración propia del autor, 2012, sin escala.

Ubicación de la puerta de aire, entrada de aire (1). Carga de leña en el interior del contenedor (2). Leña de encendido en la base de horno, flujo de los gases calientes (3). Concentración de los gases calientes, inicio de la carbonización (4). Evacuación de los gases generados en el proceso por succión del ventilador (5). Mezcla y quemado de gases de carbonización (6). Entradas de aire para la quema de gases de carbonización (7). Evacuación de los gases de combustión por la chimenea (8). Tecele y viga (9). Contenedor en enfriamiento (10). Sello de tierra (11). Base del horno contenedor (12).

5.7.4.2. Mantenimiento y limpieza

El sistema de horno contenedor necesita poco mantenimiento correctivo, sin embargo es muy importante el mantenimiento preventivo, este último consta entre otras cosas de lubricación en los componentes móviles de la grúa y limpieza del alquitrán que se incrusta en todas las partes del sistema que tienen contacto con el gas de carbonización.

Uno de los problemas más frecuentes que se presentan en este tipo de tecnología es que debido a que la carbonización ocurre a una temperatura cercana a los 500 °C (por el buen aislamiento que posee el Contenedor) el carbón sale sumamente seco con apenas el 2% a 3% de humedad por tanto se corre el riesgo de que con la simple radiación solar ocurra ignición espontánea del carbón almacenado. FAO, (1983) recomienda que en la manipulación y transporte del carbón, éste tenga un contenido de humedad entre el 5% a 10% de su peso con lo que se elimina el peligro de ignición espontánea.

5.8. Costos de producción

Los “costos” son aquellos pagos ya sea monetarios o en especie que se realicen ya sea en el pasado, presente o futuro y que son vistos como un egreso. “De producción” se refiere a aquellos costos que están relacionados a la transformación de la materia prima para obtener un producto deseado (Urbina, 1995). Es decir los costos de producción son todos aquellos pagos en los que se tiene que incurrir para poder obtener el producto final. Estos pagos se describen a continuación:

- Materia prima: pago por la leña, corte y transporte hasta el sitio del horno.
- Mano de obra directa: pago al/los operarios de los hornos.
- Mano de obra indirecta: pago a jefes, supervisores o asesores.
- Costos de los insumos: pago por consumo de agua y energía eléctrica.
- Costo del mantenimiento: pago a operarios e insumos por mantenimiento preventivo o correctivo.
- Activos tangibles e intangibles: inversión en los hornos, herramientas y otros gastos respectivamente.

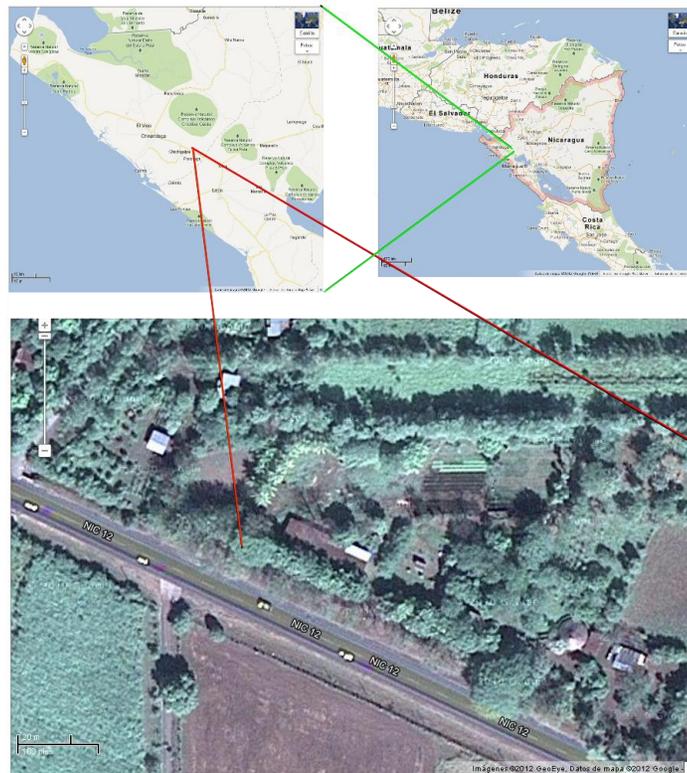
VI. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describirán los métodos que se utilizaron para tomar las muestras de leña y carbón vegetal necesarias para los análisis físicos y químicos que determinaron la calidad de la materia prima y el producto primario lo que permitirá inferir acerca del buen funcionamiento del horno y si hay diferencia entre la calidad del producto obtenido en este tipo de horno con respecto al método tradicional. Los datos de peso de leña y carbón servirán para determinar la eficiencia de conversión en el horno. Los procedimientos de los análisis físicos y químicos necesarios están plasmados en los anexos.

6.1. Descripción del área de trabajo

COPAPO nace en el año 1991 como una Cooperativa dedicada al trabajo en viveros, con el pasar de los años y de mucho financiamiento de diversas entidades, se ha convertido en una de las mejores cooperativas de Nicaragua y se dedica a trabajar en las áreas de: carpintería, venta de leña, vivero, apicultura, venta de madera en pie certificada y más recientemente a la producción de carbón vegetal mediante tecnología eficiente.

La cooperativa tiene como beneficiarios a 109 personas, está ubicada en el municipio de Posoltega, en el Km. 109.5 de la carretera León-Chinandega, cuenta con una estructura organizacional para el manejo de la cooperativa y para dirigirla. Sus socios son propietarios de tierras con Eucalipto reforestado el cual se utiliza para alimentar el horno.



Fotografía 8. Macro localización de la Cooperativa de Productores Agroforestales de Posoltega. COPAPO.

Fuente: Google maps, 2012. Lat. 12°33'12.90"N, Lon. 86°56'26.40"O

El terreno donde está ubicado el horno es plano, está bajo techo pero sin paredes con lo cual se evita el peligro de asfixia potencial por inhalación de los gases de carbonización (constituidos principalmente por CO₂ y CO). El piso es de tierra la que se utiliza para sellar las uniones del horno, en el lugar hay suministro de energía eléctrica. La tecnología de hornos metálicos que posee COPAPO tiene la ventaja de que puede carbonizar en invierno, sin embargo, esto es válido sí se cuenta con madera seca en ese momento.

6.2. Caracterización del proceso de producción

El proceso productivo de COPAPO inicia con la adquisición de la materia prima, su acondicionamiento y transporte. Finaliza con el proceso de carbonización, donde se obtiene el producto final (la caracterización del producto final se realizó mediante los análisis químicos y físicos.) en el flujograma siguiente se representa el orden de cada etapa del proceso productivo y los puntos de muestreo para este estudio.

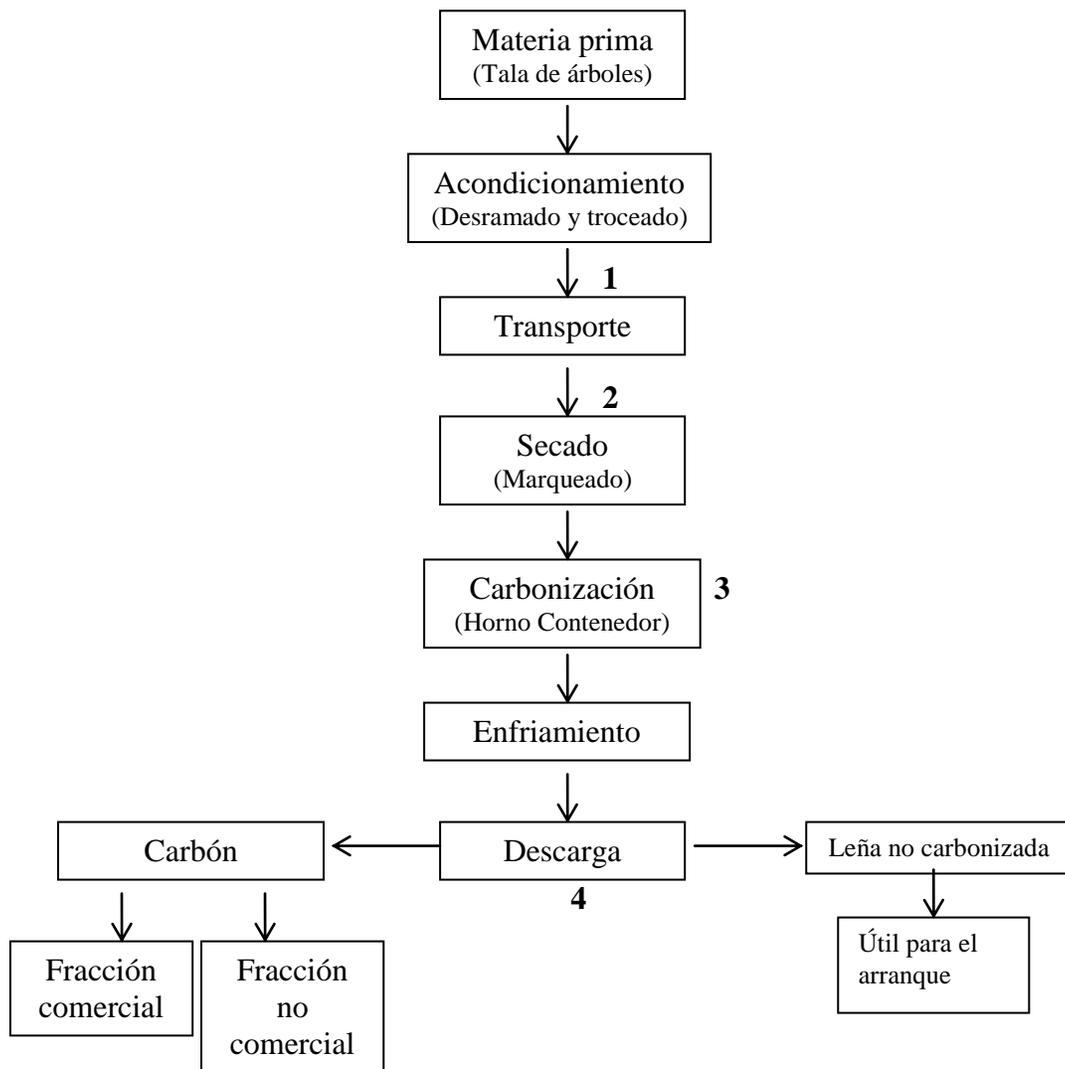


Figura 5. Flujograma simplificado del proceso productivo de COPAPO usando el horno Contenedor y los puntos de muestreo usados para éste estudio.

Fuente: Elaboración propia del autor, 2012.

6.2.1. Puntos de muestreo e instrumentos utilizados para los análisis en campo

El flujograma anterior presenta en qué momento del proceso productivo se obtuvo una muestra para análisis ya sea en el campo o en el laboratorio, la siguiente tabla resume el propósito de cada punto de muestreo. Los equipos necesarios fueron: una balanza de capacidad de 500 Kg, calibrada y con un margen de error de 0.1 Kg, una balanza de 30 Kg con precisión de 50 g y una criba con malla de 12.5 mm X 12.5 mm. Para la recolección y traslado de las muestras al laboratorio se necesitaron bolsas plásticas. En las mediciones de temperatura se utilizaron termopares de sonda e infrarrojos láser. Los equipos necesarios para los análisis de laboratorio se detallan en cada uno de los procedimientos descritos en los anexos.

Tabla 7. Propósito de los puntos de muestreo utilizados.

Punto de muestreo	Aplicado en	Parámetro medido	Tipo de medición
1	Leña recién cortada	Contenido de humedad (%)	Análisis de laboratorio*
		Diámetro, longitud, especie, edad.	En campo**
2	Leña secada	Contenido de humedad (%)	*
3	Horno	Temperatura y tiempo de carbonización (°C, h)	**
	Contenedor		
4	Leña no carbonizada	Peso (Kg)	**
	Carbón vegetal	Peso fracción comercial (Kg)	**
	Carbón vegetal	Peso fracción no comercial (Kg)	**
	Carbón vegetal	Densidad a granel (Kg/m ³)	**
	Carbón vegetal	Contenido de humedad (%)	*
	Carbón vegetal	Materia volátil (%)	*
	Carbón vegetal	Cenizas (%)	*
	Carbón vegetal	Carbono fijo (%)	*
Carbón vegetal	Poder calorífico (Kcal/Kg)	*	

6.2.2. Caracterización de la Materia prima

El Tamaño del trozo de leña, (largo y el diámetro) que fue introducida en el contenedor para ser carbonizada se registró con una cinta métrica, no se midieron todos los trozos de leña introducidos, sino que se tomaron los más grandes y los más pequeños, Así mismo se indagó sobre la especie de árbol utilizado y la edad del mismo y la preparación que se le dio a la leña antes de la carbonización.

6.2.3. Descripción del pesaje de la leña

La leña con que se alimentó al horno fue pesada antes de ser introducida a éste, mediante una balanza de 500 Kg de capacidad. De esta leña se tomaron 5 trozos de distinto peso cortados en forma de discos de unos 5 cm de espesor, como muestra para su análisis de humedad en cada ensayo.



Fotografía 9. Pesaje de la leña a ser cargada dentro del Horno Contenedor.

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

6.2.4. Proceso de carbonización

Durante el proceso de carbonización se registró la hora en que se colocó el contenedor cargado de leña sobre la base del horno encendido en cada ensayo, siendo esta la hora de inicio de la carbonización; la hora en que el contenedor fue alzado de la base del horno fue la hora en que finalizó el proceso de carbonización. La diferencia entre la hora de inicio y fin corresponde al tiempo de carbonización (h), también se registró el momento en que el contenedor se abrió, este último sólo con el propósito de registrar el dato.

La temperatura de carbonización se monitoreó como una medida aproximada en el horno contenedor ya que no tiene un orificio u otro medio que permita introducir una sonda termopar o la utilización de termómetros infrarrojos de láser, los puntos de medida fueron en las líneas de descarga de gases donde la temperatura es mucho menor que en el centro interior del horno contenedor y en la parte superior del horno contenedor que no cuenta con aislante térmico; por lo que el dato registrado no representa la temperatura de carbonización que fue alcanzada. Es por esto que la medición de la temperatura de esta forma solo sirvió como un indicativo del funcionamiento del horno contenedor. En la Figura 6, se presenta un esquema muy simplificado para dar una mejor comprensión de los puntos de medición.

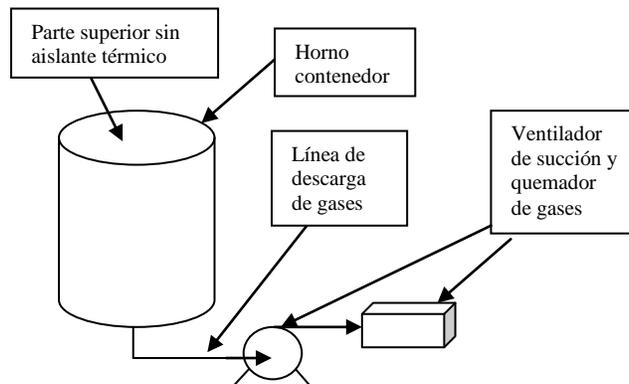


Figura 6. Esquema simplificado de los puntos de medición de temperatura en el horno contenedor.

Fuente: Elaboración propia del autor, 2012.

6.2.5. Pesaje del carbón vegetal

A medida que el carbón era extraído del horno contenedor se colocó en sacos, estos se pesaron en el mismo tipo de balanza que se describió en el apartado anterior, de esta manera se contabilizó el peso total de carbón producido. También se registró el peso de la madera que se extrajo sin carbonizar, con lo cual se obtienen los datos requeridos para calcular la eficiencia de conversión del horno.



Fotografía 10. Pesaje del carbón producido (izquierda), leña sin carbonizar (derecha).

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

6.2.6. Obtención de la fracción comercial, no comercial, densidad a granel y muestras de carbón vegetal

Una vez llenos y pesados todos los sacos, se escogieron 2 sacos al azar para hacer los análisis de fracción comercial y no comercial, al mismo tiempo se realizó el análisis de densidad a granel.

El carbón de esos 2 sacos se descargó en una malla de 12.5 mm X 12.5 mm para cribarlo, la fracción retenida fue colocada en un cajón con dimensiones de 0.6 X 0.6 X 0.6 m a como se describe en el apartado A.2. Una vez lleno, se pesó el conjunto, el valor obtenido representa la fracción comercial y con este se calculó la densidad del carbón.



Fotografía 11. Determinación de la densidad a granel y fracciones comercial y no comercial.

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

La fracción no comercial se obtuvo recolectando el material que traspasó la malla y se registró su peso. El valor total obtenido representa la fracción no comercial generada en el proceso productivo.

Las muestras de carbón vegetal para análisis físico y químico tuvieron un peso de 1.5 Kg cada una y de ésta se tomó la cantidad necesaria para cada uno de los análisis. Dicha muestra fue tomada de diversos puntos del cajón a medida que se descargó el carbón para re-empacarlo, logrando con esto tener una muestra representativa de carbón de cada ensayo.

6.3. Formulación del balance de materia del proceso productivo de carbón vegetal

La formulación del balance de materia parte de la etapa de secado en base a los datos recopilados de peso de leña cargada, y el contenido de humedad de ésta, que se determinó en laboratorio, con los cuales se encontró la masa de leña seca y posteriormente usando el % de humedad de la leña al momento del corte, se determinó la cantidad de leña humedad extraída de los lotes.

La diferencia entre la cantidad de leña extraída de los lotes y la cantidad de leña en masa seca que se cargó en todos los contenedores es la cantidad de agua que contenía la leña, y restando de ésta la cantidad del agua de la leña al momento de cargar los contenedores se obtuvo el agua evaporada en la etapa de secado.

Con los datos promedio de peso de carbón producido, peso de leña no carbonizada y contenido de humedad de la leña cargada y del carbón producido se obtuvo la masa de leña seca cargada, de la cual restando la leña sin carbonizar y el carbón producido se obtuvo la masa de leña que se transformó en gases combustibles, no combustibles, alquitranes, y cenizas. El agua evaporada en esta última etapa se calculó al encontrar la cantidad de agua presente en el carbón vegetal y restarla a la cantidad de agua que tenía la leña al ser cargada.

6.4. Toma y número de muestras

Los ensayos de quema (producir carbón) permitieron medir los parámetros que se muestran en la Tabla 7, que determinaron la calidad del carbón vegetal. Se realizaron 13 ensayos, en el menor tiempo posible es decir, en un máximo de 4 semanas de los cuales se extrajeron 13 muestras de carbón vegetal. También se determinó la eficiencia de conversión leña-carbón según lo descrito en el apartado 5.6, para cada ensayo.

6.5. Manejo de las muestras de leña y de carbón vegetal

Las muestras de leña para la determinación del contenido de humedad se introdujeron en bolsas plásticas selladas para evitar el intercambio de humedad con el ambiente, las muestras se guardaron lejos del sol y en un ambiente climatizado para evitar su deterioro luego se realizó el procedimiento de determinación de humedad (véase apartado A.3.-determinación de contenido de humedad). Las muestras de carbón vegetal que se recolectaron luego de los análisis de fracción comercial y no comercial, se sellaron en bolsas plásticas y se guardaron y conservaron del mismo modo.

6.6. Análisis de laboratorio

Estos análisis se realizaron en el laboratorio del Programa Biomasa en el RUPAP. A las muestras de madera se les realizó el análisis de contenido de humedad, se pesaron y después se introdujeron en un horno secador a 104 °C durante 24 horas, luego fueron pesadas nuevamente. Las muestras de carbón vegetal se pesaron y se introdujeron en el horno secador a 104 °C durante 2 horas y después se pesaron. Con estos datos se obtuvo el contenido de humedad en la madera utilizada al momento de cargar cada contenedor y el contenido de humedad del carbón producido en cada ensayo.

Para los análisis de contenido de materia volátil, ceniza y poder calorífico cada muestra de carbón vegetal tuvo una fase preparativa donde debió ser triturada en un mortero después con un molino de martillo de alta velocidad (IKA M20) posteriormente se hizo pasar el material triturado por una criba de 500 micras lo retenido se guardó y lo que atravesó la malla se tamizó nuevamente en una criba de 180 micras.

El material retenido en ésta última criba se introdujo en el horno secador durante 2 horas para eliminar la humedad, previamente se pesó una muestra como control (para verificar el cambio de peso lo que significa que se eliminó la humedad) cumplido ese tiempo todas las muestras fueron introducidas en un desecador para evitar que absorbieran humedad del ambiente; de este material se tomó lo necesario para realizar cada análisis.

Los análisis de contenido de materia volátil se realizaron según el apartado A.3-contenido de materia volátil, cada muestra de cada ensayo se analizó la muestra y 2 réplicas y para el análisis de contenido de ceniza la muestra y una réplica, según el procedimiento del apartado A.3-contenido de ceniza. Para el análisis de poder calorífico se siguió el procedimiento del apartado A.4.

6.7. Determinación de los costos de producción

Esta tarea se realizó en paralelo a los ensayos de quema, mediante preguntas al personal de COPAPO acerca de los gastos en que se incurre al obtener carbón vegetal, se intentó recopilar todos los costos enumerados en el apartado 5.8, pero en lo posible es un estimado porque no se obtuvo ningún registro oficial por parte de la cooperativa a pesar que tienen un sistema contable.

6.8. Análisis comparativo

Los datos que se recopilaron en campo y los resultados de los análisis de laboratorio corresponden al horno tipo contenedor. Los datos de campo y resultados de análisis de laboratorio (análisis ejecutados en el laboratorio del programa Biomasa en el RUPAP) del método de parva los proporcionó PROLEÑA de un estudio propio que se realizó en la comunidad de Apompuá, El Transito, en el municipio de Nagarote, en el departamento de León, en el año 2010, la elaboración de la tabla de comparación y discusión de estos datos se realiza más adelante.

VII. RESULTADOS

En este capítulo se presentan todos los resultados obtenidos desde el inicio del proceso productivo hasta los análisis de laboratorio, cada uno de los resultados se discutirá o analizará en el siguiente capítulo.

7.1. Descripción del proceso productivo de carbón vegetal de COPAPO utilizando el horno Contenedor

La cooperativa cuenta con un horno tipo TPI y otro tipo Contenedor, ambos han sido utilizados pero se tiene preferencia por el horno Contenedor debido a su simpleza de operación. El proceso productivo empieza con una operación muy básica para iniciar toda producción.

7.1.1. Obtención del financiamiento

Tomada la decisión de producir carbón vegetal, se le plantea el proyecto a organizaciones de financiamiento o de cooperación para que se les otorgue el capital inicial sin necesidad de remuneración. También puede ocurrir una participación bipartita entre la cooperativa y algún miembro de ésta o ajeno a ella, en la cual una parte pone el dinero y la otra la mano de obra. Dicho financiamiento sea por un medio u el otro, puede ser o no del 100% del costo total de la operación de producción en caso de no serlo la cooperativa se ve en la situación de costearse.

7.1.2. Corte de leña

Esta operación es de suma importancia porque de la calidad de la leña adquirida depende la calidad del carbón vegetal a producir. Además debe ser certificada para favorecer la reforestación de los bosques del país. Los socios de la cooperativa son quienes poseen plantaciones de *Eucalyptus calverdensis* que se usa como materia prima certificada.



Fotografía 12. Lote de madera comprado

Fuente: Propia del autor, Diciembre, 2011.

Nótese lo delgado de los árboles, lo que indica que son muy jóvenes.

Estas plantaciones son compradas a los socios por la cooperativa como un “lote”, es decir un área de terreno del cual se obtiene en madera lo que éste contenga. Antes de realizar la compra que es seguida por la tala rasa, se viaja al lote y se hace una inspección visual de la cantidad de árboles y el aspecto de los mismos, en lo referente a si está recto y al tamaño que tienen.

El corte de la madera a carbonizar se hace con el uso de una motosierra, el operador, su ayudante y dos cargadores que levantan la madera del suelo y ponen en el remolque, que es halado por un tractor conducido por el motosierrista.



Fotografía 13. Corte del árbol (Izq), limpieza de ramas y medición (cen), trozado (Der).

Fuente: Propia del autor, Diciembre, 2011.

El motosierrista se encarga de tumbar el árbol luego el ayudante corta las ramas delgadas y marca el tronco usando un machete y una guía para definir el tamaño de los trozos de leña a cortar (aquí se debería escoger que árbol puede ser más útil como madera para aserrar como poste, o elemento estructural del que se pretende convertir en carbón vegetal). Luego que el árbol es cortado en secciones, los cargadores, (dos personas) se encargan de llevar la madera cortada del sitio al remolque y acomodarla para que alcance la mayor cantidad posible.



Fotografía 14. Carga de leña del sitio de corte al remolque.

Fuente: Propia del autor, Diciembre, 2011.

El corte de madera para los ensayos se realizó desde el 26 de Diciembre del 2011 al 06 de Enero del 2012. Se cosecharon aproximadamente 28 m³ de madera, proveniente de 2 lotes distintos uno con árboles muy jóvenes y el otro con árboles de unos 3 años de edad como máximo, en ambos lotes los árboles eran rebrote.



Fotografía 15. Base de los rebrotes cortados.

Fuente: Propia del autor, Diciembre, 2011.

Se planeó cortar la leña con un largo de 0.85 m y 0.10 m de diámetro; siendo este largo la mitad de la altura del horno contenedor, así se colocaron dos niveles de leña, uno sobre otro dentro del horno.



Fotografía 16. Diámetros y longitud de la leña cortada.

Fuente: Propia del autor, Diciembre, 2011.

7.1.3. Transporte de la leña

Una vez cargado el remolque del tractor se procede a llevar la madera hasta la cooperativa (véase la fotografía 17.), se intenta llevar el remolque lo más cargado que se pueda, y en dependencia de la distancia entre el lote y la cooperativa se realizaron de uno a dos viajes al día. Las plantaciones estaban ubicadas a 2 Km. y a 4 Km. de la cooperativa, donde están los hornos, una vez ahí se descarga la leña y a la vez se marca (proceso de apilado en “marcas” que median unos 2.2 X 0.8 X 0.8 m) junto al área techada de los hornos, expuesta al sol y el viento para favorecer su secado natural.



Fotografía 17. Descarga de la leña a la par de los hornos.

Fuente: Propia del autor, Diciembre, 2011.

7.1.4. Secado de la leña

La leña estuvo al sol y al viento un mes para propiciar su secado natural pero, se cometió el error de no dejar espacio entre las filas de marcas para propiciar el paso del aire lo cual influye mucho en el secado de la madera. Para conocer el contenido de humedad inicial de la leña en el momento del corte se tomaron 2 trozos de leña como muestra y se dejaron secar en condiciones similares a las de la fotografía siguiente, se registró el ritmo de secado que tuvo en esas condiciones, los datos se presentan en la tabla 8.



Fotografía 18. Leña apilada a la par de los hornos y al sol para permitir su secado.

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

Véase que las filas de leña no están separadas entre sí.

Tabla 8. Datos del secado de 2 trozos de leña al aire libre (*Eucalyptus calmaldulensis*, Febrero 2012).

Leña 1				
Días	Peso (g)	Contenido de humedad (%)		Diferencia (%)
		bh*	bs**	
0	2546	-	-	54.08
12	1903	25.26	33.79	28.83
31	1500	41.08	69.73	13.00
77	1302	48.86	95.55	5.22
81	1289	49.37	97.52	4.71
82	1169	54.08	117.79	0.00

Leña 2				
Días	Peso (g)	Contenido de humedad (%)		Diferencia (%)
		bh	bs	
0	2767	-	-	54.39
12	2084	24.68	32.77	29.71
31	1633	40.98	69.44	13.41
77	1410	49.04	96.24	5.35
81	1394	49.62	98.49	4.77
82	1262	54.39	119.26	0.00

*bh (Base húmeda) se refiere al resultado calculado en base a la masa total de la leña.

**bs. (Base seca) se refiere al resultado calculado en base a la masa seca de la leña

En donde el día 0 representa el día de corte y a los 82 días de haber sido cortados se introdujeron a un horno para ser secados completamente. Los % de humedad en base húmeda y en base seca representan el contenido de humedad que se iba registrando cada vez que se pesaban hasta el secado completo. La diferencia es la pérdida de peso (expresando la disminución del porcentaje de contenido de humedad bh que es agua evaporada) a medida que pasaban los días.

7.1.5. Análisis de contenido de humedad de la leña

Al momento de cargar cada contenedor se tomó una serie de muestras de la leña al azar, las cuales fueron guardadas para el análisis de humedad en el laboratorio del programa Biomasa en el RUPAP, los datos obtenidos se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Porcentaje de contenido de humedad de la leña.
(*Eucalyptus calmaldulensis*, Horno Contenedor, Febrero 2012, Posoltega, León)

	Contenido de humedad (%)	
	bh	bs
Ensayo 1	18.57	22.81
Ensayo 2	18.57	22.81
Ensayo 3	27.46	37.85
Ensayo 4	31.12	40.78
Ensayo 5	30.04	43.19
Ensayo 6	17.2	20.78
Ensayo 7	26.29	35.67
Ensayo 8	25.41	34.07
Ensayo 9	23.35	30.47
Ensayo 10	25.14	33.58
Ensayo 11	26.11	35.33
Ensayo 12	24.9	33.16
Ensayo 13	25.94	35.02
Media	24.62	32.73

7.1.6. Proceso de carbonización de la leña

La carbonización empezó el 06 de Febrero del 2012 y tuvo fin el 29 de Febrero del 2012, cada una de las sub-etapas del proceso de carbonización se describe a continuación, y se repitieron en cada uno de los 13 ensayos. En la operación normal de carbonización de la cooperativa no se toma en cuenta el pesaje de leña inicial, el pesaje del carbón producido y el pesaje de la leña sin carbonizar.

7.1.6.1. Carga y arranque

Se empieza ésta etapa del proceso productivo al cargar el contenedor, se tomó leña de diámetro menor a 7 cm para llenar los bordes y espacios vacíos, diámetros mayores a 10 cm para llenar el centro del contenedor con el objetivo de equilibrar la velocidad de carbonización en toda la sección transversal de la carga dentro del contenedor, porque en el centro de la sección transversal se encuentran temperaturas más altas y por tanto el frente de carbonización avanza más rápido y para igualar esa velocidad hay que disminuir el diámetro de la leña en los alrededores.



Fotografía 19. Carga de leña: 1er nivel a medio completar (Izq), 2do nivel completo (Der).

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

Nótese que la leña con menor diámetro está en el contorno y la más gruesa en el centro.

Una vez lleno, se coloca la tapa y se alza el contenedor mediante la grúa viajera y un teclé y es colocado sobre la base, previamente en esta se ha encendido leña que servirá para encender la carga del contenedor. Colocado el contenedor en la base se arranca el ventilador de succión y así inicia el proceso de carbonización (véase la fotografía 20.).



Fotografía 20. Contenedor con la tapa puesta (Izquierda), Contenedor alzado y siendo posicionado sobre la base (Derecha).

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

El arranque se hizo con la puerta de control totalmente abierta por unos 10 min, y luego se estranguló hasta unos 2 cm de apertura, el sello de tierra se colocó unos 15 min, después de puesto el contenedor en la base. Hecho esto mientras transcurre la carbonización se requiere poca supervisión. (Véase la figura 4, para una mejor comprensión)

7.1.6.2. Quemado de gases

El quemado de los gases de carbonización se logró pasadas entre unas 6 y 8 horas de avanzada la carbonización, porque antes de ese tiempo los gases de carbonización tienen una pobre composición y concentración en gases combustibles como para mantener la llama dentro del quemador por sí sola (véase la figura 7, para una mejor comprensión).



Fotografía 21. Izquierda: proceso de carbonización antes de encender el quemador de gases. Derecha: proceso de carbonización con el quemador de gases en funcionamiento.

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

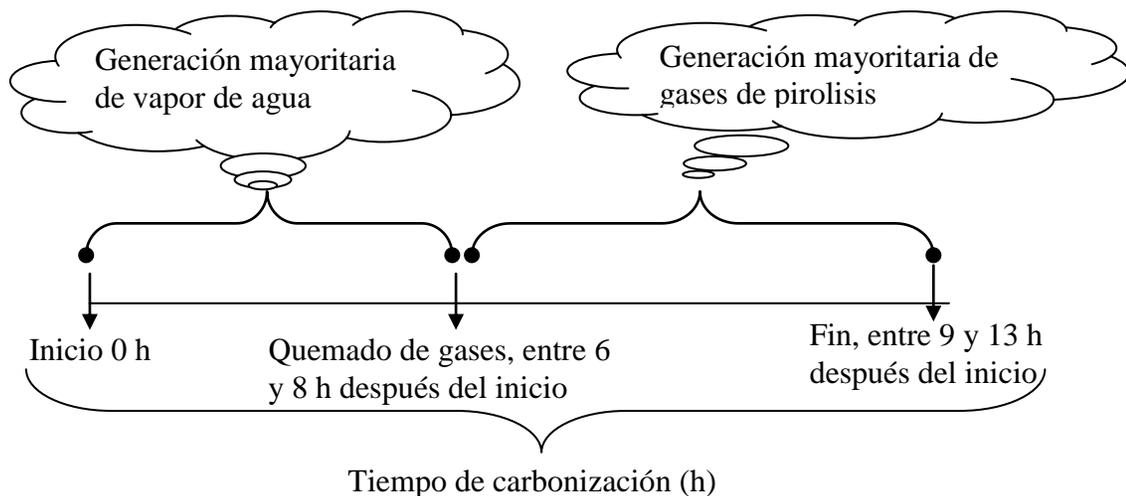


Figura 7. Momento del quemado de gases en la escala del tiempo de carbonización.

Fuente: Elaboración propia del autor, 2012.

7.1.6.3. Monitoreo de la temperatura de carbonización

El monitoreo de la temperatura de carbonización se hizo en cada ensayo al medir la temperatura de la parte superior del horno Contenedor con un termómetro láser, ésta zona del Contenedor no tiene aislante interno porque funciona como un área de intercambio de calor al momento del enfriamiento.

Para evitar pérdidas excesivas de calor durante la carbonización se colocan sobre ésta superficie, ladrillos de arcilla como aislantes, los cuales provocan un diferencial de temperatura entre el metal y la parte superior del ladrillo de entre 100 y 130 °C. Las temperaturas registradas fueron constantes en todos los ensayos: entre 250 y 310 °C estos registros de temperatura únicamente sirvieron como un indicativo del funcionamiento del horno Contenedor.



Fotografía 22. Registro de la temperatura de carbonización.

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

7.1.6.4. Fin de la carbonización y enfriado

La carbonización utilizando el horno contenedor tomó entre 9 y 13 horas, las cuales se decidieron según el peso de la carga de leña dentro del contenedor y la cantidad e intensidad del color de los gases de carbonización (de blanco a casi traslucido), al apagar el quemador de gases periódicamente entre las 9 y 13 horas de avanzada la carbonización.

Cuando se apreció que la cantidad y la intensidad del color del humo eran muy tenues, se tomó la decisión de finalizar la carbonización alzando el contenedor y moviéndolo a un extremo del área de trabajo, donde se bajó y se apagó con un sello de tierra, se dejó en enfriamiento por 36 horas.



Fotografía 23. Enfriado del Contenedor.

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

7.1.6.5. Descarga del carbón vegetal

Transcurridas las 36 horas de enfriamiento se procedió a volcar sobre su costado el contenedor y retirar la tapa inferior para extraer el carbón con el uso de una pala plana y con ella colocarlo en los sacos los cuales fueron almacenados en la sombra. Aquí concluye un ciclo completo de carbonización, el cual es realizado enteramente por 2 personas.

Durante la carga y descarga del contenedor se registraron el peso de la leña, el carbón obtenido y la leña no carbonizada. Se anotó la duración de la carbonización de cada ensayo. Los datos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 10. Datos registrados de cada ensayo de carbonización.
(*Eucalyptus calnaldulensis*, Horno Contenedor, Febrero 2012, Posoltega, León)

	Leña inicial	Carbón	Leña no carbonizada	Tiempo carbonización
Unidades	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(h)
Ensayo 1	706	140.4	123.9	10
Ensayo 2	704.2	161.6	64.3	10
Ensayo 3	819.7	138	47.2	12:30
Ensayo 4	821.5	155.5	13.2	12
Ensayo 5	765.8	146.3	18.6	11:15
Ensayo 6	701.2	174.2	9	09:30
Ensayo 7	714.4	168.1	6.4	12:00
Ensayo 8	772.6	179.7	5.3	12:20
Ensayo 9	758.9	173.9	12.5	10:40
Ensayo 10	742.4	211.4	2.2	11:20
Ensayo 11	773.5	201.8	0	12:30
Ensayo 12	735.6	199.8	15.9	10:20
Ensayo 13	907.1	211.7	9.9	13:10
Total	9922.9	2262.4	328.4	-
Media	763.3	174.0	25.3	11:24

El proceso de carga y descarga normal (sin pesar la leña que entra y el carbón que sale) dura aproximadamente 30 minutos cada operación. Mientras un contenedor estuvo en proceso de carbonización el siguiente fue cargado y posicionado para ser colocado al día siguiente según el siguiente plan de trabajo:

Tabla 11. Planificación de los ensayos de carbonización.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Lunes
Contenedor 1	carga/ quema	enfriado	descarga/ carga	quema	enfriado	descarga/ carga	-	quema
Contenedor 2	carga	quema	enfriado	descarga/ carga	quema	enfriado	-	descarga/ carga
			*			*		

* Día de mantenimiento



Fotografía 24. Descarga del carbón y empaçado, para lo cual se usa una pala plana.

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

7.2. Medición de la fracción comercial, fracción no comercial y la densidad a granel del carbón vegetal

La fracción comercial y no comercial fueron mediciones ejecutadas justo después del llenado de los sacos. Cada análisis se realizó a como se describió en el apartado 6.2.6, logrando en el momento la medición de la densidad a granel. Los datos obtenidos de ambas mediciones se presentan en la tabla siguiente; el peso total de la muestra se refiere al peso del carbón utilizado (que comprende ambas fracciones) de los 2 sacos escogidos al azar para realizar estos análisis.

Tabla 12. Datos de la fracción comercial, fracción no comercial y densidad a granel. (Carbón vegetal de *Eucalyptus calmdulensis*, Horno Contenedor, Febrero 2012, Posoltega, León).

Unidades	Peso total	Fracción comercial		Fracción no comercial		Densidad a granel
	de la muestra	(Kg)	(%)	(Kg)	(%)	(Kg/m ³)
Ensayo 1	49.8	46	92.4	3.8	7.6	213.1
Ensayo 2	45	42.7	94.9	2.3	5.1	197.8
Ensayo 3	49.4	45.8	92.7	3.6	7.3	212.0
Ensayo 4	46.4	43.5	93.7	2.9	6.3	201.2
Ensayo 5	41.2	39.1	94.9	2.1	5.1	180.9
Ensayo 6	42.9	41.1	95.8	1.8	4.2	190.5
Ensayo 7	42.1	39.7	94.3	2.4	5.7	183.7
Ensayo 8	43	41.6	96.7	1.4	3.3	192.7
Ensayo 9	42.4	40.4	95.3	2	4.7	187.1
Ensayo 10	46.2	44.6	96.6	1.6	3.4	206.3
Ensayo 11	45.3	43.6	96.2	1.7	3.8	201.8
Ensayo 12	44.1	42.2	95.7	1.9	4.3	195.6
Ensayo 13	46.6	44.3	95	2.3	5.0	205.2
Media	45.0	42.7	94.9	2.3	5.1	197.5

7.3. Análisis de contenido de humedad en el carbón vegetal

La determinación del contenido de humedad del carbón vegetal es el primer análisis que se realizó en el laboratorio. Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 13. Porcentaje de contenido de humedad del carbón vegetal. (Carbón vegetal de *Eucalyptus calmaldulensis*, Horno Contenedor, Febrero 2012, Posoltega, León)

	Contenido de humedad (%)	
	bh	bs
Ensayo 1	2.14	2.18
Ensayo 2	3.02	3.11
Ensayo 3	2.14	2.19
Ensayo 4	3.01	3.1
Ensayo 5	2.64	2.71
Ensayo 6	2.38	2.44
Ensayo 7	1.79	1.82
Ensayo 8	2.38	2.43
Ensayo 9	2.32	2.37
Ensayo 10	1.69	1.71
Ensayo 11	1.11	1.12
Ensayo 12	1.95	1.98
Ensayo 13	1.25	1.27
Media	2.14	2.19

7.4. Análisis químicos del carbón vegetal

Los análisis acerca del contenido de materia volátil se realizaron con muestras de carbón vegetal que se colocaron en un horno secador por 2 horas para asegurarse que estuvieran secas, luego se introdujeron en un horno para calentar la muestra previamente pesada y luego pesándola para averiguar el peso perdido debido al calentamiento, dicha diferencia de peso representa el contenido de materia volátil. De este análisis se realizó la muestra y 2 réplicas para cada muestra de cada ensayo.

El análisis de contenido de ceniza se hace en secuencia con el de materia volátil, al quemar repetidamente las muestras de cada ensayo hasta obtener una pérdida de peso en el residuo menor a 0.0005 g o dicho de otra forma hasta obtener un peso constante en éste. El análisis se realizó 2 veces para cada muestra de cada ensayo (una réplica).

El contenido de carbono fijo es un porcentaje que se obtiene de manera indirecta a partir de los datos obtenidos de los dos análisis anteriores según la ecuación A.5 (Apartado A.3.- Contenido de carbono fijo). El poder calorífico es el último análisis que se realizó para determinar la calidad del carbón vegetal, el valor obtenido corresponde al PCS (véase lista de abreviaciones) y se realizó mediante un calorímetro. Los datos se presentan en la

siguiente tabla junto con los valores de la desviación estándar y los valores obtenidos de carbono fijo y poder calorífico.

Tabla 14. Resultado de los análisis químicos del carbón vegetal.
(Carbón vegetal de *Eucalyptus calmdulensis*, Horno Contenedor, Febrero 2012, Posoltega, León)

Unidades	Materia Volátil		Ceniza		Carbono Fijo	PCS
	(%)	σ	(%)	σ	(%)	(Kcal/Kg)
Ensayo 1	33.55	0.47	2.12	0.11	64.33	7254.4
Ensayo 2	26.69	0.45	2.32	0.04	70.99	7467.22
Ensayo 3	31.83	1.43	2.03	0.02	66.14	7246.14
Ensayo 4	17.5	0.33	2.08	0.05	80.42	7772.22
Ensayo 5	23.52	0.48	2.12	0.06	74.36	7540.12
Ensayo 6	19.27	0.79	2.57	0.01	78.17	7820.45
Ensayo 7	20.52	0.26	2.6	0.01	76.88	7670.68
Ensayo 8	25.75	1.35	2.35	0.09	71.90	7561.88
Ensayo 9	18.88	0.35	2.27	0.06	78.85	7843.74
Ensayo 10	21.94	0.28	2.19	0.05	75.87	7724.74
Ensayo 11	19.31	0.77	2.57	0.03	78.12	7843.26
Ensayo 12	21.31	0.44	2.52	0.08	76.17	7749.48
Ensayo 13	21.42	0.86	2.19	0.04	76.40	7650.38
Media	23.19	-	2.3	-	74.51	7626.52

7.5. Criterios de calidad del carbón vegetal

El país carece de una ley que regule la calidad del carbón vegetal que se comercializa, por tanto se indagó acerca de las normas para regular la calidad del carbón vegetal a nivel internacional y se logró determinar cuáles son las regulaciones de calidad establecidas mediante ley por otros países para el uso, exportación e importación del carbón vegetal.

Son estos valores y los presentados por FAO, (1983) en la tabla 5, los que se usarán más adelante, para definir una propuesta de criterios de calidad del carbón vegetal de comercialización a nivel nacional, y además establecer la calidad del carbón obtenido en éste estudio.

Tabla 15. Normas de calidad para la exportación-importación de carbón vegetal para Uso doméstico en algunos países de Europa.

Norma		Bélgica NBN M11-001		Francia NF N°846e		Alemania DIN 51749
		Categoría		Categoría		
Pureza química	Unidades	A	B	A	B	
Carbono fijo	% min del peso	82	75	82	75	78(1)
Materias volátiles	% máx. del peso	12	-	-	-	16(1)
Contenido de cenizas	% máx. del peso	-	-	-	-	6(1)
Humedad	% máx. del peso	7	7	7	7	8
Propiedades físicas						
Pedazos	% min. del peso					
	> 20mm	75	75	85	85	90 min
	> 10mm < 20mm	19	19	-	-	-
	<10mm	6	-	-	-	-
Procedimiento						
T° de carbonización	°C min.	-	-	-	-	380(2)

(1) Sobre el peso seco

(2) No puede alcanzarse un contenido de carbono fijo de un 78% del peso seco con una temperatura de carbonización de 380 °C con un proceso económico normal

Fuente: http://users.skynet.be/mariela.tadla/carbonizacion/es/topFrame_2_es.html

7.6. Costos unitarios de proceso productivo del carbón vegetal

Los costos unitarios del proceso de producción de carbón vegetal en COPAPO para los 13 ensayos se dividen en dos partes: la primera, es la adquisición, corte y transporte de la leña y la segunda, es el proceso de carbonización. Los gastos para cada etapa se presentan detalladamente en las siguientes tablas.

Tabla 16. Costos estimados de la primera etapa del proceso productivo de carbón vegetal de COPAPO.

(Horno Contenedor, Febrero 2012, Posoltega, León)

Ítem	Costo (C\$)	Cantidad	(C\$)
Adquisición, Corte y transporte de la leña			
Compra del lote de madera (2 lotes)	4000	28 metros Cúb.	4000
Tractorista motosierrista	100	1 persona/7día	700
Ayudante motosierrista	80	1 persona/7día	560
Cargadores	60	2 personas/7día	840
Diesel tractor	300	3 galones	300
Aceite tractor	75	1/4 galón	75
Gasolina motosierra	180	2 galones	180
Aceite mezcla	75	1/4 galón	75
Aceite cadena	40	1/4 galón	40
Gasto total en materia prima y transporte			6770

Fuente: elaboración propia del autor

Tabla 17. Costos estimados de la segunda etapa del proceso productivo de carbón vegetal de COPAPO

(Horno Contenedor, Febrero 2012, Posoltega, León)

Ítem	Costo (C\$)	Cantidad	(C\$)
Proceso de carbonización			
Quemador	100	1 persona/día/24días	2400
Ayudante quemador	80	1 persona/día/24días	1920
Diesel encendido	90	1 galón/13quema	90
Energía eléctrica	20	1 día/13días	260
Sacos	12	9 en una quema	1404
Mecate	50	1 rollo	50
Fósforos	6	3 cajas	6
Gasto total en carbonización y empaque			6130

Fuente: elaboración propia del autor

VIII. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

8.1. Problemas del proceso productivo de carbón vegetal en COPAPO

En el proceso productivo de carbón vegetal de COPAPO se detectó una serie de problemas que van desde el inicio de toda la operación productiva hasta su fin, la mayoría son causados por la inexperiencia de los operadores que desconocen cómo hacer las operaciones correctamente (según está escrito en el manual de operación del equipo), a continuación se presentan estos problemas:

- Mal markeado (apilado) de la leña:

Lo que ocurrió al markear la leña es que dejaron las filas juntas y no se dejó un espacio entre ellas para permitir que circulara el aire y con ello lograr un mejor secado de la madera, los ensayos N° 4 y N° 5 fueron hechos con leña del centro de estas filas y es por esto que tienen un elevado contenido de humedad, ya que no estuvieron en contacto con aire que lo secase.

- Uso de árboles jóvenes de entre 1 y 3 años de edad:

El uso de madera joven no es propicio para un buen carbón porque las cualidades de la madera no son óptimas para favorecer la calidad del carbón como se puede apreciar en la fotografía 25, los árboles utilizados en los primeros ensayos no tenían prácticamente nada de corazón lo cual indica que eran muy jóvenes y por ende no tenían un buen contenido de lignina. Se requiere un árbol de 4 años como mínimo, porque este ya ha desarrollado un buen contenido de lignina y es éste compuesto el que tiene mayor aporte al carbono fijo que compone mayoritariamente al carbón vegetal.

- Poco uso de leña en el arranque:

En los primeros ensayos se dio el problema de un arranque desigual, esto se nota en la fotografía 26, en el ensayo N° 1 la carbonización ocurrió en un extremo del contenedor y el resto quedó sin carbonizar lo cual indica que la cantidad de leña en el arranque fue insuficiente para lograr la ignición de toda la carga y probablemente el calor no se distribuyó de forma adecuada lo cual provocó un frente de carbonización no homogéneo. Esto se corrigió a partir del ensayo N° 5 en el cual se decidió aumentar la cantidad de la leña usada en el arranque y se ve reflejado en el aumento de la producción de carbón en el gráfico 5, a raíz de este cambio.

- Desuso del quemador de gases:

Al realizar el primer ensayo se encontró una cama de alquitrán de unos 5 cm de espesor dentro del quemador de gases lo cual indica que éste no estuvo operando, esto es una clara falta de mantenimiento y buena operación. Al encender el quemador de gases en el primer ensayo se incendió todo el alquitrán y con ello se limpió toda la tubería del sistema. También se notó una costumbre de ir a lo seguro al momento de intentar encender el quemador de gases se prefiere hacerlo a las 8 ó 9 horas después de haber iniciado la carbonización en vez de ir intentando desde las 6 ó 7 horas, tiempo en el cual es posible que la composición y concentración de los gases de carbonización sea adecuado para

encenderse con lo que se evitaría la liberación de polución durante un mayor tiempo mientras dura la carbonización.

- Falta de costumbre de vigilar el proceso:

Los operarios del horno Contenedor se han acostumbrado a la idea de conectar-olvidar-desconectar. Es decir se han acostumbrado a que una vez encendido el horno no es necesario volver prestarle atención hasta la hora de apagarlo que junto con lo descrito en el párrafo anterior provoca que los Contenedores pasen tiempo de más en la carbonización, esto provoca que se dañe la pared interna de los mismo. Así mismo el ajustar la puerta de control de aire durante el proceso de carbonización según lo que vaya ocurriendo, se ve afectado por la desatención ya que hay un momento en que se da un retorno de gases de pirólisis hacia la entrada de aire y esto se debe a una excesiva producción de gases porque hay mucho aire en el proceso; se minimiza si la entrada de aire se cierra un poco más.

- Excesiva confianza en el tecele:

Los operarios tienen mucha confianza en el tecele, al levantar y bajar la carga fuera de la línea central de la viga, esta práctica tiene el potencial de causar un accidente ya que si el tecele fallará debido al desgaste de la cuña que sirve de traba y si no se está sosteniendo la cadena de manejo del tecele a como se hizo en la realización de los ensayos la carga que el tecele sostiene se vendría abajo. El hecho de levantar carga fuera de la línea central de la viga puede provocar que la viga se deforme si la carga resulta ser excesiva, dejando la viga inútil.

- Falta de un trinchante para extraer el carbón:

Existe el problema de que cuando se extrae el carbón se hace con una pala plana (véase la fotografía 24.) práctica que quiebra el carbón, se debería de utilizar un trinchante (algo así como un tenedor grande) con el que se extraería el carbón sin quebrarlo tanto, esto mantendría la calidad del producto.

- Poco control de lo que se produce:

Al llenar los sacos de carbón se tenía un peso aproximado de 18 Kg llenando así entre 8 y 9 sacos pero flojos (sin ocupar cada espacio dentro del saco con carbón), esta práctica generó un disgusto debido, a que al llevar los sacos a un peso de aproximado de 30 Kg al realizar los ensayos cada contenedor logró producir 5 ó 7 sacos lo que para ellos representa una menor producción, pero en realidad es falta de control en el producto que se comercializaba, porque el saco de 18 Kg se ofertaba al mismo precio que el saco de 30 Kg haciendo que el cliente declinara en la compra.

- Preferencia de leña fina para la carga:

Se tiene la idea de que el uso de leña de poco diámetro menor a 10 cm, genera más carbón que usando diámetros mayores, en realidad lo que genera esta práctica es mayor tiempo de acomodo en la carga, aunque tiene lógica pensar que entre más pequeño el diámetro mejor es el acomodo porque se minimizan los espacios vacíos lo que mejora la densidad dentro del contenedor por tanto alcanza mayor material en el mismo volumen. Pero ese material, no tiene la calidad para producir mayor cantidad de carbón vegetal ya que lo que se carga

es siempre madera joven que es la que tiene esos diámetros y no tiene buen contenido de lignina.

- Empleo de un operador:

El empleo de un operador, se practica con el objetivo de disminuir costos, pero teniendo en cuenta que se trabaja con contenedores elevados que pesan 0.9 toneladas, con fuego y combustible, una persona corre el riesgo de sufrir un accidente y no tendrá a quien pedir ayuda.

- Falta de costumbre de quitar los ladrillos aislantes:

no remover los ladrillos de arcilla que funcionan como aislante de la parte superior del contenedor provoca que el tiempo de enfriamiento se alargue, pero no se le da ese tiempo extra y al abrir el contenedor y exponer el carbón al aire se enciende, esto fue comprobado en uno de los ensayos.



Fotografía 25. Carga del ensayo 3 (Izq), Carga del ensayo 11 (Der).

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

Izquierda: nótese que la leña no tiene corazón. Derecha: nótese que la leña tiene un poco más de corazón lo que indica que tenía mayor edad.



Fotografía 26. Carbonización dispareja en el ensayo 1 (Izq), Ensayo 11 (Der).

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

Izquierda: todo lo que se ve entero no se carbonizó, Derecha: toda la carga está carbonizada.

8.2. Factores determinantes de la calidad según el proceso productivo actual

El principal factor es el uso de madera joven, el segundo la falta de un secado adecuado de la materia prima y el tercero la poca experiencia de los operadores del horno contenedor. Cada uno de estos factores tiene una consecuencia determinante en el producto final.

Usar madera joven como ya se ha explicado produce un bajo contenido de carbono fijo como puede apreciarse en la tabla 15, esto puede solventarse aumentando el tiempo de carbonización pero a consecuencia de disminuir la eficiencia del proceso y por ende la cantidad de producto final, también influye en la densidad a granel del producto debido a la disminución de su peso por el bajo porcentaje de lignina en la materia prima.

El contenido de humedad en la leña tiene un efecto complejo en el producto final, por una parte afecta directamente la eficiencia al quemar más leña para sacar el agua del proceso dejando menos materia prima para convertir en carbón, por otro lado altos contenidos de humedad, combinado con un diámetro grande de la leña, aumenta la friabilidad³ del carbón.

La poca experiencia en el uso del horno Contenedor es determinante porque el operario debe discernir cuando es el momento de terminar el proceso de carbonización, decisión que se toma al prestarle atención a los detalles del color de los gases, la cantidad de gases y el tiempo que ha consumido el proceso de carbonización.

Aprender a manejar estas variables y conjugarlas con las anteriores debe dar como resultado la optimización de la operación de carbonización y como consecuencia una mejor calidad y cantidad del carbón vegetal.

8.3. Balance de materia del proceso productivo

Como ya se ha descrito anteriormente el proceso productivo de COPAPO utilizando el horno contenedor empieza con la compra del lote y es seguido por la tala. En total se cortaron aproximadamente 16.4 toneladas de madera en pie que tenían un 54.12% de humedad bh (118% bs), de ésta se troceó a un tamaño de $L = 0.85 \text{ m}$ y $0.07 \text{ m} < D < 0.15 \text{ m}$, se picaron unos 96.9 Kg en ramas que luego se usaron para la ignición del contenedor.

Una vez transportada y apilada la leña para ser secada por 1 mes, disminuyó la humedad hasta un 24.62% bh lo que significa que se perdieron 6380.2 Kg en agua quedando 9922.9 Kg de madera con el contenido de humedad antes señalado. La carbonización inicia desde la parte superior del horno porque ahí se concentran los gases calientes que generan el frente de carbonización que va avanzando a medida que la madera se va secando. El gas de la carbonización es producto de la pirolisis que ocurre al calentar la madera sobre los 280 °C antes de eso mayoritariamente se obtiene vapor de agua el cual es equivalente a la cantidad de agua contenida en leña (véase la figura 1.).

Los 13 ensayos en total produjeron 2262.0 Kg de carbón equivalente a 91 sacos comerciables. Como subproducto reutilizable dejó 328.4 Kg de leña sin carbonizar, por lo

³ Propiedad que poseen algunas estructuras que las hace muy fácilmente rompibles o desmenuzables.

que se concluye que se utilizaron 7479.9 Kg de leña (peso seco) en total para producir las 2.2 toneladas de carbón.

Para lograr cuantificar los gases producidos en la pirolisis y conocer su composición y concentración se requiere de equipos a los cuales no se tuvo acceso por tanto ésta parte del balance no se realizó. Así que solo se presentará la cantidad de masa que se destina o mejor dicho se convierte en gas.

Del balance global de la operación se obtuvo una eficiencia global del proceso de 31.70% lo que demuestra la eficiencia del horno Contenedor a pesar de usar materia prima de pobre calidad y operadores con poca experiencia. En las figuras 8 y 9 se muestra el proceso productivo de COPAPO dividido en dos etapas: la primera es la operación de adquisición, acondicionamiento y transporte de la leña y la segunda es la operación de carbonización.

En el primer flujograma (figura 8.) se presentan los valores del balance total y al llegar a la operación de carbonización se cambia a un balance con los valores promedio de la tabla 10, se expresa lo que ocurre en un ensayo en vez del total de toda la operación global, si se desean estos datos se deben multiplicar por 13 los datos presentados en la operación de carbonización.

El color verde corresponde a la etapa de corte y transporte de la leña, el naranja al secado, el celeste al agua eliminada en el proceso productivo, el rojo a la etapa de carbonización, el gris a sus subproductos, el negro al producto primario y el derivado útil no carbonizado y el café a los insumos de operación.

- Cálculo de la masa de madera extraída de los lotes:

En base a los 9922.90 Kg de madera a la par del horno con 24.62% h bh. Se calcula la masa seca de madera:

$$9922.90 \text{ Kg} * (24.62\% \text{ h bh} / 100\%) = 2443.0 \text{ Kg de agua en la madera a la par del horno.}$$
$$9922.90 \text{ Kg} - 2443.0 \text{ Kg} = 7479.9 \text{ Kg de madera seca a la par del horno.}$$

En base a la masa de madera seca 7479.9 Kg y al % de contenido de humedad bh, al momento del corte (véase la tabla 8) 54.12% en promedio, se calcula la masa de madera húmeda total al momento de corte; es decir los Kg de madera en pie que fue cortada:

$$\% \text{ h bh} = ((mh - ms) / mh) * 100\% \quad (8.1)$$

En donde: *mh*: es la masa de madera húmeda (masa inicial)

ms: es la masa de madera seca (después del secado total)

$$54.12\% \text{ h bh} = \left(\frac{mh - 7479.9 \text{ Kg}}{mh} \right) * 100\%$$

Despejando *mh* se obtiene:

$mh = 16303.1 \text{ Kg}$ de madera húmeda al momento del corte sin incluir las ramas.

La cantidad de ramas no fue contabilizada, así que se suponen 96.9 Kg de ramas que fueron removidas de los árboles y transportadas hasta la par del horno.

- Cálculo de la masa de agua evaporada en la etapa de secado:

La masa de leña húmeda que entra a la etapa de secado es: 16303.1 Kg y la masa de leña que sale de la etapa de secado fue: 9922.90 Kg de la cual 7479.9 Kg son leña seca. Así que:

$$16303.1 \text{ Kg} - 7479.9 \text{ Kg} = 8823.3 \text{ Kg de agua que contenía la leña al momento del corte}$$

De esta misma manera, si se resta la masa de agua con que sale la leña de la etapa de secado, a la masa de agua inicial de la leña se obtiene:

$$8823.3 \text{ Kg} - 2443.0 \text{ Kg} = 6380.2 \text{ Kg de agua evaporada durante la etapa de secado}$$

- Cálculo del balance en la etapa de carbonización:

En promedio se cargaron 763.3 Kg de leña en un contenedor (véase la tabla 10.), con un contenido de humedad del 24.62% bh; entonces la masa de leña seca dentro del contenedor era:

$$763.3 \text{ Kg} * (24.62\% \text{ h bh} / 100\%) = 187.9 \text{ Kg de agua en la leña cargada.}$$

$$763.3 \text{ Kg} - 187.9 \text{ Kg} = 575.1 \text{ Kg de leña seca cargada.}$$

Se obtuvo en promedio 174.0 Kg de carbón y 25.3 Kg de leña sin carbonizar por lo tanto:

$$(575.1 - 174.0 - 25.3) \text{ Kg} = 375.9 \text{ Kg de la leña cargada se convirtieron en gases de carbonización.}$$

Como ya se mencionó anteriormente los gases de carbonización no fueron cuantificados ni cualificados.

- Cálculo del agua evaporada en la carbonización:

En el carbón vegetal obtenido se determinó un contenido de humedad bh del 2.14% (véase la tabla 14.) entonces la cantidad de agua que contenía es:

$$174.0 \text{ Kg} * (2.14\% \text{ h bh} / 100\%) = 3.72 \text{ Kg de agua remanente de la leña cargada}$$

Entonces restando el agua que contenía el carbón producido del agua que contenía inicialmente la leña cargada se obtiene:

$$(187.9 - 3.72) \text{ Kg} = 184.12 \text{ Kg de agua evaporada en la etapa de carbonización.}$$

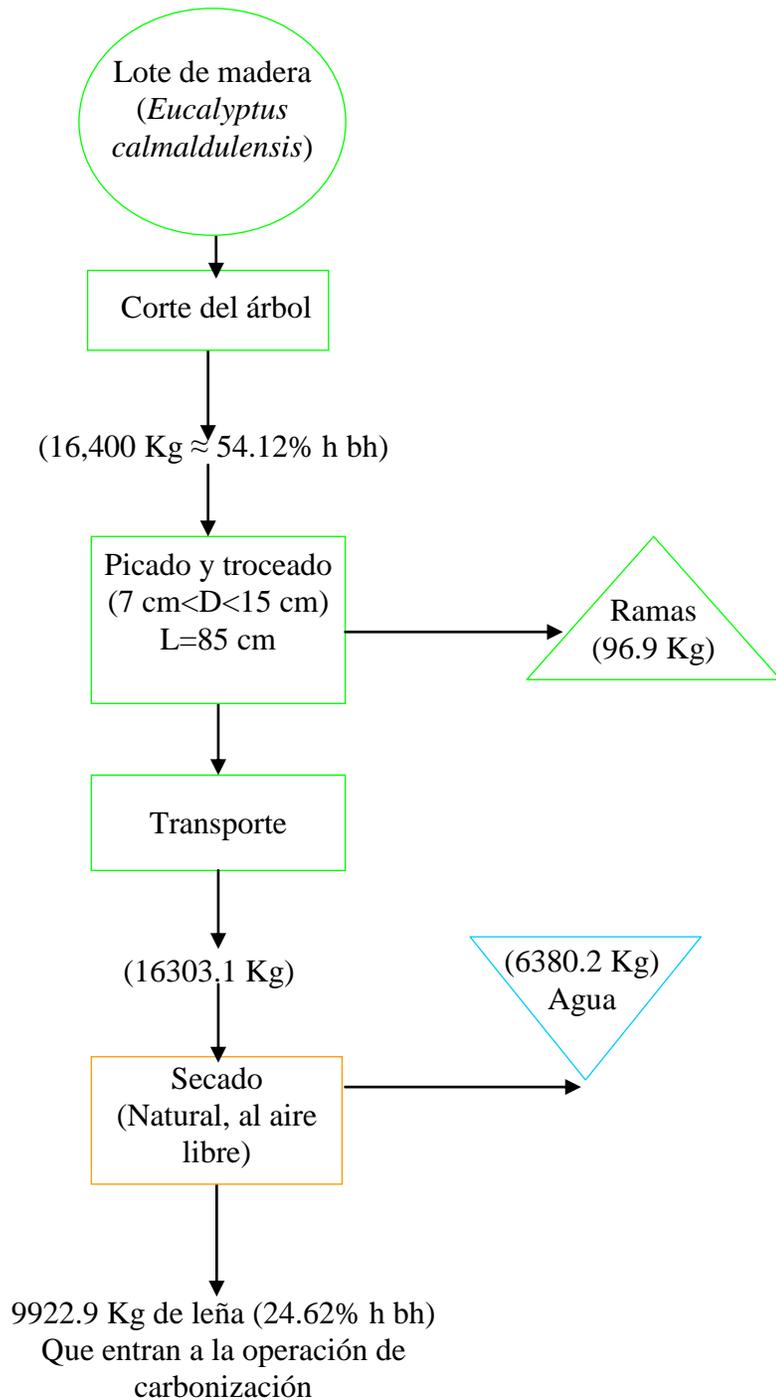


Figura 8. Flujograma de la operación de adquisición, acondicionamiento y transporte de la leña del proceso productivo de carbón vegetal de COPAPO.

Fuente: Propia del autor, 2012.

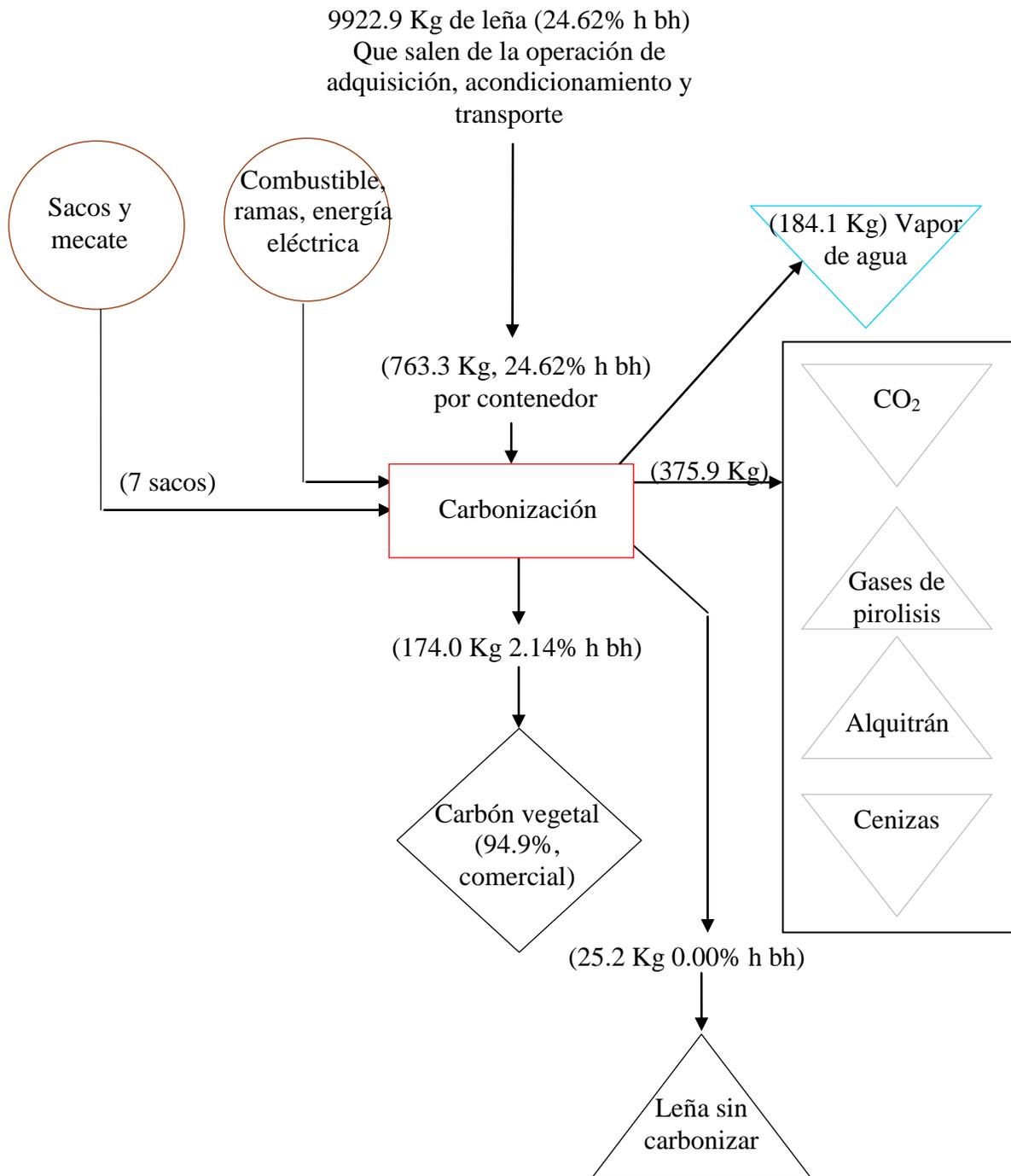


Figura 9. Flujograma de la operación de carbonización del proceso productivo de carbón vegetal de COPAPO.

Fuente: Propia del autor, 2012.

8.4. Acerca de la eficiencia de conversión leña-carbón

La eficiencia obtenida en los ensayos realizados en COPAPO está en promedio cerca del criterio de funcionamiento óptimo del horno contenedor que es de un 38% (Santos et al., 2001), esto es la suma de los factores de humedad y tiempo de carbonización que son muy influyentes en la eficiencia (véase gráfico 1). Los valores que se presentan en la tabla 18, se calcularon según la fórmula 5.2 del apartado 5.6.

La influencia del diámetro de la leña se aprecia, pero en menor medida que el contenido de humedad en la leña y la experiencia; el ejemplo se tiene en el ensayo N° 13 en éste se cargó con leña de diámetro mayor a 10 cm (véase la fotografía 27.) por lo cual se tenía mayor peso en el mismo volumen con un contenido de humedad semejante al ensayo N° 11 (26%) y a pesar de que se le dio mayor tiempo de carbonización no se logró que la eficiencia fuera mayor o igual que en el ensayo N° 11.

Esto fue porque un diámetro grande de la leña provoca que al frente de carbonización le tome más tiempo avanzar porque tiene que enfrentar más área y esto lo hace más lento; entonces al ensayo N° 13 le hubiera tomado mayor tiempo carbonizar toda su carga pero su eficiencia no hubiera aumentado mucho.

Tabla 18. Eficiencia de conversión leña-carbón obtenida para cada ensayo.
(Carbón vegetal de *Eucalyptus calmaldulensis*, Horno Contenedor, Febrero 2012, Posoltega, León)

	Leña inicial	Contenido de humedad	Carbón	Leña no carbonizada	Eficiencia conversión leña-carbón	Tiempo de carbonización
Unidades	(Kg)	(% bh)	(Kg)	(Kg)	(%)	(h)
Ensayo 1	706	18.57	140.4	123.9	31.13	10
Ensayo 2	704.2	18.57	161.6	64.3	31.74	10
Ensayo 3	819.7	27.46	138	47.2	25.21	12:30
Ensayo 4	821.5	31.12	155.5	13.2	28.14	12
Ensayo 5	765.8	30.04	146.3	18.6	28.29	11:15
Ensayo 6	701.2	17.2	174.2	9	30.48	09:30
Ensayo 7	714.4	26.29	168.1	6.4	32.32	12:00
Ensayo 8	772.6	25.41	179.7	5.3	31.47	12:20
Ensayo 9	758.9	23.35	173.9	12.5	30.55	10:40
Ensayo 10	742.4	25.14	211.4	2.2	38.19	11:20
Ensayo 11	773.5	26.11	201.8	0	35.31	12:30
Ensayo 12	735.6	24.9	199.8	15.9	37.24	10:20
Ensayo 13	907.1	25.94	211.7	9.9	31.98	13:10
Media	763.3	24.62	174.0	25.3	31.70	11:24



Fotografía 27. Carga del ensayo 2 (Izq), ensayo 13 (Der).

Fuente: Propia del autor, Febrero, 2012.

Apréciase el grueso de leña usada en el ensayo 13 comparado con la del ensayo 2

Los datos de la tabla 18, reflejan, ante todo que al ganar experiencia en la operación de horno Contenedor se logran mejores resultados a pesar de poseer leña de baja calidad. Entonces se puede concluir que tener un contenido de humedad bajo en la leña, un tiempo conveniente de carbonización, un diámetro de leña adecuado y leña proveniente de árboles de mayor edad, darían como resultado una eficiencia de conversión óptima.

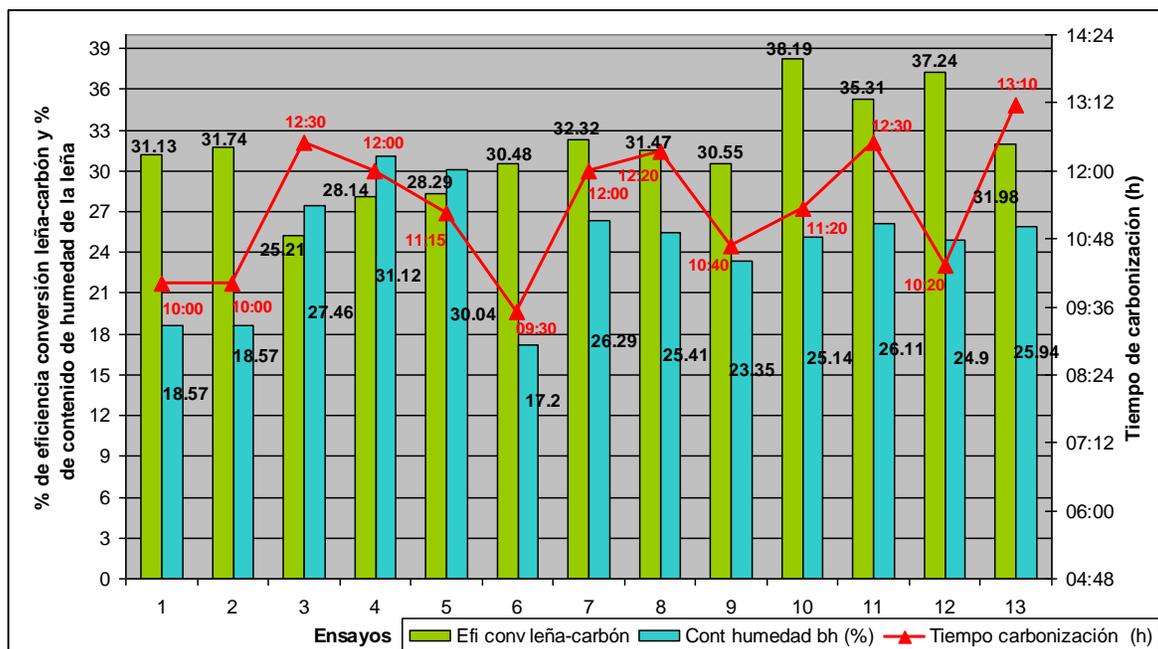


Gráfico 1. Relación entre la eficiencia de conversión leña-carbón, el contenido de humedad y el tiempo de carbonización.

(Carbón vegetal de *Eucalyptus calmaldulensis*, Horno Contenedor, Febrero 2011, Posoltega, León)

Fuente: Propia del autor, 2012.

Nótese el comportamiento inversamente proporcional que existe entre la eficiencia y el contenido de humedad en la leña cargada

El gráfico 1, muestra que el contenido de humedad y el tiempo de carbonización tienen intrínseca relación. Por ejemplo: a partir del ensayo N° 6 se aprecia que a un alto contenido de humedad en la leña, así mismo se debió aumentar el tiempo de carbonización, y como el contenido de humedad era desconocido al momento de realizar los ensayos, se implementó la estrategia de suponer que un mayor peso de la carga de leña inicial, significaba un mayor contenido de humedad; lógica que no siempre se cumple, pero sirvió para estimar el tiempo adecuado de carbonización.

En los ensayos N° 4 y 5 se les dio un tiempo de carbonización muy bajo para corresponder con el contenido de humedad alto que tenía esta leña y esto explica porque en el gráfico no corresponde el comportamiento del tiempo con el contenido de humedad, lo mismo se aprecia para el ensayo N° 8 pero en menor medida.

8.5. Definición de criterios y establecimiento de la calidad del carbón vegetal

Basándose en la tabla 15 y en la tabla 5, se proponen como valores normativos de la calidad del carbón vegetal que se produce a nivel nacional, los criterios y valores presentados en la tabla 19, la temperatura de carbonización no se incluye en la norma propuesta porque es un factor que no se controla en las carboneras a nivel nacional debido a que los equipos capaces de medir los rangos de temperatura que genera la carbonización son costosos.

Se propone colocar un mínimo de calidad debajo de las normas Europeas llamada calidad "C" (debido a lo exigente que son dichas normas en esos países) para la comercialización del carbón vegetal a nivel nacional.

Usando el valor promedio obtenido de los ensayos no se puede ubicar al carbón vegetal producido con el horno contenedor en COPAPO en ninguna de las normas Europeas vigentes presentadas en la tabla 15, ya sea porque los valores están por debajo del mínimo o por encima del máximo que estas permiten.

Sin embargo si se toma en cuenta que el carbón obtenido fue producido con leña muy joven se obtuvieron resultados aceptables porque en promedio no se alejan mucho de los valores requeridos en estas normas y es seguro que con leña de unos 4 a 6 años y personal con experiencia se logrará alcanzar la calidad que exigen estas normas. Pero el carbón producido en los ensayos se coloca en la categoría de calidad "C".

En la tabla 5, no se encuentra un valor normativo para las fracciones comercial y no comercial, mientras que en la tabla 15, se tienen 3 distinciones de tamaño y sus fracciones correspondientes; así que, teniendo en cuenta que la fracción comercial debe ser la mayor posible, se propone usar 2 clases de tamaño (menor a 12.5 mm y mayor a 12.5 mm) y sus fracciones correspondientes.

Tabla 19. Propuesta de valores normativos de la calidad del carbón vegetal producido a nivel nacional

Pureza química	Unidades	A	B	C
Carbono fijo	% min del peso	82	75	73
Materias volátiles	% máx. del peso	12	23	24
Contenido de				
Cenizas	% máx. del peso	2	2	3
Humedad	% máx. del peso	7	7	7
Propiedades físicas				
Pedazos	% min del peso			
	> 12.5mm	98	95	93
	< 12.5mm	2	5	7
Densidad a granel	Kg/m ³ -min.	300	250	200

A excelente, B bueno, C baja

Para el contenido teórico de la norma se recomienda usar las definiciones de la densidad a granel, contenido de carbono fijo, contenido de materia volátil, contenido de ceniza y poder calorífico que aparecen a partir del apartado 5.4.

El contenido de carbono fijo y materias volátiles obtenido al producir carbón con el horno Contenedor no fue tan pobre casi alcanza la categoría de las normas europeas, como ya se ha explicado, se debió al uso de madera joven, si se analiza de manera individual el resultado obtenido de cada ensayo el 50% de los ensayos lograron alcanza la categoría B de la normas Europeas y los valores mínimos de la tabla 5.

En el contenido de ceniza se alcanzó en promedio 2.3% lo que es mejor que el 3% que presenta la tabla 5, en la densidad a granel no se obtuvo en promedio un valor que esté entre 250 y 300 Kg/m³. A pesar de todo, el horno demostró tener una consistencia en la calidad a como se ve en el gráfico 3.

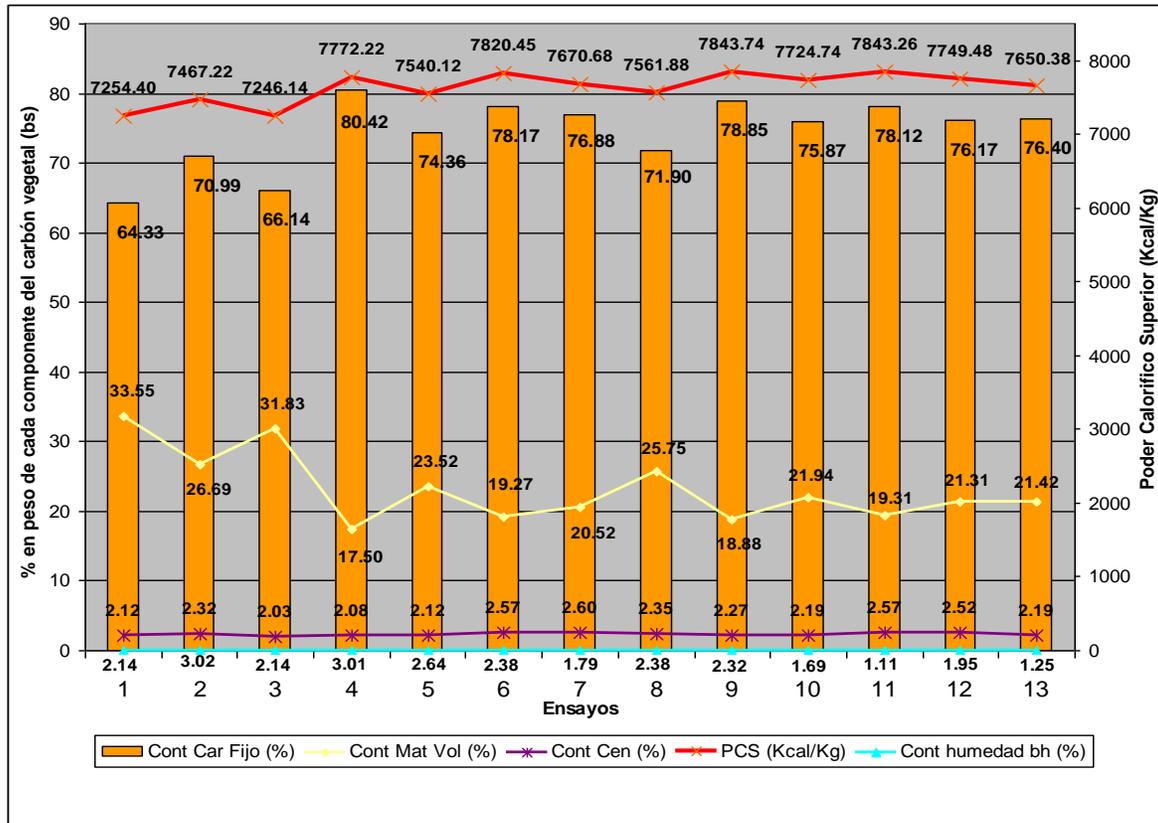


Gráfico 2. Consistencia de los análisis químicos obtenidos de cada ensayo.
(Carbón vegetal de *Eucalyptus calmaldulensis*, Horno Contenedor, Febrero 2011, Posoltega, León)
Fuente: Propia del autor, 2012.

La humedad con la que sale el carbón del contenedor es baja y puede ser peligrosa ya que es apenas de un 2.14% bh, en promedio, y se corre el riesgo de ignición por la simple acción de la radiación solar o el método de almacenaje (por ejemplo: lugares calurosos y sin ventilación). Así que el carbón producido debe estar bajo techo y con una fuente abundante de agua cerca; para cumplir con la norma propuesta en cuanto al contenido de humedad se debe agregar agua o dejarlo tiempo suficiente almacenado para que absorba humedad del ambiente y se alcance un equilibrio.

En el gráfico anterior se aprecia que el poder calorífico tiene tendencia ascendente y positiva similar a la del carbono fijo lo que corrobora que los valores obtenidos son correctos, debido a esta intrínseca relación entre ambos el poder calorífico se ve afectado por lo mismo que afectó al carbono fijo. A partir del ensayo N° 9, en el cual se comenzó a utilizar la leña del segundo lote, que tenía un corazón más grande (lo que significa que tenía mayor edad, véase la fotografía 25) y a tener mayor experiencia en la operación, se logró tener resultados más estables en ambas propiedades del carbón vegetal producido.

8.6. Acerca de la densidad aparente y la fracción comercial y no comercial

La densidad de la madera influye directamente en la densidad del carbón si la densidad de la leña es baja, la del carbón lo será; la densidad baja de la madera en una especie de buena densidad es debido a que el árbol es muy joven y aún no tiene corazón o tiene muy poco. Éste es el caso de la materia prima que se usó en los ensayos: madera joven de entre 1 y 3 años que produjo un carbón poco denso por debajo de lo normal a como se aprecia en la tabla 12.

Este resultado afecta la operación productiva de COPAPO si quiere comercializar su carbón en peso. Le conviene más hacerlo en volumen ya que su carbón es muy ligero pero ocupa el mismo volumen que un carbón pesado; entonces le conviene más comercializarlo en el mercado local que trabaja en base al volumen (sacos de aproximadamente 110 litros).

Sin embargo este defecto de producción puede ser corregido con el uso de árboles de mayor edad y por ende de mayor densidad, lo que además de otorgar una mejor densidad también mejorará la calidad física y química del producto.

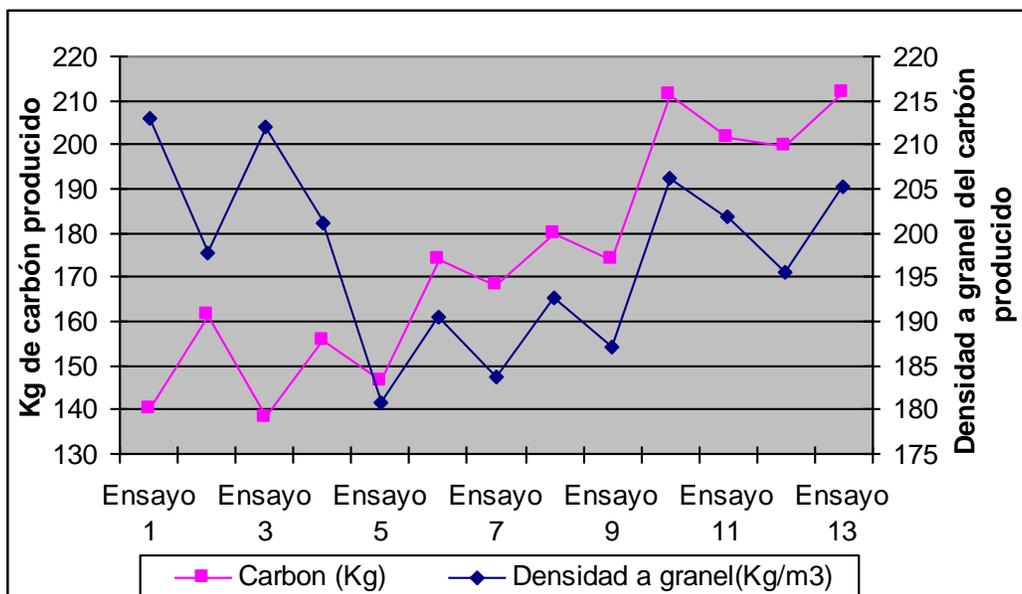


Gráfico 3. Tendencia del carbón producido y su densidad a granel.

(Carbón vegetal de *Eucalyptus calmaldulensis*, Horno Contenedor, Febrero 2011, Posoltega, León)

Fuente: Propia del autor, 2012.

En el gráfico anterior puede apreciarse la tendencia que tiene la producción de carbón y la tendencia de la densidad a granel de ese carbón producido, nótese que en lo que se refiere a la cantidad de carbón producido, en los primeros 5 ensayos se obtuvo una baja producción; Esto se debe a que los primeros ensayos no tuvieron el tiempo suficiente de carbonización, ni la cantidad de leña suficiente para el arranque a como se describió en el apartado 8.1.

En lo que se refiere a la densidad a granel del carbón producido se aprecia que en los primeros 4 ensayos la densidad es alta, pero en ese momento la leña utilizada para cargar

esos contenedores no era la leña de mayor edad; por lo tanto esos valores altos de densidad se deben a la granulometría que fue afectada por el alto contenido de humedad de esos ensayos y al corto tiempo de carbonización que produjo altos contenidos de materia volátil. Dando como resultado mayor peso en un mismo volumen y mejor acomodo de los pedazos de carbón al momento de medir la densidad a granel.

Hay que tomar en cuenta que los últimos ensayos se hicieron con leña que presentaba un corazón más grande en diámetro y más oscuro (un árbol no tan joven véase la fotografía 25.) esto también influye en el aumento consecutivo de la densidad al tener un árbol más denso por tener mayor edad.

Las fracciones comercial y no comercial resultaron estar en un nivel muy bueno. Los resultados que muestra la tabla 12, indica que el horno contenedor produce poca cantidad de finos seguramente una buena parte es producida por el uso de la pala al empacar el carbón. Es seguro que los valores de la fracción comercial y no comercial aumenten y disminuyan respectivamente si se usa un trinchante en vez de una pala para extraer el carbón de los contenedores se evitaría quebrar el carbón.

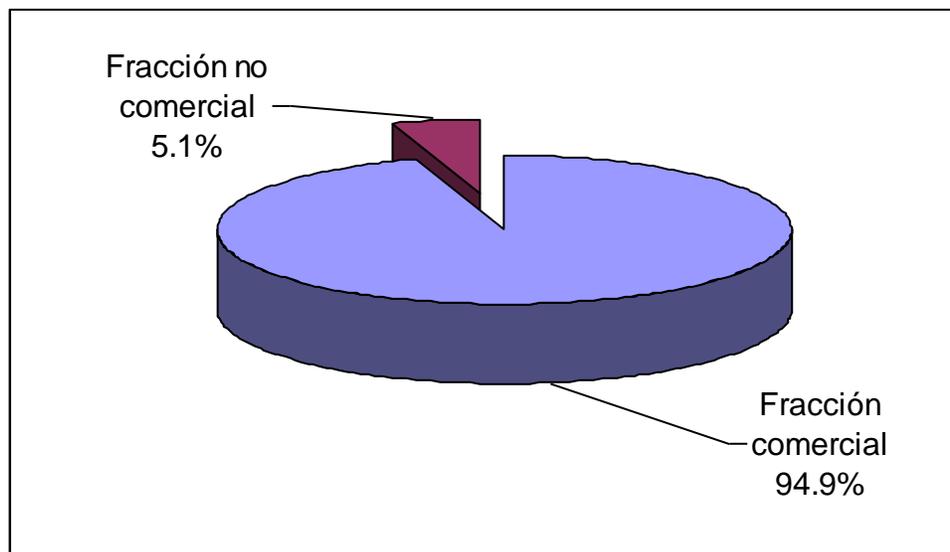


Gráfico 4. Promedio de las Fracciones comercial y no comercial.

(Carbón vegetal de *Eucalyptus calverdulensis*, Horno Contenedor, Febrero 2011, Posoltega, León)

Fuente: Propia del autor, 2012.

Esta baja cantidad de material que es visto como desecho es una gran ventaja económica porque representa una disminución de las pérdidas en el proceso productivo y una ventaja competitiva en el mercado del carbón vegetal.

8.7. Acerca de los costos de producción

Uno de los principales problemas que enfrenta la cooperativa es el costo de toda la operación, en las tablas 15 y 16, se presenta un estimado de los gastos que tuvieron que solventarse para realizar los 13 ensayos para este trabajo monográfico. En el gráfico 7, se puede apreciar que gasto tiene mayor peso en toda la operación.

Nótese que el pago a personal es tan grande como el pago hecho en leña, si se suma el gasto total en personal se alcanza el 49.75%, la cooperativa gasta más en pagarle a su personal que en materia prima para producir el pago del personal. El costo por operar el horno que incluye el gasto en la energía eléctrica, el gasto en combustible para encender la carga el gasto en usar la motosierra (el combustible y los aceites para ésta), los gastos en sacos, mecate y fósforos, apenas totalizan el 16.33%.

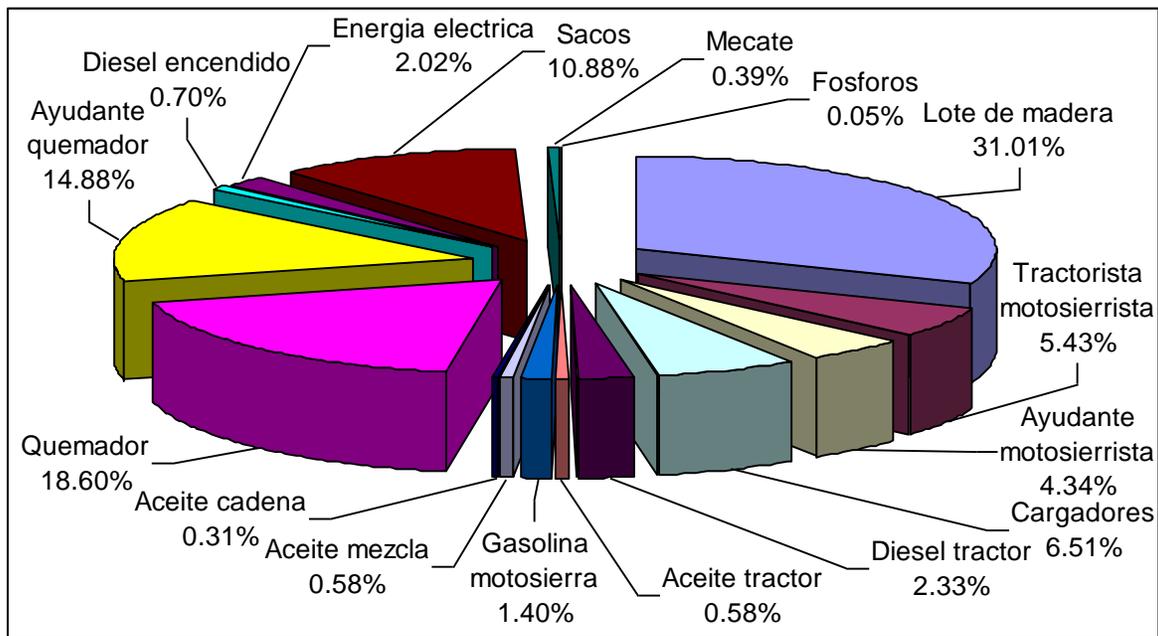


Gráfico 5. Porcentaje de cada costo en el gasto total estimado del proceso productivo de carbón vegetal de COPAPO.

(Horno Contenedor, Febrero 2011, Posoltega, León)

Fuente: Propia del autor, 2012.

El problema fundamental, de los costos del proceso de producción, es hacer uso efectivo del dinero destinado a la compra de madera y el transporte de ésta. La madera se compró por lote; esto significa que fueron al lugar, vieron los árboles y se negoció un valor del lote en base a la cantidad de madera que se observó. Pero es más rentable comprar la madera por la cantidad de leña medida en volumen que se obtenga del lote al hacer la tala rasa, ya que así se logra cuantificar la madera que se compra y por tanto no se sobrestima su costo. La unidad de medida para un volumen de leña en la zona, la “marca” que tiene dimensiones de: 4 X 1 X 1 Varas (2.28 m³ aprox.) y dentro de esta caja imaginaria se apila la leña.

Si se calcula la cantidad de marcas y el precio de cada una en base a cantidad de madera apilada al momento de iniciar el secado (ya que al secarse la madera disminuye su volumen) 28 m^3 , se obtiene que se compraron 12.28 marcas a un precio de C\$ 325.71 cada marca lo cual es muy costoso si se considera que en la comunidad de El Tránsito, León la marca tiene un costo de aproximadamente C\$ 250 puesta al lado del horno (según datos de PROLEÑA, 2010) y en el cálculo anterior ni siquiera se consideró transportar la leña.

Si se toma en cuenta el valor de la operación de corte y transporte para calcular su costo total se obtiene un valor de C\$ 551.30 cada marca, que es más del doble de lo cuesta en la comunidad antes mencionada y recalando que en esa zona es extraída de montaña y por tanto es más difícil su transporte.

De esta manera el precio de 1 m^3 de madera cortado y transportado hasta el horno fue de: C\$ 241.78/ m^3 , lo que dio como resultado que el costo de operación de un contenedor fuera de C\$ 992.30, con lo cual se obtiene que el costo por producir un saco de carbón vegetal fue de C\$ 141.75 que representa el 83.38% del precio promedio de venta de un saco en época de verano (C\$ 170).

Se produjeron en total 2262.4 Kg de carbón vegetal y se estima que la operación de producción en total costó unos C\$ 12900. Con lo que, se obtiene un costo por cada Kg de carbón vegetal producido con el horno contenedor de C\$ 5.70/Kg. Si se vendieron los 91 sacos producidos a un precio promedio de C\$ 170 se obtuvo una ganancia neta de C\$ 2570.

El otro inconveniente que hay que enfrentar es la paga versus el trabajo que hacen el operario del horno y su ayudante, son útiles únicamente en la carga, ignición, apagado y descarga, esto es un tiempo total de 2 horas máximo por día en que se realizan estas operaciones. Entonces si se les está pagando 1 día de trabajo de 8 horas esto quiere decir que esta persona solo trabaja el 25% del tiempo contratado, tiene sobre valorado el trabajo que hacen.

Si se tuviera acceso de leña a precio de mercado de C\$ 250/1 marca puesta a la par del horno contenedor, con los 2 contenedores actuales y siguiendo el plan de trabajo de la tabla 9, se tendría como resultado un costo total en materia prima de C\$ 2850.87, si se reduce a la mitad el salario del quemador y su ayudante, (debido al poco tiempo en que es requerida su mano de obra según la planificación del trabajo de la tabla 9.) dejando los demás gastos de carbonización y empaque igual, se tiene un gasto total en el proceso productivo de C\$ 7115.87 que dejaría un ganancia neta de C\$ 8354.12 y el precio por Kg de carbón se reduciría a C\$ 3.14/Kg.

En la zona aledaña a COPAPO existe la opción de comprar un “coche” de leña que cuesta alrededor de unos C\$ 350 este coche transporta de una vez alrededor de 2.02 m^3 de leña y se encarga de llevarla hasta la par del horno, se tendría un costo de cada Kg de carbón producido a C\$ 3.87 siempre que los gastos mencionados en el párrafo anterior se reduzcan a la mitad. La ventaja que presenta esta opción, es que disminuye los costos productivos en un 32%.

Para determinar todos los costos descritos anteriormente (con leña a un precio de C\$ 250 y a C\$ 350) se hizo en base a la planificación del trabajo de la tabla 11 (4 carbonizaciones por semana), pero en el proceso productivo normal de la cooperativa se logran carbonizar 6 contenedores por semana, lo que reduce el costo por Kg de carbón producido a C\$ 4.51/Kg, un 20.8% menos que al realizar los ensayos; básicamente es porque haciendo 6 carbonizaciones por semana, la mano de obra utilizada en la carbonización se vuelve más productiva.

Para el futuro la cooperativa, tiene planes de aumentar la cantidad de contenedores a 4 en total, lo que significa que aumentará su productividad y por tanto disminuyen los costos. Esto les permitirá producir carbón vegetal durante las 24 horas del día, 5 días a la semana, entonces manteniendo todos los gastos al mismo precio unitario que los estimados en estos ensayos, disminuye el costo de cada Kg producido a C\$ 4.36/Kg que corresponde a una reducción del 23.5% en comparación con el costo de Kg producido al realizar estos ensayos.

Tabla 20. Resumen de opciones de costos del proceso productivo de COPAPO usando el horno Contenedor.

Costo de la leña (C\$/Marca)	551.27		250.00		350.00		
N° de carbonizaciones por mes	13	24	40	24	40	24	40
Egresos (C\$)	12,900	18,856	30,351	12,643	19,996	15,478	24,722
Kg de carbón vegetal producidos	2,262.4	4,176.7	6,961.2	4,176.7	6,961.2	4,176.7	6,961.2
Ganancia neta (C\$)	2,570	9,704	17,249	15,917	27,604	13,082	22,878
C\$/Kg de carbón	5.70	4.51	4.36	3.03	2.87	3.71	3.55
% de reducción del C\$/Kg		20.8	23.5	46.9	49.6	35.0	37.7

En la tabla anterior se presenta un resumen de todas las opciones de costos y la reducción en el costo por Kg de carbón vegetal producido según cada opción, en base al costo que tuvo producir cada kg de carbón vegetal en estos 13 ensayos.

Las 24 carbonizaciones se dan al trabajar de lunes a sábado a un ritmo de una carbonización por día con únicamente 2 contenedores que posee actualmente la cooperativa. Realizar 40 carbonizaciones por mes se logrará cuando se tengan 4 contenedores y se trabaje 24 horas al día, de lunes a sábado (pero sin carbonizar el sábado para hacer mantenimiento del sistema), se requerirá agregar una persona más en la operación del horno contenedor para poder hacer la rotación de personal entre el día y noche. Como se puede ver en todas las opciones se gana dinero pero la que entrega mayor ganancia es la opción en donde se cuenta con los 4 contenedores y con un precio de la leña de C\$ 250 la marca.

8.8. Comparación del carbón obtenido en el horno contenedor con el producido en parva

A continuación se realiza la comparación entre el carbón producido mediante la parva y el producido en el horno Contenedor con el objetivo de corroborar si la tecnología del horno contenedor da una mejor opción tecnológica a la producción de carbón vegetal en el país. Los datos que aquí se presentan del método de parva se obtuvieron mediante la ayuda de PROLEÑA de un estudio propio que realizaron en la comunidad de Apompuá, El Tránsito, en el municipio de Nagarote, en el departamento de León, en el año 2010.

La leña que se utilizó, para el estudio realizado en la parva por PROLEÑA provino de bosque (así se le llama a la vegetación natural de la zona), y por tanto es otra especie y de otra edad, razones que se deben tener en mente al momento de interpretar esta comparación ya que es más bien un contraste entre los métodos de carbonización y los resultados que otorgan. Como se cuenta con 5 ensayos en la parva y 13 ensayos en el horno contenedor, para hacer la comparación se escogieron 3 de los mejores ensayos de los hechos en el horno contenedor y dos ensayos adicionales con distintos valores entre sí, para hacer una comparación más justa

8.8.1. Comparación del modo de operación de la parva y del horno Contenedor

La primera diferencia a mencionar es la manera en que funciona cada método de carbonización, la compra de leña en la parva se hace en el momento en que se desea producir carbón, porque estos productores son de escasos recursos y el ingreso que genera este método se denomina de “supervivencia” de modo que falta el capital para comprar leña de antemano y darle un buen secado.

Lo siguiente es que la parva no puede carbonizar en época de invierno, porque el agujero en la tierra se llena de agua y está condensa los ácidos piroleñosos que están siendo evacuados en los gases de carbonización; y así el carbón vegetal los absorbe, lo que disminuye su calidad (FAO, 1983.). También se debe a que la leña seca escasea en tiempo de invierno; el horno contenedor si permite carbonizar en invierno lo cual es una gran ventaja porque en invierno el precio del carbón aumenta, entonces con la tecnología del horno contendor se puede aprovechar este aumento en los precios de venta en el mercado, pudiendo obtener mayores ganancias en esa época.

La tabla 21, presenta los datos de humedad de la leña usada tanto en el método de parva como en el uso del horno contenedor. Los valores están en base húmeda y la diferencia entre ambas medias es de 1.09 unidades, que se traduce en un 3.42% más de humedad en la leña usada para alimentar la parva comparado con el contenido de humedad de la leña para alimentar el horno contenedor. El contenido de humedad en la leña de la parva es mayor porque, la leña recién es extraída del bosque, se introduce a la parva para carbonizarla.

Dicha diferencia no es muy significativa y se debe principalmente a la escasa preparación de la leña en el método de la parva, éste contenido de humedad afecta directamente la eficiencia de conversión leña-carbón de la parva, sin embargo demuestra que tan sólo un mes de secado hace una diferencia en el contenido de humedad de la leña a carbonizar.

Tabla 21. Contenido de humedad de la leña de la parva y el horno Contenedor.

Contenido de humedad (% bh)		
Ensayo	Parva	Horno Contenedor*
1	32.39	18.57
2	28.62	31.12
3	41.04	33.58
4	38.58	35.33
5	18.58	33.16
Media	31.84	30.75

* Datos de los ensayos 2, 4, 10, 11, 12

8.8.2. Calidad del carbón vegetal de la parva y del horno Contenedor

En cuanto a la calidad del carbón, en la tabla siguiente se compara primero, lo que comprenden los análisis químicos que son: el contenido de humedad, materia volátil, ceniza, carbono fijo, poder calorífico y luego el contenido de humedad, la densidad a granel y las fracciones comercial y no comercial del carbón producido en ambos métodos.

Tabla 22. Análisis químicos del carbón de parva y del horno Contenedor.

Ensayo	Parva				Horno Contenedor*			
	Cenizas (%)	Materia Volátil (%)	Carbono Fijo (%)	PCS (Kcal/kg)	Cenizas (%)	Materia Volátil (%)	Carbono Fijo (%)	PCS (Kcal/kg)
1	4.42	17.88	77.7	7401.65	2.32	26.69	70.99	7467.22
2	5.45	10.56	84	7606.87	2.08	17.50	80.42	7772.22
3	5.41	21.1	73.5	7445.7	2.19	21.94	75.87	7724.74
4	5.3	20.85	73.86	7427.49	2.57	19.31	78.12	7843.26
5	5.28	15.89	78.84	7365.22	2.52	21.31	76.17	7749.48
Media	5.14	17.6	77.26	7470.43	2.33	21.35	76.31	7711.38

* Datos de los ensayos 2, 4, 10, 11, 12

En los datos del contenido de cenizas hay una diferencia de 2.81 unidades menos en el carbón producido en el horno contenedor, esta diferencia representa que hay un 54.67% más cantidad de ceniza en el carbón de la parva y se debe a que el carbón de la parva está en contacto directo con contaminantes como la tierra y cuando se recoge el carbón también se acarrea tierra; además recuérdese que se usan árboles de diversas especies.

En cuanto al contenido de materia volátil la diferencia es de 3.75 unidades, que es 17.5% menor en el carbón de la parva, una diferencia significativa pero es probable que se deba al precario control que se tiene sobre el proceso de carbonización en la parva y el carbón producido haya tenido tiempo demás en la carbonización lo que disminuyó el contenido de materia volátil y por ende aumentó el contenido de carbono fijo; en donde se presenta una

diferencia de 0.95 unidades, que equivale a un 1.22% más de contenido de carbono fijo en el carbón de la parva lo cual no es significativo (la diferencia no equivale al 5%)

En los datos del poder calorífico hay una diferencia de 240.95 unidades que indica que el PSC de la parva es un 3.12% menor que el PSC del carbón del horno contenedor, lo que tampoco representa una diferencia significativa. Con respecto al contenido de humedad del carbón en la tabla 23, se muestra que la parva tiene 2.69 unidades que es un 55.5% más humedad que el carbón del horno contenedor esto es debido en gran parte al uso de agua para apagar los carbones encendidos que se encuentran al extraer el carbón de la parva, pero la humedad que posee el carbón del horno contenedor es peligrosamente baja, una desventaja con respecto a la parva.

Tabla 23. Contenido de humedad del carbón de parva y del horno Contenedor.

Contenido de humedad (% bh)		
Ensayo	Parva	Horno Contenedor*
1	2.34	3.02
2	4.32	3.01
3	8.18	1.69
4	1.76	1.11
5	7.59	1.95
Media	4.84	2.15

* Datos de los ensayos 2, 4, 10, 11, 12

En lo referente a la densidad a granel, según lo presentado en la tabla 24, existe una diferencia de 26.5 unidades que equivale a un 11.67%. Esto indica que el carbón de la parva es más denso, es decir el carbón de la parva tiene mayor peso por volumen que el del horno contenedor. Esto puede deberse al tipo de madera que se utiliza en la parva ya que debe de tener mayor densidad (por tener mayor edad) que los árboles de 1 y 3 años usados en estos ensayos con el horno contenedor o puede ser el efecto de haber agregado agua lo que le sumó peso al carbón y ocultó el dato real de densidad a granel.

Con respecto a las fracciones comercial y no comercial, en la tabla 24, se encuentra una diferencia de 10.5 unidades que equivale a 11.0% más de carbón vegetal producido en el horno contenedor que califica como fracción comercial.

Una diferencia tan grande se debe a que en el método de la parva primero se debe extraer el carbón del agujero en el suelo, luego apagarlo con agua y después levantarlo para ponerlo en los sacos; todo este movimiento sumado a que cuando se le agrega agua al carbón caliente la formación de vapor de agua revienta el carbón reduciendo su tamaño, es lo que genera que haya un 15.1% en promedio de carbón que es visto como desecho y que representa una pérdida en el método.

Tabla 24. Densidad a granel, Fracción comercial y no comercial del carbón de parva y del horno Contenedor.

Ensayo	Densidad a Granel (Kg/m ³)		Fracción comercial	Fracción no comercial	Fracción comercial	Fracción no comercial
	Parva	Horno Contenedor*	Parva (%)		Horno Contenedor (%)*	
1	199.5	197.8	83.7	16.3	94.9	5.14
2	213	201.2	72.1	27.9	93.7	6.29
3	227.3	206.3	88.1	11.9	96.6	3.4
4	254.6	201.8	92.0	8.0	96.2	3.8
5	240.7	195.6	88.8	11.2	95.7	4.3
Media	227	200.5	84.9	15.1	95.4	4.5

* Datos de los ensayos 2, 4, 10, 11, 12

Este 11.0% más de carbón útil que produce el horno contenedor representa un aumento significativo de la producción en comparación con la parva lo que significa una ventaja económica que ofrece la tecnología del horno contenedor ya que hay menos cantidad de producto que se convierte en pérdida.

8.8.3. Eficiencia de conversión leña-carbón de la parva y del horno Contenedor

La tabla 25, muestra la eficiencia que tuvo cada técnica de carbonización la diferencia entre ambas es de 1.2 unidades como promedio. Siendo en un 3.52% mayor la eficiencia obtenida con el horno contenedor, además hay que tomar en cuenta que para la parva, es totalmente atípica, una eficiencia de 38 y 40% eliminando estos dos valores la media de la eficiencia de la parva disminuye a 28.66%, lo que da como resultado que el horno contenedor es un 15.7% más eficiente que la parva. También hay que mencionar la poca variación que presentan los datos obtenidos en el horno contenedor cuando se obtuvo mejor experiencia de operación, mientras que en la parva hay una gran variación de los datos.

Tabla 25. Porcentaje de eficiencia de conversión de leña-carbón de la parva y del horno Contenedor

Ensayo	Parva	Horno Contenedor*
	Eficiencia (%)	Eficiencia (%)
1	25	31.13
2	40	28.14
3	38	38.19
4	32	35.31
5	29	37.24
Media	32.80**	34.00

* Datos de los ensayos 2, 4, 10, 11, 12

**28.66% en promedio en la parva, calculado con los valores de 25, 32 y 29% de eficiencia

Este 15.7% más de eficiencia es muy significativo porque representa mejor aprovechamiento de la materia prima al usar el horno contenedor y que sumado a la mayor cantidad de producto que se genera como fracción comercial da como resultado una mejor producción de carbón vegetal.

8.8.4. Costo unitario de producción de la parva y del horno Contenedor.

En la parva la cantidad de producción de carbón de una sola vez (una sola carga de leña) es de 1 “flete” (unidad de medida de la producción en la comunidad) que equivalen a 20 sacos de aproximadamente 70 lb cada uno. (Según PROLEÑA, 2010. en época de verano). El horno contenedor, carga de una vez en promedio 513.2 Kg de leña en masa seca y produce 174.0 Kg de carbón de una vez y no se carbonizan unos 25.2 Kg de leña en promedio; pero se pueden realizar un mínimo de 3 ciclos por semana (si se sigue el mismo plan de trabajo de la tabla 11, es decir 4 carbonizaciones a la semana). En la tabla siguiente se presenta la comparación entre la capacidad de producción de ambos métodos y su costo total de producción.

Tabla 26. Capacidades productivas y costos totales de producción de la parva y el horno Contenedor.

		Parva***	horno Contenedor
Carga de leña*	(Kg)	2553.6	1539.81
Carbón producido	(Kg)	635	522
Leña sin carbonizar	(Kg)	187.4	75.7
Costo del proceso**	(C\$)	1900	2994.21

* En masa seca

** En época de verano

*** (Según PROLEÑA, 2010.)

Entonces para la parva el costo por cada Kg producido es 2.99 córdobas, mientras que en el horno contenedor es de 5.70 córdobas; un 47.54% más que la parva. El carbón vegetal se compra aproximadamente a un precio de C\$ 5.35/Kg (no se vende por Kg a menos que sea en un supermercado). Entonces la parva genera mayores ganancias siempre que la producción no caiga por debajo del promedio aquí presentado.

Pero el problema se debe prácticamente a los altos costos que tiene la cooperativa con respecto al personal y el precio de la leña. Si se toman medidas para disminuir estos costos la ganancia sería mayor.

Además hay que tener en cuenta que con experiencia en el uso del horno contenedor es posible obtener cero kilos de leña no carbonizada, produciendo más carbón que es más ganancia, mientras que en la parva no importa la experiencia que se tenga siempre habrá leña sin carbonizar, que resta los ingresos netos. También se debe mencionar que el horno contenedor produce un mayor porcentaje de carbón comercial y proporciona un mejor aprovechamiento de la materia prima.

Si se comparan los datos de costos de producción de cada Kg de carbón vegetal presentado en la tabla 20, se puede observar que con la mejor opción de costos, el costo por Kg de

carbón producido es menor que el de la parva (C\$ 2.87/Kg), pero solamente con el acto de comprar leña ya sea a C\$ 250 ó a C\$ 350 la marca, sin poseer 2 contenedores adicionales, la diferencia en porcentaje entre el costo por Kg de carbón vegetal producido en la parva contra el fabricado en el horno contenedor se reduce a 1.3% y 19.4% respectivamente, que es mucho mejor que el 47.54% que se obtuvo en estos ensayos.

Por tanto este contraste entre la operación de ambos métodos y la calidad del carbón que produce sugiere que con el horno Contenedor se obtiene mayor cantidad de carbón vegetal comercial (por tener mayor eficiencia y fracción comercial) y en cuanto a la calidad no hay un diferencia importante a pesar de que el horno Contenedor se alimentó con materia prima de baja calidad, lo que es probable que cambie si se alimenta el horno Contenedor con leña de buena calidad.

IX. CONCLUSIONES

Se realizó de manera satisfactoria y completa la evaluación tecnológica del proceso de producción del carbón vegetal producido por la Cooperativa de Productores Agroforestales de Posoltega, COPAPO, Posoltega, León.

La caracterización del proceso de producción demostró que hay poco control sobre el tamaño de la leña, la edad, y el precio de la misma por parte del personal de la cooperativa, provocando que el carbón vegetal obtenido tenga baja densidad a granel, y que la ganancia neta del proceso productivo sea baja.

Se formuló el balance de materia del proceso productivo, logrando determinar con éste que la eficiencia de conversión leña-carbón tiene un promedio de 31.70% lo cual está próximo al rango esperado para esta tecnología. Así mismo se determinó las fracciones comercial y no comercial, obteniéndose un valor en porcentaje promedio de 94.9% y 5.1% respectivamente lo cual es un valor muy bueno, pero que puede ser mejorado.

Se definieron los criterios para establecer la calidad del carbón vegetal obtenido en el horno contenedor según el proceso productivo de COPAPO, tomando el promedio de los resultados el carbón vegetal queda en la calidad más baja “C”, debido en gran parte al uso de leña de baja calidad, pero también es una situación con buen potencial para mejorar.

Se determinó el costo unitario de producción de carbón vegetal, según el proceso productivo actual de COPAPO resultando este de C\$ 5.70/Kg, debido principalmente a la modalidad de compra de la leña y el personal que es poco productivo.

El análisis comparativo entre el método de la parva y el método del horno Contenedor sugiere que existen diferencias sustanciales siendo mejor el horno Contenedor en el modo de operación, en el ámbito medioambiental, en la eficiencia de conversión leña-carbón, en la calidad del carbón producido con respecto al contenido de ceniza, el contenido de materia volátil, y al porcentaje de fracciones comercial y no comercial, mientras que en la densidad a granel y en el costo unitario de producción es mejor la parva, pero el horno Contenedor es capaz de reducirlo si se aumenta el número de contenedores a 4 en total y se adquiere leña al precio del mercado.

En conclusión, el proceso productivo de COPAPO con la tecnología del horno Contenedor tiene ciertos problemas, pero todos pueden ser solucionados a corto plazo y prueba que aunque se alimente con materia prima de baja calidad y se opere con altos costos (con respecto a otras tecnologías), la tecnología del horno Contenedor representa una mejora significativa en el aprovechamiento de los recursos dentroenergéticos del país, en la conservación del medio ambiente, en la humanización del trabajo de la operación de carbonización y en la rentabilidad económica.

X. RECOMENDACIONES

Un posterior estudio en el horno contenedor puede incluir las siguientes sugerencias y recomendaciones, para verificar como mejora el proceso productivo y la calidad del carbón vegetal que fabrica COPAPO:

- Acceder a capital de trabajo para comprar el doble de leña que necesitarían los 4 contenedores y planificar un secado para una parte de leña mientras la otra parte está siendo carbonizada.
- Planificar el corte y el secado para permitir un tiempo de secado de por lo menos 2 meses con espacio entre las hileras de marcas de leña y verificar si es significativo dar 1 mes más de secado.
- Adquirir leña con edad mínima 4 años y lo óptimo 6 años para cuantificar la mejora en la densidad aparente y el contenido de carbono fijo del carbón a producir.
- En cuanto a los costos de producción proponer la subcontratación de la leña que se requiere, para disminuir los costos y disponer de mejor leña ya que se podrá exigir al proveedor un tamaño y edad más uniformes.
- Implementar el uso de un medidor de humedad para uso de campo y Capacitar a los operadores del horno Contenedor para la determinar con este el contenido de humedad de antemano y así tener más certeza al estimar el tiempo de carbonización.
- Evitar la rotación del personal que opera el horno contenedor para que la experiencia en la operación no afecte el resultado, con lo cual se obtendrán mejores eficiencias.
- Sustituir la pala por un trinchante para verificar si mejora la calidad del carbón vegetal en lo que refiere al porcentaje de la fracción comercial y no comercial y densidad a granel.
- Cuantificar la disminución de los costos de producción y la maximización de la productividad de los operarios una vez instalados 2 contenedores adicionales, para un total de 4 contenedores en operación.
- Realizar el balance de energía en la etapa de carbonización a nivel básico para determinar la cantidad y la concentración de los gases de pirolisis.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arango, Bibiana y Tamayo, Lida, (2008). Densidad de la madera en clones de Eucalyptus por densitometría de rayos X. Grupo de investigación en Política y Gestión Tecnológica, Universidad Pontificia Bolivariana, Dirección Postal CO 0701, Medellín, Colombia.
2. Cámara Barcillos, D y Santos Pimenta, A, (2001). Apostila de Aulas Práticas energia da Madeira. Universidade Federal de Viçosa – UFV Centro de Ciências Agrárias – CCA, Departamento de Engenharia Florestal – DEF, Laboratório de Painéis e energia da Madeira. Brasil.
3. Cardoso Túlio, (2010). Desempeño de un sistema de horno y hornilla para la combustión de los gases de la carbonización de madera. Trabajo presentado a Universidade Federal de Viçosa, para obtener el título de *Magister Scientiae*. Brasil.
4. Cassia Carneiro, Angelica, Semana academica-UFFRJ Vicoso-MG. Producao de carvao vegetal: parâmetros de qualidade da madeira e tecnologias de producao. ppt.
5. Estudio FAO: Montes 41. (1983). Métodos simples para fabricar carbón vegetal.
6. Ministerio de Energía y Minas, MEM. (2006). Balance Energético Nacional. Dirección de políticas energéticas.
7. PROLEÑA. (2011). Manual de operación: Sistema de carbonización de madera en contenedores metálicos.
8. Santos Pimenta, A, Cámara Barcillos, D y de Oliveira Elisabeth, (2001). Produção de Carvão Vegetal. Universidade Federal de Viçosa, Laboratório de Painéis e Energia da Madeira.
9. Urbina Baca, Gabriel. (1995). Evaluación de proyectos. 3ª ed. Mc Graw Hill. Mexico. ISBN 970-10-0745-8.
10. http://users.skynet.be/mariela.tadla/carbonizacion/es/topFrame_2_es.html visitado el 30.04.12 a las 7:15pm.

XII. ANEXOS

A.1. Formato de recolección de datos de campo

Fecha: 06.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: <u>1</u>	Tipo de horno: <u>contenedor</u>
Hora de inicio y fin de la carga del horno: <u>7:00-7:45am</u>	
Número de Operarios utilizados para la carga: <u>2</u>	Peso de la leña cargada (Kg): <u>706</u>
Hora de ignición: <u>8.55am</u>	

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): <u>06.02.12</u>	Hora de finalización carbonización: <u>7:00pm</u>
Fecha de descarga del Horno (ya frio): <u>08.02.12</u>	
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: <u>7:00-7:30am</u>	
Número de operarios utilizados en la descarga: <u>2</u>	

Peso del carbón obtenido (Kg): <u>140.4</u>	Peso de leña no carbonizada (Kg): <u>123.9</u>
Peso de la fracción comercial (Kg): <u>46.03</u>	Peso de la fracción no comercial (Kg): <u>3.77</u>
Densidad aparente obtenida (Kg/m ³): <u>213.10</u>	
Peso de la muestra extraída (Kg): <u>1.5</u>	

Observaciones

Fecha: 07.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: 2 Tipo de horno: contenedor
Hora de inicio y fin de la carga del horno: 7:00-7:45am
Número de Operarios utilizados para la carga: 2 Peso de la leña cargada (Kg): 704.2
Hora de ignición: 6:30am

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): 07.02.12 Hora de finalización carbonización: 4:30pm
Fecha de descarga del Horno (ya frio): 09.02.12
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: 9:00am-9:45am
Número de operarios utilizados en la descarga: 2

Peso del carbón obtenido (Kg): 161.6 Peso de leña no carbonizada (Kg): 64.3
Peso de la fracción comercial (Kg): 42.73 Peso de la fracción no comercial (Kg): 2.32
Densidad aparente obtenida (Kg/m³): 197.84
Peso de la muestra extraída (Kg): 1.5

Observaciones

Fecha: 08.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: 3 Tipo de horno: contenedor
Hora de inicio y fin de la carga del horno: 7:00-7:45am
Número de Operarios utilizados para la carga: 2 Peso de la leña cargada (Kg): 819.7
Hora de ignición: 6:40am

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): 09.02.12 Hora de finalización carbonización: 7:10pm
Fecha de descarga del Horno (ya frio): 11.02.12
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: 9:00am-9:45am
Número de operarios utilizados en la descarga: 2

Peso del carbón obtenido (Kg): 138.00 Peso de leña no carbonizada (Kg): 47.20
Peso de la fracción comercial (Kg): 45.78 Peso de la fracción no comercial (Kg): 3.62
Densidad aparente obtenida (Kg/m³): 211.97
Peso de la muestra extraída (Kg): 1.5

Observaciones

Fecha: 09.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: 4 Tipo de horno: contenedor
Hora de inicio y fin de la carga del horno: 7:00-7:45am
Número de Operarios utilizados para la carga: 2 Peso de la leña cargada (Kg): 821.5
Hora de ignición: 5:45am

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): 10.02.12 Hora de finalización carbonización: 5:43pm
Fecha de descarga del Horno (ya frio): 13.02.12
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: 9:00am-9:45am
Número de operarios utilizados en la descarga: 2

Peso del carbón obtenido (Kg): 155.50 Peso de leña no carbonizada (Kg): 13.20
Peso de la fracción comercial (Kg): 43.46 Peso de la fracción no comercial (Kg): 2.92
Densidad aparente obtenida (Kg/m³): 201.23
Peso de la muestra extraída (Kg): 1.5

Observaciones

Fecha: 11.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: 5 Tipo de horno: contenedor
Hora de inicio y fin de la carga del horno: 7:00-7:45am
Número de Operarios utilizados para la carga: 2 Peso de la leña cargada (Kg): 765.8
Hora de ignición: 6:30am

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): 13.02.12 Hora de finalización carbonización: 5:45pm
Fecha de descarga del Horno (ya frio): 15.02.12
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: 9:00am-9:45am
Número de operarios utilizados en la descarga: 2

Peso del carbón obtenido (Kg): 146.30 Peso de leña no carbonizada (Kg): 18.60
Peso de la fracción comercial (Kg): 39.07 Peso de la fracción no comercial (Kg): 2.12
Densidad aparente obtenida (Kg/m³): 180.88
Peso de la muestra extraída (Kg): 1.5

Observaciones

Fecha: 13.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: 6 Tipo de horno: contenedor
Hora de inicio y fin de la carga del horno: 7:00-7:45am
Número de Operarios utilizados para la carga: 2 Peso de la leña cargada (Kg): 701.2
Hora de ignición: 6:00am

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): 14.02.12 Hora de finalización carbonización: 3:30pm
Fecha de descarga del Horno (ya frio): 16.02.12
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: 9:00am-9:45am
Número de operarios utilizados en la descarga: 2

Peso del carbón obtenido (Kg): 174.20 Peso de leña no carbonizada (Kg): 9.00
Peso de la fracción comercial (Kg): 41.15 Peso de la fracción no comercial (Kg): 1.82
Densidad aparente obtenida (Kg/m³): 190.49
Peso de la muestra extraída (Kg): 1.5

Observaciones

Fecha: 15.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: <u>7</u>	Tipo de horno: <u>contenedor</u>
Hora de inicio y fin de la carga del horno: <u>7:00-7:45am</u>	
Número de Operarios utilizados para la carga: <u>2</u>	Peso de la leña cargada (Kg): <u>714.4</u>
Hora de ignición: <u>6:10am*</u>	

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): <u>16.02.12</u>	Hora de finalización carbonización: <u>8:06pm</u>
Fecha de descarga del Horno (ya frio): <u>18.02.12</u>	
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: <u>9:00am-9:45am</u>	
Número de operarios utilizados en la descarga: <u>2</u>	

Peso del carbón obtenido (Kg): <u>168.10</u>	Peso de leña no carbonizada (Kg): <u>6.40</u>
Peso de la fracción comercial (Kg): <u>39.68</u>	Peso de la fracción no comercial (Kg): <u>2.42</u>
Densidad aparente obtenida (Kg/m ³): <u>183.70</u>	
Peso de la muestra extraída (Kg): <u>1.5</u>	

Observaciones

* falta de energía eléctrica 9:05am, se baja el contenedor y se apaga porque le energía no regresó en menos de 1:30min. 1: pm se reenciende.

Fecha: 16.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: 8 Tipo de horno: contenedor
Hora de inicio y fin de la carga del horno: 7:00-7:45am
Número de Operarios utilizados para la carga: 2 Peso de la leña cargada (Kg): 772
Hora de ignición: 6:05am

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): 17.02.12 Hora de finalización carbonización: 6:30pm
Fecha de descarga del Horno (ya frio): 20.02.12
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: 9:00am-9:45am
Número de operarios utilizados en la descarga: 2

Peso del carbón obtenido (Kg): 179.70 Peso de leña no carbonizada (Kg): 5.30
Peso de la fracción comercial (Kg): 41.63 Peso de la fracción no comercial (Kg): 1.42
Densidad aparente obtenida (Kg/m³): 192.75
Peso de la muestra extraída (Kg): 1.5

Observaciones

Fecha: 18.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: 9 Tipo de horno: contenedor
Hora de inicio y fin de la carga del horno: 7:00-7:45am
Número de Operarios utilizados para la carga: 2 Peso de la leña cargada (Kg): 758.9
Hora de ignición: 6:50am

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): 20.02.12 Hora de finalización carbonización: 5:30pm
Fecha de descarga del Horno (ya frio): 22.02.12
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: 9:00am-9:45am
Número de operarios utilizados en la descarga: 2

Peso del carbón obtenido (Kg): 173.90 Peso de leña no carbonizada (Kg): 30.47
Peso de la fracción comercial (Kg): 40.41 Peso de la fracción no comercial (Kg): 2.02
Densidad aparente obtenida (Kg/m³): 187.10
Peso de la muestra extraída (Kg): 1.5

Observaciones

Fecha: 20.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: 10 Tipo de horno: contenedor
Hora de inicio y fin de la carga del horno: 7:00-7:45am
Número de Operarios utilizados para la carga: 2 Peso de la leña cargada (Kg): 742.4
Hora de ignición: 6:20am

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): 21.02.12 Hora de finalización carbonización: 5:40pm
Fecha de descarga del Horno (ya frio): 23.02.12
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: 9:00am-9:45am
Número de operarios utilizados en la descarga: 2

Peso del carbón obtenido (Kg): 211.40 Peso de leña no carbonizada (Kg): 33.58
Peso de la fracción comercial (Kg): 44.56 Peso de la fracción no comercial (Kg): 1.57
Densidad aparente obtenida (Kg/m³): 206.31
Peso de la muestra extraída (Kg): 1.5

Observaciones

Fecha: 22.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: 11 Tipo de horno: contenedor
Hora de inicio y fin de la carga del horno: 7:00-7:45am
Número de Operarios utilizados para la carga: 2 Peso de la leña cargada (Kg): 773.5
Hora de ignición: 6:25am*

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): 23.02.12 Hora de finalización carbonización: 8:00pm
Fecha de descarga del Horno (ya frio): 25.02.12
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: 9:00am-9:45am
Número de operarios utilizados en la descarga: 2

Peso del carbón obtenido (Kg): 201.80 Peso de leña no carbonizada (Kg): 0.00
Peso de la fracción comercial (Kg): 43.59 Peso de la fracción no comercial (Kg): 1.72
Densidad aparente obtenida (Kg/m³): 201.79
Peso de la muestra extraída (Kg): 1.5

Observaciones

* Falta la energía eléctrica y se re-arranca a las 8:30am. No se bajó el contenedor.

Fecha: 23.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: 12 Tipo de horno: contenedor
Hora de inicio y fin de la carga del horno: 7:00-7:45am
Número de Operarios utilizados para la carga: 2 Peso de la leña cargada (Kg): 735.6
Hora de ignición: 6:40 am

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): 24.02.12 Hora de finalización carbonización: 5.00pm
Fecha de descarga del Horno (ya frio): 27.02.12
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: 7:00am-7:45am
Número de operarios utilizados en la descarga: 2

Peso del carbón obtenido (Kg): 199.80 Peso de leña no carbonizada (Kg): 15.90
Peso de la fracción comercial (Kg): 42.24 Peso de la fracción no comercial (Kg): 1.92
Densidad aparente obtenida (Kg/m³): 195.57
Peso de la muestra extraída (Kg): 1.5

Observaciones

Fecha: 25.02.12

Persona que toma los datos: Eleazar A Mayorga Valdez

Número de ensayo: 13 Tipo de horno: contenedor
Hora de inicio y fin de la carga del horno: 9:00-9:45am
Número de Operarios utilizados para la carga: 2 Peso de la leña cargada (Kg): 907.1
Hora de ignición: 6:20am

Temperatura (a 1, 3 y 8 horas del arranque °C): 135, 201, 280 sobre la parte superior

Fecha de finalización (no frio): 27.02.12 Hora de finalización carbonización: 7:30pm
Fecha de descarga del Horno (ya frio): 29.02.12
Hora de inicio y fin de la descarga del horno: 7:00am-7:45am
Número de operarios utilizados en la descarga: 2

Peso del carbón obtenido (Kg): 211.70 Peso de leña no carbonizada (Kg): 9.90
Peso de la fracción comercial (Kg): 44.32 Peso de la fracción no comercial (Kg): 2.32
Densidad aparente obtenida (Kg/m³): 205.18
Peso de la muestra extraída (Kg): 1.5

Observaciones

Los siguientes procedimientos fueron traducidos textualmente de la referencia bibliográfica N° 4. (Apostila de Aulas Práticas energia da Madeira)

A.2. Determinación de la densidad a granel

Consideraciones

Los parámetros que actúan en la densidad del carbón son: la densidad de la madera de la cual tiene su origen y la temperatura de carbonización. Cuanto mayor es la densidad de la madera, mayor será la densidad de carbón producido. La temperatura altera las propiedades físicas del carbón.

En el carbón vegetal la densidad es una propiedad muy importante, pues ella determina entre otras cosas, el volumen ocupado y la reducción de la unidad, sin perjudicar otras propiedades la densidad del carbón debe ser tan grande como sea posible.

Hay que distinguir que la densidad del carbón vegetal trata de un material muy poroso (70 % a 80 % de porosidad) la densidad que se mide varia con la técnica de medición. Básicamente existen 3 modos de medir la densidad:

Densidad a granel: se toma una caja de madera o metálica con dimensiones nominales de 1x1x1m, lo que da un volumen de 1m^3 , la relación peso-volumen del carbón dada por Kg/ m^3 se denomina densidad a granel, y en el ISO “Bulk density”. Tal medida es fuertemente influenciada por la granulometría. Normalmente, para carbón vegetal de madera de Eucalipto, la densidad de granel está en el rango de 200 a 300 kg/ m^3 .

Densidad aparente: es la medida de densidad del carbón, descontándose el volumen de vacíos entre los pedazos de carbón. La densidad aparente puede presentar enorme variabilidad en función del estado de los pedazos escogidos para la prueba. Los pedazos mayores de carbón pueden presentar trincas internas bastante grandes, capaces de enmascarar el valor de la densidad aparente.

Densidad verdadera: es una medida de la densidad del carbón descontándose el volumen de la porosidad interna (porosidad es la relación entre la densidad verdadera y la densidad aparente del carbón).

Procedimientos

Para la determinación de densidad a granel se utilizan los siguientes pasos dictados por la Norma NBR 6922/81 de ABNT:

1. Construir una caja metálica o de madera, paredes rígidas y dimensiones internas de 60x60x60 cm:
2. Pesar la caja vacía, en una balanza con precisión de 0.05 Kg;

3. Tomar una muestra de carbón representativa del lote en cuestión, en cantidad suficiente para llenar la caja;
4. La muestra de carbón debe ser colocada sobre una lona o superficie plana y limpia para eliminar materiales extraños como piedras, tierra, arena, etc.
5. Llenar la caja con ayuda de una pala u otro recipiente adecuado, tomándose los siguientes cuidados:
 - Inclinación de descarga no superior a 45°;
 - Punto de descarga en el centro de la caja lo más posible;
 - Altura de descarga de 5cm encima del tope de la caja aproximadamente;
 - Cuando se forma el vértice de la pirámide de apilamiento, aplanarla y llenar con ello los espacios vacíos de la caja;
 - Agitar levemente la caja para posibilitar el acomodado de los pedazos de carbón y completar el llenado de la caja;
6. Pesarse la caja llena de carbón. La densidad a granel del carbón es obtenida por la fórmula:

$$D = \frac{M2 - M1}{V} \quad (A.1)$$

Dónde:

D: Densidad a granel (masa específica) en Kg/m³

M2: Masa de caja llena de carbón en Kg

M1: Masa de caja vacía en kg

V: Volumen de caja en m³ = 0.216 m³

A.3. Análisis químicos

Consideraciones

La composición química es una de las propiedades más importantes del carbón vegetal e influencia el comportamiento y performance del alto-horno en la industria siderúrgica. El carbón vegetal puede ser considerado como constituido de 3 partes en términos de análisis químicos, carbono fijo, materiales volátiles y cenizas. Todos los balances de masa en los procesos que se utilizan son a partir de las determinaciones de los contenidos de esas tres partes mencionadas.

El efecto de la cantidad de carbono presente en el carbón vegetal se refleja al utilizarlo en el horno por unidad de volumen; para el mismo volumen, mayor es la utilización del mismo a medida que el carbono fijo aumenta, generando una mayor producción por unidad de volumen.

El efecto de los materiales volátiles es que, se ha encontrado que modifican la estructura del carbón, la porosidad, diámetro medio de los poros, área específica total y además otras características físicas de la madera pueden ser alteradas drásticamente por la eliminación de

los volátiles. Durante la carbonización de la madera, la temperatura es el principal parámetro que regula los contenidos de materias volátiles y carbono fijo del carbón vegetal seguido de la velocidad de calentamiento. El contenido de cenizas en el carbón vegetal es siempre bajo, nunca sobrepasando 3 %. Mientras que el carbón mineral presenta contenidos mucho más elevados de cenizas.

Materiales

- Carbón cribado y molido
- Cápsula de porcelana
- Estufa
- Desecador
- Mufla de laboratorio
- Balanza con precisión de 0.01 g

Procedimientos

Los procedimientos para los análisis químicos se basan en las normas ASTM D1762-64 “Chemical Analysis of Wood Charcoal” y ABNT NBR 8112/83 “carbón vegetal analise imediata”. En la aplicación de esta última norma se adoptaron como normas complementarias:

- NBR .5734 - Peneiras para ensaio - especificação
- NBR 6923 - Amostragem e preparação da amostra de carvão vegetal - procedimento.

Contenido de humedad

Para el análisis químico es necesario que se proceda a determinar el contenido de humedad del carbón vegetal.

Para la determinación del contenido de humedad se adoptaron los siguientes pasos:

1. Tomar una muestra de carbón que sea representativa del lote en cuestión (Norma NBR -6923 da ABNT) y reducirlo a pequeñas partículas molidas;
2. Recolectar el material que pasa por una criba de 40 mesh y que es retenido en una criba de 20 mesh;
3. Pesar ± 1.0 g del carbón de muestra en la balanza con precisión de 0.01 % (Pi);
4. Colocar el material en una cápsula de porcelana seca y tarada; llevarlo todo a la estufa previamente calentada a 103 ± 2 °C, calentar por un periodo de 2 horas;
5. Retirar la muestra de la estufa y enfriar en el desecador y pesar (P2)

6. El contenido de humedad en el carbón vegetal en base seca es calculado de acuerdo con la siguiente fórmula:

Dónde:

$$U = \frac{P_i - P_f}{P_f} \times 100 \quad (A.2)$$

U: Contenido de humedad en base seca, en %;
Pi: Peso de la muestra de carbón húmedo, en g;
Pf: Peso de la muestra de carbón seco, en g;

OBS: la determinación del contenido de humedad se hace dos veces y los resultados no deben diferir en valores relativos más del 5 %.

Contenido de materiales volátiles

Para la determinación del contenido de materiales volátiles del carbón vegetal, se adoptaron los siguientes pasos:

1. Tomar una porción del carbón muestreado y preparado para la determinación del contenido de humedad;
2. Secar el material en estufa;
3. Pesar 1.0 g del material seco;
4. Colocar el material en una cápsula de porcelana o platina con tapa previamente secado y tarado.
5. Calentar previamente la mufla a 950 ± 10 °C y colocar la cápsula con el material, tapado sobre la puerta de la mufla calentada durante 3 minutos y medio;
6. Colocar la cápsula en el interior de la mufla y sellar la puerta, dejándola por 11 minutos;
7. Retirar la muestra de la mufla, enfriar en el desecador y pesar.
8. El contenido de materiales volátiles en el carbón vegetal es calculado de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$MV = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (A.3)$$

Dónde:

MV: Contenido de materiales volátiles del carbón vegetal, en %;

P1: Masa inicial de la capsula + muestra, en g;

P2: Masa final de la capsula + muestra, en g.

OBS: la determinación del contenido de materiales volátiles del carbón se hace dos veces y los resultados no deben diferir en valores relativos más del 2 %.

Contenido de cenizas

Para la determinación del contenido de cenizas en el carbón; se adoptaron los siguientes pasos:

1. Pesar 1.0 g de carbón, previamente muestreado siguiendo la norma NBR 6923 da ABNT, de humedad y de granulometría inferior a 0.210 mm y superior a 0.150 mm, correspondiendo al material que pasa en una criba de 40 mesh y se retiene en una de 60 mesh;
2. Colocar la muestra en una capsula de platina sin la tapa, previamente seco y tarado;
3. Calentar la mufla a 600 ± 10 °C y colocar la cápsula con la muestra dentro de la mufla con la puerta sellada y dejar por un periodo de 6 horas hasta calcinación completa;
4. Retirar la muestra de mufla, enfriar en desecador por una hora, aproximadamente y pesar.
5. Contenido de cenizas del carbón vegetal es obtenido por la fórmula:

$$CZ = \frac{Pr}{P} \times 100 \quad (A.4)$$

Dónde:

CZ: Contenido de cenizas en carbón, en %

Pr: Masa de residuo, en g

P: Masa de la muestra seca, en g

OBS: la determinación del contenido de cenizas del carbón se hace dos veces y los resultados no deben diferir en valores relativos más del 10 %.

Contenido de carbono fijo

El contenido de carbono fijo es una medida indirecta y puede ser calculado a través de la siguiente fórmula:

$$CF = 100 - (MV + CZ) \quad (A.5)$$

Dónde:

CF: Contenido de carbono fijo, en %

CZ: Contenido de cenizas, en %

MV: Contenido de materiales volátiles, en %

A.4. Determinación del poder calorífico (método de bomba calorimétrica)

Consideraciones

El poder calorífico de un cuerpo es la cantidad de calor liberado por la combustión completa, y la humedad de la masa de ese cuerpo, expresado en calorías/gramo, o Kcal/Kg, para combustible sólidos y líquidos y en Kcal/m³ para gases.

El poder calorífico superior (PCS), es así llamado cuando el agua formada durante la combustión se condensa (recuperación del calor latente de condensación), o sea que deja el calor necesario para evaporar el agua formada durante la combustión del hidrogeno y la humedad del carbón. Estas condiciones corresponden a aquellas obtenidas a través de la bomba calorimétrica en donde el combustible se procesa en ambiente sellado, sometido a presión y en presencia de oxígeno.

El poder calorífico inferior (PCI), es así llamado cuando la combustión es efectuada a presión constante, esto es al aire libre; en ese caso, el agua de combustión no se condensa y es una situación que ocurre con la quema directa de la madera.

En la práctica el poder calorífico inferior retrata mejor el comportamiento del combustible, pues, en la mayoría de los procesos, los gases de la combustión son emanados con temperatura encima de la temperatura de ebullición del agua, cargando consigo una cantidad de energía correspondiente al calor latente de vaporización. Por eso la diferencia entre el poder calorífico superior e inferior es el calor necesario para evaporar el agua; cuando no se forma agua en la combustión y si el combustible no posee humedad el poder calorífico inferior es igual al poder calorífico superior.

La determinación teórica del poder calorífico inferior implica el conocimiento de la composición elemental del combustible. Debido a la dificultad práctica de los procedimientos para determinar la composición química elemental del carbón vegetal, esta forma de cálculo es de poca utilidad.

La determinación teórica del poder calorífico superior del carbón es de gran importancia cuando se piensa en su utilización como fuente de energía.

Materiales

La determinación del poder calorífico superior del carbón, leña u otro material es obtenido experimentalmente a través de la bomba calorimétrica adiabática, basada en el principio de Berthelot, en donde la combustión se procesa en un ambiente sellado en presencia de oxígeno y a presión. En ese caso el poder calorífico es calculado de las diferencias de temperatura antes y después de la combustión.

La bomba calorimétrica consta de las siguientes partes:

- Bomba de oxígeno, donde ocurre la combustión;
- Calorímetro, estructura donde son colocados la bomba de oxígeno, los termómetros la cápsula y otros accesorios;
- Cápsula, depósito de agua con agitador para homogenizar la temperatura del agua para ser procesada a operación adiabática, también llamada chaqueta.
- Dos termómetros para tomar la temperatura en el calorímetro y la cápsula, ambos con división de 0.01 °C;
- Cápsula de platina, cuarzo o de aleación metálica.
- Hilo de ignición, hilo de aleación de níquel-cromo, usándose 15 cm de largo para cada operación;

Reactivos

- Agua destilada
- Oxígeno fabricado de aire licuado, libre de material combustible;
- Solución patrón de carbonato de sodio;
- Ácido benzoico;
- Indicadores: anaranjado de metilo, rojo de metilo y púrpura de metilo.

Procedimiento

Para la determinación del poder calorífico superior, utilizándose una bomba calorimétrica, se adoptaron los siguientes pasos: Norma ASTM D-2015-66:

1. Calibrar el calorímetro. Determinándose la energía equivalente, a través del ácido benzoico (C_6H_5COOH) es posible determinar el poder calorífico exigido para elevar la temperatura del calorímetro 1 °C por gramo de muestra, para la calibración son necesarias numerosas repeticiones;
2. Pesar una muestra (normalmente 1 gramo de madera y 0.5 gramos para carbón, ambas materias primas deben estar absolutamente secas, pasadas por mallas 40/60 U.S. Tyler y la balanza utilizada debe tener una precisión de 0.1 g)
3. Colocar la muestra en la cápsula;
4. Colocar 1.0 ml de agua en la bomba a través de una pipeta;
5. Conectar el hilo de ignición con 15 cm de largo, en los terminales de ignición dejándolo medio flojo, permitiendo contacto con la atmósfera;

6. Cerrar bien la bomba y colocar de 20 a 30 atm de oxígeno; por precaución utilizarse 25 atm. Si la cantidad de oxígeno introducido en la bomba excede la presión especificada, no se debe proceder con la combustión y se debe descartar la muestra;
7. Usar 2,000 ml de agua en el calorímetro, con temperatura de 1.0 a 1.4 °C abajo de la temperatura ambiente;
8. Transferir la bomba para el calorímetro, verificar el sello y conectar los circuitos (dos);
9. Colocar los agitadores, termómetros y la tapa en posición;
10. Encender el dispositivo que acciona los agitadores y dejarlos en funcionamiento durante cinco minutos a fin de homogenizar la temperatura del agua;
11. Ajustar la temperatura del agua de la cápsula y compararla con la temperatura del agua del calorímetro dentro de una variación de +/- 0.01 °C manteniéndola por 3 minutos;
12. Registrar la temperatura inicial, obedeciendo a la menor división del termómetro (1 décimo);
13. Accionar el dispositivo para la quema de la muestra;
14. Ajustar la temperatura de la cápsula comparándola con la temperatura del agua del calorímetro durante el aumento de la temperatura, manteniendo las dos temperaturas tan próximas cuanto sea posible, ajustándolas para una diferencia de 0.01 °C;
15. Fijar 1 o 2 lecturas en pequeños intervalos y cuando lleguen a la misma temperatura obedeciendo a la menor división del termómetro (1 décimo) fijar la lectura final;
16. Retirar la bomba y liberar la presión, removiendo manualmente la rosca de presión dentro de 1 minuto;
17. Abrir la bomba y verificar si la muestra fue totalmente quemada y si hay presencia de hollín, en cualquiera de las situaciones ; descartar la prueba;
18. Remover y medir los pedazos de hilo no quemado y restarlos del largo original;
19. Lavar la bomba con agua destilada conteniendo los indicadores de valoración (anaranjado de metilo o púrpura de metilo) y con una solución estándar de carbonato de sodio.

OBS: la solución patrón de carbonato de sodio es preparado siguiendo los pasos: disolver 3.4 g de carbonato de sodio anhidro (Na_2CO_3) en 1 lt de agua, secando previamente el Na_2CO_3 en una estufa a 105 °C por 24 horas. La solución de carbonato de sodio a 0.0725 N es recomendada para esta valoración a fin de simplificar los cálculos.

20. La fórmula final para el cálculo del poder calorífico es:

$$P_{cs} = \frac{C \times Dt - (C1 + C2)}{m} \quad (A.6)$$

Dónde:

Pcs: Poder calorífico superior, en cal/g o Kcal/Kg

C: Constante del calorímetro = 2461.98, obtenido a través de numerosas pruebas para calibración.

Dt: Diferencia de lecturas de los termómetros (antes y después de quema, temperatura final-temperatura inicial)

C1: Corrección en calorías para cada centímetro de hilo quemado = 2.3 cal/cm.

Datos medios de laboratorio indican que generalmente todo el hilo quemado genera cerca de 20 cal.

C2: Corrección para calorías para valoración en ácido nítrico, en ml. Datos medios de laboratorio indican 3 ml para carbón y 2ml para madera.

M: Masa inicial, en g.

Ejemplo

Como ejemplo, se tienen los siguientes datos:

Masa de madera seca=1.0 g

Temperatura inicial=27.52 °C

Temperatura final=29.40 °C

Dt=29.40-27.52=1.88 °C

Largo del hilo quemado=9.34 cm

Cal=9.34*2.3=21.50 cal

Volumen de solución para titulación (HNO₃)=6.0ml

Mediante la ecuación A.6 se encuentra el Poder Calorífico Superior:

$$PCS = \frac{2461,98 \times 1,88 - (21,50 + 6,0)}{1,0} = 4601,02 \text{ cal/g}$$

A.5. Certificado de plantación forestal.



Gobierno de Reconciliación
y Unidad Nacional
El Pueblo, Presidente!

2009: AÑO 30 DE
LA REVOLUCIÓN

Una Nicaragua Libre!

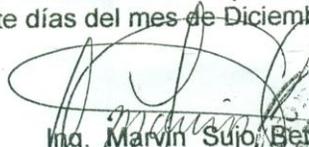
Oficina del Registro Nacional Forestal, a las Nueve de la mañana del día 17 de Diciembre del año Dos mil Nueve de parte interesada emite la presente:

CERTIFICACIÓN DE INSCRIPCIÓN DE PLANTACIÓN FORESTAL

Según **Inscripción Número Quinientos Veintitrés**, Reverso del folio 84 del Libro II, Tomo II de Plantaciones Forestales, hace constar que los Sres: **Gustavo Adolfo Mayorga Vargas, Carlos Manuel Mayorga Ruíz, José del Carmen Mayorga Díaz, Alejandro Fidel Vargas Sandoval, Jacobo Esteban García Dolmuz, Víctor Manuel Pozo Rizo y Roberto Andrés Pozo Toruño**, han registrado una Plantación Forestal, la cual textualmente dice:

El Suscrito Director de la Oficina de Registro Nacional Forestal, de conformidad con el Arto. Número 8. Inciso b) de la Ley de Conservación, Fomento y Desarrollo Sostenible del Sector Forestal (Ley 462) y a los Artos. Números 18, 19 y 58, de su Reglamento, (Decreto 73-2003); inscribe a nombre de los Sres: **Gustavo Adolfo Mayorga Vargas, Carlos Manuel Mayorga Ruíz, José del Carmen Mayorga Díaz, Alejandro Fidel Vargas Sandoval, Jacobo Esteban García Dolmuz, Víctor Manuel Pozo Rizo y Roberto Andrés Pozo Toruño**, según rola en el expediente No. 0305-09-0549 **SeSENTA y Cuatro hectáreas con Cuarenta y Tres Centésimas (64.43 Ha)** de plantación forestal de las especies de: Eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*), Neem (*Azadirachta indica*) y Guanacaste Blanco (*Albizia caribaea*) con el objetivo de madera industrial, Energética y Carbón con una población de **1,190.17** plantas/ha para un equivalente total de **76,683** plantas. Esta plantación fue establecida en los años 1,988 y 1,999 en la Finca conocida como: **La Joya** ubicada en la Comarca: **Los Zanjones** en el Municipio de **Posoltega**, Departamento de **Chinandega**. La que se encuentra inscrita con el Nro. 34,647, Asiento 1º, Folios 114 y 115 del Tomo 173 del Registro de la Propiedad del Departamento de Chinandega.

Se extiende la presente Certificación de Inscripción de Plantación Forestal en la Ciudad de Managua a los Diecisiete días del mes de Diciembre del año Dos mil Nueve. Firma.


Ing. Marvin Sujo Betancor
Director
Oficina del Registro Nacional Forestal



Cc: Archivo


**PODER
CIUDADANO**
*Nicaragua
Gana con Vos!*

INSTITUTO NACIONAL FORESTAL
Km. 12 ½ Carretera Norte. Contiguo al MARENA
Telf. 2332510 - 2332512
E-Mail: _____
Página Web: www.inafor.gob.ni