

D. L.

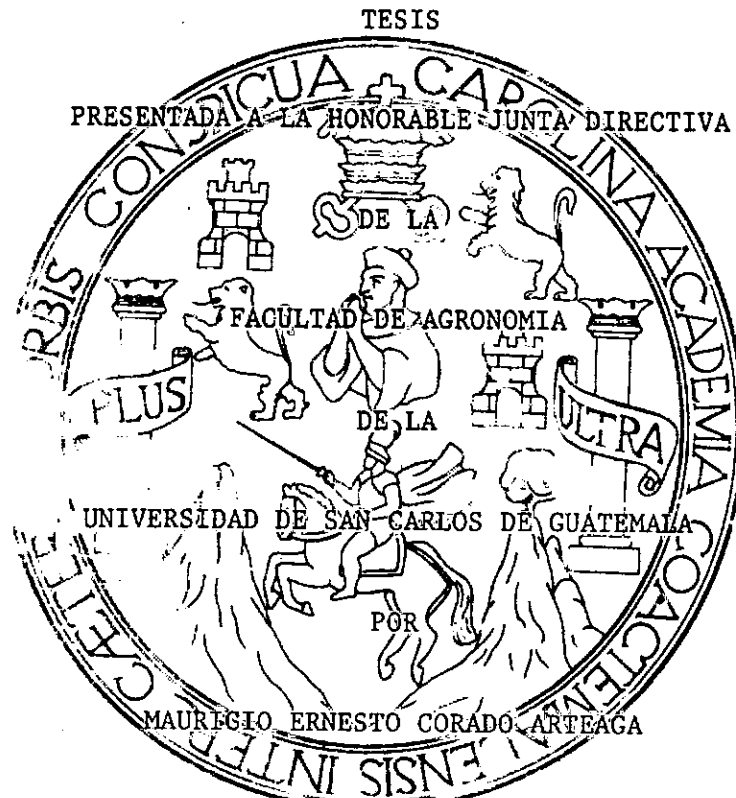
01

T(536)

C. 3

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMIA

DETERMINACION DE LA CALIDAD GRAVIMETRICA DE CARBON VEGETAL,
PRODUCIDO A PARTIR DE DIFERENTES ESPECIES FORESTALES
Y EN DIFERENTES TIPOS DE HORNOS.



AL CONFERIRSELE EL TITULO DE

INGENIERO AGRONOMO

EN EL GRADO ACADEMICO DE

LICENCIADO EN CIENCIAS AGRICOLAS

Guatemala, Noviembre de 1984

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

RECTOR

DR. EDUARDO MEYER MALDONADO

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA

DECANO	Ing. Agr. César A. Castañeda S.
VOCAL I	Ing. Agr. Oscar R. Leiva R.
VOCAL II	Ing. Agr. Gustavo A. Méndez
VOCAL III	Ing. Agr. Rolando Lara A.
VOCAL IV	Prof. Héber Arana
VOCAL V	Prof. Leonel A. Gómez
SECRETARIO	Ing. Agr. Rodolfo Albizúrez

TRIBUNAL QUE REALIZO EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Agr. César A. Castañeda S.
EXAMINADOR	Ing. Agr. Héber Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Agr. Edíl Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Agr. Fredy Hernández
SECRETARIO	Ing. Agr. Rodolfo Albizúrez



12 CALLE 1-25, ZONA 10 • EDIFICIO GEMINIS • OFICINA 1510 • TELS.: 312586 - 311540 - 311254 • GUATEMALA, C. A.

Guatemala, Octubre de 1984

Ingeniero Agrónomo
César A. Castañeda Salguero
Decano de la Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala
SU DESPACHO

Señor Decano:

Por este medio me dirijo a usted para informarle, que he concluído el asesoramiento y revisión del documento final del trabajo de tesis titulado "DETERMINACION DE LA CALIDAD GRAVIMETRICA DE CARBON VEGETAL, PRODUCIDO A PARTIR DE DIFERENTES ESPECIES FORESTALES Y EN DIFERENTES TIPOS DE HORNOS" del estudiante Mauricio Ernesto Corado Arteaga.

Considero que dicho trabajo constituye una valiosa información sobre tipo y calidad de carbón vegetal, como un recurso energético renovable.

Atentamente,

Dr. Luis Antonio Carrillo
ASESOR

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE AGRONOMIA

Ciudad Universitaria, Zona 12.

Apartado Postal No. 1545

GUATEMALA, CENTRO AMERICA

Referencia
Asunto
.....

2 de noviembre de 1984

Ingeniero
César A. Castañeda S.
Decano Facultad de Agronomía
Presente

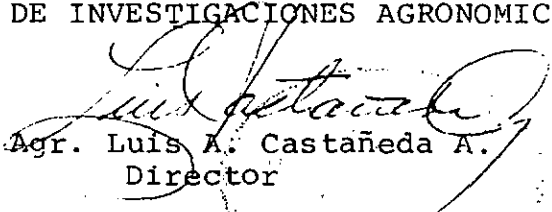
Señor Decano:

Por este medio informo a usted que he revisado la tesis del estudiante MAURICIO ERNESTO CORADO ARTEAGA, con carnet número 79-10069 titulada "Determinación de la calidad gravimétrica de carbón vegetal, producido a partir de diferentes especies forestales y en diferentes tipos de hornos", la cual llena todos los requisitos estipulados por las normas para la planificación, ejecución y presentación de la investigación de tesis de grado en la Facultad de Agronomía.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONOMICAS


Ing. Agr. Luis A. Castañeda A.
Director

LACA/tdev.

Guatemala, Noviembre 5, 1984

HONORABLE JUNTA DIRECTIVA
HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Señores Miembros:

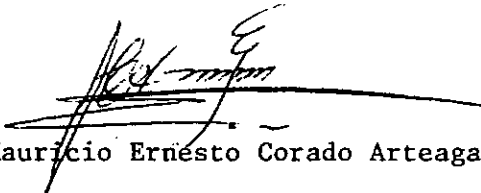
De conformidad con las normas establecidas por la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración el trabajo de tesis titulado:

DETERMINACION DE LA CALIDAD GRAVIMETRICA DE CARBON VEGETAL,
PRODUCIDO A PARTIR DE DIFERENTES ESPECIES FORESTALES
Y EN DIFERENTES TIPOS DE HORNOS.

Como requisito previo para optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo, en el grado académico de Licenciado en Ciencias Agrícolas.

Esperando sea aceptado, me suscribo de ustedes.

Respetuosamente,



Mauricio Ernesto Corado Arteaga

ACTO QUE DEDICO

A DIOS

A MIS PADRES

Julia Arteaga Enriquez
Julio Ernesto Corado Escobar

A MIS HERMANOS

Oscar Eduardo, José Manuel,
Gladys Amarilis, María Eugenia,
Blanca Lilian, Olga Cristina,
Elia Haydée, Julio Roberto,
Carlos Noé y Luis René.

A MIS SOBRINOS EN GENERAL

A MIS CUÑADOS Y CUÑADAS

A MIS FAMILIARES EN GENERAL

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS DE PROMOCION

A MIS AMIGOS EN GENERAL

TESIS QUE DEDICO

A GUATEMALA

A LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

A LA FACULTAD DE AGRONOMIA

A EL INSTITUTO NACIONAL CENTRAL PARA VARONES

AGRADECIMIENTO

AL DOCTOR LUIS ANTONIO CARRILLO, asesor del presente trabajo,
por sus observaciones y orientación científica del mismo.

AL LICENCIADO OSCAR COBAR, por su valiosa colaboración y orientación en los análisis de laboratorio.

A LA EMPRESA SELVAGRO, S.A., por permitirme la utilización de los Hornos Tecnificados para el desarrollo de este trabajo.

A TODAS AQUELLAS PERSONAS, que de una u otra manera me ayudaron a la realización del presente trabajo.

INDICE DE CONTENIDO

Pag.

INDICE DE CUADROS

INDICE DE FIGURAS

RESUMEN

I.	INTRODUCCION	
II.	IMPOTANCIA -----	2
III.	OBJETIVOS -----	3
IV.	HIPOTESIS -----	3
V.	REVISION DE LITERATURA	
	A. Historia del Carbón Vegetal -----	4
	B. Madera como Fuente de Energía -----	4
	C. Fuentes Secundarias de Energía Obtenidas de la Madera	
	a) Pirólisis -----	5
	b) Gasificación -----	6
	c) Hidrólisis -----	6
	D. Composición de la Madera -----	6
	E. Carbonización de la Madera y de sus componentes	
	1- Teoría de Carbonización -----	8
	2- Cinética de la Carbonización -----	9
	3- Fases de la Carbonización	
	a) Gaseosa -----	12
	b) Acuosa o Piroleñosa -----	12
	c) Aceitosa -----	12
	d) Sólida -----	12
	4- Carbonización de sus Componentes	
	a) Carbonización de la Celulosa -----	13
	b) Carbonización de la Hemicelulosa -----	13
	c) Carbonización de la Lignina -----	14
	5- Aspectos Técnicos de la Carbonización	
	a) Influencia de la Temperatura sobre los Rendimientos de los Productos de la Carbonización -----	14
	b) Influencia de la Velocidad de Calentamiento -----	15
	c) Influencia de la Presión -----	15
	F. Características y Propiedades del Carbón Vegetal	
	1- Reactividad -----	15
	2- Composición Química -----	16
	a) Humedad -----	16
	b) Materias Volátiles -----	17
	c) Cenizas -----	17
	d) Carbono Fijo -----	17

INDICE DE CONTENIDO

	Pag.
3- Fragilidad -----	17
a) Prueba de Fragilidad -----	18
b) Factores que influyen en la Fragilidad del Carbón	
i. Humedad de la Madera -----	19
ii. Temperatura de Carbonización -----	19
iii. Diámetro y Largo de la Madera -----	19
iv. Densidad y Porosidad del carbón -----	19
4- Resistencia Mecánica -----	20
5- Absorción de Humedad -----	20
6- Poder Calorífico -----	21
G. Calidad del Carbón Vegetal -----	21
1) Efecto de la Especie y Forma de la Madera Sobre la Calidad del Carbón -----	22
2) Efecto del Tamaño y Tipo de Horno Sobre la Calidad del Carbón -----	22
3) Efecto del Tiempo y Temperatura de Carbonización Sobre la Calidad del Carbón -----	23
H. Hornos Usados en la Fabricación de Carbón Vegetal.	
1- Horno Media Naranja -----	23
2- Horno de Albañilería con Cámara Externa -----	24
3- Horno de Metal	
a. Descripción del Horno -----	27
b. Selección del Terreno -----	27
c. Ensamble y carga del Horno -----	27
d. Operación -----	29
e. Ventajas de los Hornos de Metal -----	29
f. Componentes del Horno de Metal -----	30
4- Hornos de Tierra -----	30
a. Horno Horizontal -----	31
b. Horno Vertical -----	31
c. Pila de Madera Horizontal en Fosa de Tierra -----	34
d. Pila Vertical de Madera en Fosa de Tierra -----	34
I. Usos del Carbón Vegetal	
1- Doméstico -----	37
2- Industrial -----	37
3- Metalúrgicos -----	37
4- Químico -----	37
5- Otras Aplicaciones Importantes -----	38

INDICE DE CONTENIDO

Pag.

J. Descripción de las Especies en Estudio.

1) Pino blanco (<u>Pinus pseudostrabus</u> L)	
a) Ecología -----	38
b) Usos -----	38
2) Encino Colorado o Negro (<u>Quercus sapotaefolia</u> Liemb) y Encino blanco (<u>Quercus peduncularis</u> Née.)	
a) Ecología -----	39
b) Usos -----	39
3) Eucalipto (<u>Eucaliptus citriodora</u> Hook. Mitch.)	
a) Ecología -----	39
b) Usos -----	39
4) Mangle Colorado (<u>Rhizophora mangle</u> L.)	
a) Ecología -----	40
b) Usos -----	40

VI. MATERIALES Y METODOS.

A. Descripción del Area Experimental.

1- Chimaltenango -----	41
2- Progreso -----	41
3- Izabal -----	41

B. Tratamientos.

1) Tipos de Hornos -----	41
2) Especies Forestales -----	41
a) Recolección de Muestras -----	42
b) Preparación de Muestras -----	42
c) Carbonización de Muestras -----	42
3) Diámetro de la Madera para Carbonización	
a) Preparación de las Muestras -----	42
b) Carbonización de Muestras -----	42

C. Análisis de Laboratorio -----42

D. Variables a Medir -----43

E. Análisis Estadístico -----43

VII RESULTADOS -----	44
VIII DISCUSION DE RESULTADOS -----	68
XIX CONCLUSIONES -----	70
X RECOMENDACIONES -----	72
XI BIBLIOGRAFIA -----	73
XII APENDICE -----	75

INDICE DE CUADROS

	Pag.
1 Composición química y proporción de los componentes principales de la madera en valores promedio -----	7
2 Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de encino colorado, producido en 4 tipos de hornos -----	45
3 Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de pino blanco, producido en dos tipos de hornos -----	48
4 Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de eucalipto, producido en dos tipos de hornos -----	51
5 Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de mangle colorado, producido en dos tipos de hornos -----	53
6 Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de cuatro especies, producido en horno de metal -----	55
7 Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de cuatro especies forestales, producido en el horno media naranja -----	58
8 Valores promedio del análisis gravimétrico de la mezcla del carbón de las cuatro especies forestales, producido en horno de metal y de media naranja -----	61
9 Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de encino colorado, producido en horno de metal, variando el diámetro de la madera para carbonizar -----	63
10 Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de encino blanco, producido en horno de metal, variando el diámetro de la madera para carbonizar -----	66

APENDICE

11 Análisis de varianza del contenido de carbono fijo (%) del carbón de encino colorado, producido en cuatro tipos de hornos, con base al diseño completamente al azar---	76
---	----

11a.	ANDEVA -----	76
11b.	Comparación múltiple de medias "TUKEY" -----	76
12	Análisis de varianza del contenido de carbono fijo (%) del carbón de las cuatro especies analizadas y producido en horno de metal y de ladrillo media naranja. Diseño estadístico factorial 2 X 4, completamente al azar -----	77
12a.	Cuadro Adicional -----	77
12b.	ANDEVA -----	77
12c.	Comparación múltiple de media TUKEY -----	78
13	Análisis de regresión lineal del contenido de carbono fijo (%) del carbón de encino colorado, en función del diámetro de la madera -----	78
13a.	ANDEVA -----	78
14	Análisis de regresión lineal del contenido de carbono fijo (%) del carbón de encino blanco, en función del diámetro de la madera -----	79
14a.	ANDEVA -----	79
	ANALISIS QUIMICO INMEDIATO -----	80

INDICE DE FIGURAS

		Pag.
1	Modelo de carbonización de Kanury y Blackshear -----	11
2	Aspecto general de un horno de ladrillo tipo media naranja -----	25
3	Aspecto general de un horno de albañilería con cámara externa -----	26
4	Aspecto general de un horno de metal en funcio- namiento -----	28
5	Esquema de la sección transversal del horno de tierra horizontal -----	32
6	Esquema de la sección transversal del horno de tierra vertical -----	33
7	Esquema de la sección transversal de la pila de madera horizontal en fosa de tierra -----	35
8	Esquema de la sección transversal de la pila de madera vertical en fosa de tierra -----	36
9	Comparación de los componentes del análisis quí- mico inmediato del carbón de encino colorado, producido en los siguientes hornos: Tierra (A), metal (B), ladrillo con cámara externa (C) y ladrillo media naranja (D) -----	46
10	Comparación del poder calorífico del carbón de encino colorado, producido en los siguientes hornos: Tierra (A), metal (B), ladrillo con cámara externa (C) y ladrillo media naranja (D) -----	47
11	Comparación de los componentes del análisis químico inmediato del carbón de pino blanco, producido en los siguientes hornos: Metal (A) y Ladrillo media naranja (B) -----	49
12	Comparación de los componentes del análisis químico inmediato del carbón de eucalipto, pro- ducido en los siguientes hornos: Metal (A) y Ladrillo media naranja (B) -----	52
13	Comparación de los componentes del análisis químico inmediato del carbón de mangle colorado producido en los dos tipos de hornos: metal (A) y ladrillo media naranja (B) -----	54

14	Comparación de los componentes del análisis químico inmediato del carbón de: Pino blanco (A), encino colorado (B), eucalipto (C) y mangle colorado (D), producido en horno de metal -----	57
15	Comparación de los componentes del análisis químico inmediato del carbón de: Pino blanco (A), encino colorado (B), eucalipto (C) y mangle colorado (D), producido en horno media naranja -----	59
16	Comparación del poder calorífico del carbón de cuatro especies forestales, producido en los tipos de hornos -----	60
17	Comparación de los componentes del análisis químico inmediato, de la mezcla de carbón 4 especies analizadas, producido en dos tipos de hornos -----	62
18	Comparación del poder calorífico superior de la mezcla de carbón de pino blanco, encino colorado, eucalipto y mangle, producido en horno de metal y de ladrillo media naranja -----	64
19a	Variación del porcentaje de carbono fijo del carbón de encino colorado, en función del diámetro de la madera -----	65
19b	Variación del porcentaje de materias volátiles del carbón de encino colorado, en función del diámetro de la madera -----	65
20a	Variación del porcentaje de carbono fijo del carbón de encino blanco, en función del diámetro de la madera -----	67
20b	Variación del porcentaje de materias volátiles del carbón de encino blanco, en función del diámetro de la madera -----	67

RESUMEN

Con el agotamiento de los combustibles de origen fósil, se hace necesario buscar fuentes energéticas renovables, entre las cuales se encuentra el carbón vegetal. Para Guatemala, el carbón vegetal constituye una alternativa energética de costos relativamente bajos.

El objetivo de esta investigación fué determinar la calidad gravimétrica del carbón vegetal, producido a partir de diferentes especies forestales y utilizando distintos tipos de hornos. Además determinar, la influencia del diámetro de la madera preparada para carbonizar, sobre la calidad gravimétrica del carbón obtenido.

En el presente estudio fueron utilizadas cinco especies forestales y cuatro tipos de hornos. Las especies forestales fueron: pino blanco (Pinus pseudostrobus), encino blanco (Quercus peduncularis), encino colorado (Quercus sapotaefolia), eucalipto (Eucalyptus citriodora) y mangle colorado (Rhizophora mangle). Y los tipos de hornos: De metal, de tierra, de ladrillo con cámara externa y de ladrillo media naranja. Las muestras de encino colorado fueron carbonizadas en los cuatro tipos de hornos mencionados, mientras que las muestras de pino, eucalipto y mangle, solamente se carbonizaron en los hornos de metal y de ladrillo media naranja.

Además se carbonizaron muestras de madera de diferentes diámetros, tanto de encino blanco, como de encino colorado en el horno de metal. Las muestras de carbón obtenido, de cada especie y cada horno, se analizaron gravimétricamente con el propósito de determinarles los siguientes componentes: Porcentaje de Humedad, Porcentaje de materias volátiles, Porcentaje de cenizas y Porcentaje de carbono fijo. Se analizó estadísticamente el porcentaje de carbono fijo de todas las muestras de carbón, para establecer diferencias significativas entre ellas y determinar de qué especie y en que tipo de horno se produce carbón con mayor contenido de carbono fijo y por ende de mejor calidad gravimétrica.

Con base en los resultados obtenidos se concluyó que la calidad gravimétrica del carbón depende de: Las características de la especie, del tipo de horno utilizado y del manejo de dicho horno.

El tipo de horno en el cual se produjo carbón de mejor calidad gravimétrica, fué el de metal. Sin embargo, no es recomendable desde el punto de vista económico, por ser aproximadamente cuatro veces más cara su construcción que el horno de ladrillo, además este último, con su manejo adecuado produce carbón de buena calidad.

La especie forestal de mejor calidad gravimétrica fue el eucalipto con un promedio de 83.67% de carbono fijo, luego en su orden se ubican: El pino con 82.98%, el mangle colorado con 79.54% y el encino colorado con 75.89%, utilizando el horno de metal.

El diámetro de la madera preparada para carbonizar influye directamente sobre la calidad gravimétrica del carbón, ya que al variar el diámetro de la madera de 5 a 45 cms, el porcentaje de carbono fijo del carbón de encino colorado varió de 74.95 a 77% y en el encino blanco varió de 74.15 a 76.19%, por lo tanto, existe variación de la calidad gravimétrica.

I. INTRODUCCION

La creciente demanda de energía hace necesario buscar fuentes alternativas de aprovisionamiento, para reducir la dependencia de combustibles fósiles, cuyas existencias son limitadas. Mediante investigación se trata de optimizar el aprovechamiento de fuentes no convencionales y fuentes renovables de energía.

En esta investigación se pretende, profundizar en el aprovechamiento de la energía solar captada en la biomasa vegetal, accesible en forma de carbón vegetal. Este producto se obtiene mediante la carbonización de la madera, utilizando cualquiera de los tipos de hornos existentes.

Para Guatemala, el carbón vegetal constituye una alternativa como fuente de energía renovable de costos relativamente bajos. Aunque su uso en áreas urbanas ha disminuído, los artesanos, el sector doméstico y los industriales lo consumen en cantidades que hacen este mercado interesante. Además, existe un mercado potencial a nivel industrial considerable y susceptible a ser activado a corto plazo. Debe notarse también que la producción de carbón vegetal puede ser un factor decisivo en los programas de conservación y manejo de recursos forestales y generar ingresos para gran cantidad de población.

Mediante la carbonización de la madera no solo se aprovecha el residuo carbonizado, sino que también puede aprovecharse los vapores condensables y recuperar de ésta manera: alquitrán, ácido acético, alcoholes y otros, los cuales tienen un uso potencial energético renovable y de bajos costos.

II. IMPORTANCIA

El carbón vegetal constituye un 4% de la energía doméstica consumida en el país y un porcentaje no determinado del consumo de energía industrial. El mercado potencial del carbón vegetal, abarca todos los sectores que consumen Diesel, Bunker, Coque y otros combustibles de origen fósil, según lo establecido por Carrillo (2).

No existen, sin embargo, más que criterios subjetivos relacionados con las características físicas del producto para determinar su calidad. En términos de valor calórico y de otras propiedades físico-químicas no hay datos que permitan planificar la expansión del uso de este recurso energético renovable en procesos industriales que requieran su aplicación y permitan la substitución de combustibles fósiles no renovables e importados.

Se pretende mediante el análisis gravimétrico, cuantificar los parámetros de calidad del carbón producido en el ámbito nacional, posibilitar su clasificación estandarizada y aplicación en la industria.

III. OBJETIVOS

1- Generales:

Evaluar los parámetros o indicadores que sirvan de base para emitir dictámenes sobre la calidad del carbón vegetal disponible en el país.

2- Específicos:

Determinar la calidad gravimétrica del carbón vegetal producido a partir de diferentes especies forestales y utilizando distintos tipos de hornos.

Determinar si el diámetro de la madera preparada para carbonizar, tiene influencia sobre la calidad gravimétrica del carbón obtenido.

IV. HIPOTESIS

- 1- Existen diferencias significativas, respecto a la calidad gravimétrica del carbón obtenido, de distintas especies forestales y producidos en diferentes tipos de hornos.
- 2- Existe una relación directa entre el diámetro de la madera preparada para carbonización y la calidad gravimétrica del carbón obtenido.

V. REVISION DE LITERATURA

A. Historia del Carbón Vegetal:

El carbón vegetal ha sido un importante combustible de uso doméstico durante muchos años independientemente del modo de producirlo. Su uso mayor ha sido en cocinas, en giras de recreo, sin darle ninguna importancia de fuente energética renovable que puede substituir a los combustibles de origen fósil, hasta que recientemente la crisis energética proveniente del agotamiento del petróleo, ha inducido al hombre a buscar nuevas fuentes de donde obtener su demanda energética, y el carbón vegetal constituye una importante fuente de energía renovable en algunos países (7).

El carbón vegetal, se produce mediante la quema de la madera, en condiciones controladas del consumo de oxígeno durante la combustión. Durante el proceso de carbonización de la madera, se puede recuperar subproductos útiles que tienen una aplicación energética tan importante como la del carbón vegetal (8).

En Brasil, el carbón vegetal se ha venido utilizando desde 1918 en la siderurgia, desde entonces se le ha considerado como una materia prima de segunda categoría, de bajo costo, obtenida por actividades secundarias del descombramiento forestal natural. Pero con la dependencia de las fuentes energéticas convencionales que se agotan, el carbón ha tomado la importancia debida tanto en éste país como en otros (3).

B. Madera como Fuente de Energía:

Resende (14), indica que el hombre desde tiempos remotos ha utilizado combustibles no renovables para sus fines. La civilización industrial obliga al ser humano a aumentar drásticamente el consumo de combustibles fósiles a tal punto que las reservas se agotarán en los próximos 50 a 100 años. Apenas una cantidad pequeña de energía solar recibida por la tierra cerca de $40 \times 10^{12} \text{W.}$, es absorbida por los vegetales, y se estima que la energía solar que incide sobre la tierra en un período de 7 días sería equivalente a la energía contenida en las reservas fósiles actualmente. De esta manera podemos observar la importancia que tiene la energía que se puede obtener de los vegetales.

Estudios realizados en Brasil por la Fundación CETEC, según la compilación de Resende Penedo (14), la leña, el bagazo de caña y el carbón vegetal constituye cerca del 30% de consumo energético nacional, pues la forma más común de energía fotosintética es obtenida de la madera y carbón, otra menos común son los líquidos y gases obtenidos de la destilación seca, hidrólisis ácida y gasificación de la madera.

Según la compilación hecha por Resende (14), la madera como combustible presenta las ventajas y desventajas siguientes:

Ventajas:

- Para los países en desarrollo es el combustible más barato, tanto por tonelada como por unidad de calor.
- Se usa para producirlo mano de obra no calificada, generando así fuentes de trabajo.
- Su almacenamiento es posible en espacio libre y abierto.
- Contiene bajo porcentaje de cenizas y de azufre.

Desventajas:

- Exige mano de obra, elevando los costos en países de salarios elevados.
- Necesita de planificación y organización intensiva y sobre dependencia de instituciones como el Departamento Forestal, La Policía, etc.
- El poder calorífico es inferior al de otros combustibles fósiles.

C. Fuentes Secundarias de Energía Obtenida de la Madera:

Según Resende Penedo (14), se encuentran los combustibles obtenidos en procesos de conversión de madera como pirólisis, gasificación e hidrólisis. Dicho autor hace las siguientes consideraciones para éstos procesos:

a) Pirólisis:

Es el proceso, por el cual la madera es quemada en un ambiente sellado con exclusión de aire. Gases, vapores de agua y de líquidos orgánicos son liberados y el alquitrán y principalmente el carbón son dejados como residuo.

Inicialmente hay pérdida de agua, por deshidratación de polisacáridos, en seguida el ácido acético, ácido fórmico y metanol. En este tipo de carbonización hay una gran pérdida de energía equivalente a 2.6×10^6 Kcal/ton. de madera seca, con un 30% del rendimiento en carbón (14).

En hornos con retorta, la pirólisis de la madera se desarrolla sin contacto directo con la fuente de calor, permitiendo así reciclar los gases y la condensación de volátiles, pudiéndose obtener los rendimientos siguientes:

Carbón	38%
Gases no condensables	20%
Alquitrán insoluble	7%
Alquitrán soluble	3%
Acido piroleñoso	33%

b) Gasificación:

La gasificación de la madera o de carbón en proceso de pirólisis se hace mediante el ingreso de cantidades controladas de aire o de mezcla de oxígeno y vapor de agua en proporción variada. Los gases utilizados son CO y N₂. Los gases producidos varían con el tipo de horno y de la mezcla de oxidante.

c) Hidrólisis:

Es el proceso que consiste en ataque con agua, en medio ácido, sobre los componentes celulósicos de la madera, los cuales son convertidos en azúcares. Después la separación de lignina insoluble, la solución de azúcares es sometida a fermentación con levadura para producir etanol y CO₂.

D. Composición de la Madera:

El comportamiento de la madera en la carbonización puede ser representado por la sumatoria de los comportamientos aislados de sus tres componentes que son: Celulosa, Hemiceulosa y Lignina. Sus efectos interactivos algunas veces pueden despreciarse y el estudio de cada uno representa una buena aproximación del fenómeno como un todo (6).

La madera está compuesta principalmente de carbono, hidrógeno y oxígeno. Existen también, el nitrógeno y las sales minerales, los cuales juntos no representan el 1% (6).

Según Resende Penedo (15), existe variación en las informaciones obtenidas por diversos autores en la proporcionalidad de los componentes de la madera, pero, en términos generales se consideran como promedio los valores que se representan a continuación en el cuadro 1.

Cuadro 1: Composición Química y Proporción de los Componentes Principales de la Madera en Valores Promedio.

Composición Química	Rango (%)	Componentes	Rango (%)
Carbono	40 - 50	Celulosa	30 - 50
Oxígeno	34 - 45		
Hidrógeno	4 - 7	Hemicelulosa	20 - 40
Nitrógeno y Cenizas	1		
Nitrógeno	0.1 - 0.5	Lignina	20 - 31
Cenizas	0.4 - 1.0		
Agua	20	Extractivos	1 - 8

Fuente: Curso de Carbón Vegetal para Centroamérica (6).

Según Carrillo (2), la composición básica de la madera con las siguientes proporciones:

Celulosa	50%
Lignina	20 - 30%
Hemicelulosa	20 - 30%
Proteína, Ceras, Pectina, Grasas, etc.	5%

Otros autores citados en la compilación de Resende Penedo (14), no consideran la cantidad mínima de Nitrógeno y otros elementos, además no mencionan la proporción de los componentes de bajo peso molecular encontrados en la cáscara, tales como: Terpenos, Oleos, Esencias, Resinas, Fenoles, Taninos, Grasa y Colorantes. Dando la siguiente proporción de la composición química y los componentes principalmente de la madera:

Carbono	50%	Celulosa	50%
Hidrógeno	6%	Hemicelulosa	20%
Oxígeno	44%	Lignina	30%

La composición elemental de la madera varía dentro de los siguientes aspectos: Especie vegetal, la edad de la madera, del tipo de terreno, etc. (6 y 14).

E. Carbonización de la Madera y de sus Componentes:

1- Teoría de Carbonización:

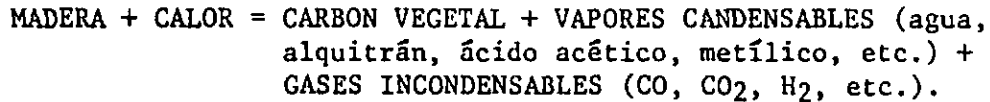
La carbonización de la madera consiste en la transformación en carbón por la acción del calor y en presencia de cantidades controladas de oxígeno. Durante el proceso se desprenden vapor de agua, líquidos orgánicos y gases no condensables, quedando como residuo sólido el Carbón (6).

Durante la carbonización, según Resende Penedo (14), todos los componentes de la madera son extensivamente modificados. La destilación seca de la madera se da en ausencia completa de oxígeno, en tanto que la pirólisis ocurre cuando se tiene una cantidad disponible de oxígeno suficiente para transformar toda la madera en vapores y gases, dejando como residuo apenas óxido de minerales denominados Cenizas. En procesos convencionales de carbonización, donde se controla el aire, siempre ocurre quema de una parte de la madera al ser carbonizada, el calor generado es responsable por la transformación del resto de la madera en carbón. La cantidad de aire que tiene que entrar al horno, se tiene que medir, para obtener carbón de buenas características sin que exista quema excesiva de la madera. Este control se hace con base al avance del frente de carbonización, lo cual indica la coloración del humo de la chimenea del horno. En los procesos de carbonización industrial no convencional, utilizan aparatos sofisticados para la recuperación de subproductos de la carbonización de la madera.

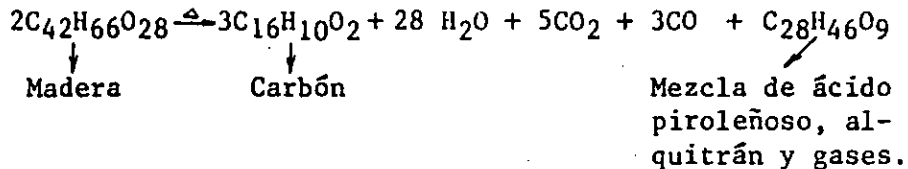
Resende Penedo (14), establece que las muchas reacciones químicas que ocurren con la carbonización, están relacionadas directamente con la temperatura; así tenemos que a temperaturas abajo de 100°C. hay pérdida de agua higroscópica, arriba de ese valor, hay pérdida de agua de constitución. Temperaturas encima de 200°C. se desprenden productos volátiles, tales como: Agua, Acido Acético, Metanol y Gases no Condensables como CO y CO₂. Al aumentar la temperatura, las reacciones que se llevan a cabo son aún más complejas, afectando también el rendimiento del carbón pasando de 51.4% a 300°C. hasta 26.5% a 1,000°C. También hay modificaciones físicas como: Aberturas y coaléscencia de poros, fisuración y disminución de la densidad relativa, modificaciones en tamaño y distribución de los poros.

Carrillo (2), establece que se involucran dos etapas en la transformación de la madera en carbón: La desecación y la carbonización. Al encender la leña, se genera calor secando así la madera, regulando la entrada de aire, se mantiene en promedio una temperatura del horno de 320°C. Si la madera no ha sido previamente secada, se requiere mayor temperatura, para eliminar el exceso de humedad, consumiendo más madera y por ende se bajan los rendimientos.

Resende Penedo (14), cita que la lignina, es el más estable de los componentes químicos de la madera y por lo tanto es el que predomina en el carbón al final del proceso de carbonización. En términos generales, la carbonización de la madera, se puede resumir en la ecuación siguiente:



En otra compilación, hecha por Resende Penedo (15), se establece, que aunque el trabajo de enumerar, identificar y formular todos los productos obtenidos, sería bastante exhaustivo pues se han identificado 213 diferentes compuestos, pero para referirnos en forma general a la carbonización de la madera a 400°C. por medio de fórmulas, se hace referencia a la ecuación elaborada por Klason y otros citados por Klar, en la compilación de Resende Penedo (15) es la siguiente:



En la ecuación anterior no se puede identificar la cantidad de alquitrán y de ácido piroleñoso, en su mezcla total. Dentro de esta ecuación, no se menciona la humedad, el contenido de cenizas y el de materias volátiles, pero tiene la ventaja de mostrar que el proceso de carbonización de la madera consiste básicamente, en concentrar el carbono y expulsar el oxígeno en el carbón.

El carbón vegetal consigue retener el 57% del carbono inicial contenido en la madera, el carbono restante se encuentra en los gases, el cual es perdido. Por otro lado, cerca del 89% del oxígeno de la madera es expulsado en gases y líquidos condensables, aumentando con esto su poder calorífico. Teóricamente, el rendimiento en carbón es de 34.5% conteniendo el 82.1% de carbono a temperatura de 400°C. (6).

2. Cinética de la Carbonización:

Según la compilación de Resende Penedo (15), al colocarse una pieza de madera bajo la acción del calor, habrá una destrucción gradual de sus componentes, en diferentes maneras sucesivas, formando compuestos simples. Entre el estado inicial (madera) y el final (carbón) ocurren una serie de trans-

formaciones relativamente complejas, que actualmente son objeto de curiosidad de los científicos e investigadores.

El modelo presentado por Kanury y Blackshear, ilustrado en la figura 1, fue desarrollado para explicar las diversas formas de transferencia de calor durante la carbonización. Al comprender el modelo, se tendrá un ida cualitativa de los fenómenos ocurridos. La temperatura de la madera aumenta con el tiempo de exposición al calor, dando origen a cinco diferentes etapas o períodos de carbonización (6).

El tiempo t_0 , es la temperatura ambiental sin sufrir cambios la madera. Al aumentar el calor, la temperatura superficial de la madera será mayor que la interna, existiendo una variante térmica de la superficie hacia el centro. Los períodos son los siguientes:

Período	I	:	$t_0 < t < t_1$
Período	II	:	$t_1 < t < t_2$
Período	III	:	$t_2 < t < t_3$
Período	IV	:	$t_3 < t < t_4$
Período	V	:	$t_4 < t < t_5$

Al aumentar el calor, en el tiempo t_1 , se inicia la descomposición de la madera, comenzando la interfase de "Frente de Pirólisis", localizada entre la madera y la zona o camada de pirólisis. A partir de t_1 se inicia el período II, modificándose la madera de la superficie hacia el interior, donde la madera está intacta, la zona de pirólisis avanza. En éste período predomina la madera sin transformaciones; los gases formados en la zona de pirólisis, llevan el calor al exterior opuesto a la transferencia de calor del medio externo. En el período III, se inicia la formación de carbón, existiendo así tres zonas distintas:

- Zona interna, que contiene la madera sin sufrir cambios
- Zona intermedia de pirólisis
- Zona o capa de carbón, de la que se eliminaron los volátiles.

En la zona de carbón, la transferencia de calor se da por convección, los gases pesados sufren descomposición y gases livianos salen al exterior produciéndose una reacción de combustión exotérmica con el oxígeno atmosférico. El período IV, desaparece la madera en estado natural, existiendo solo la capa de pirólisis y la capa de carbón; aquí predomina la capa de carbón. En el período V, el frente de carbonización alcanza el centro, y solo esta la capa de carbón y se cierra el proceso quedando el carbón vegetal.

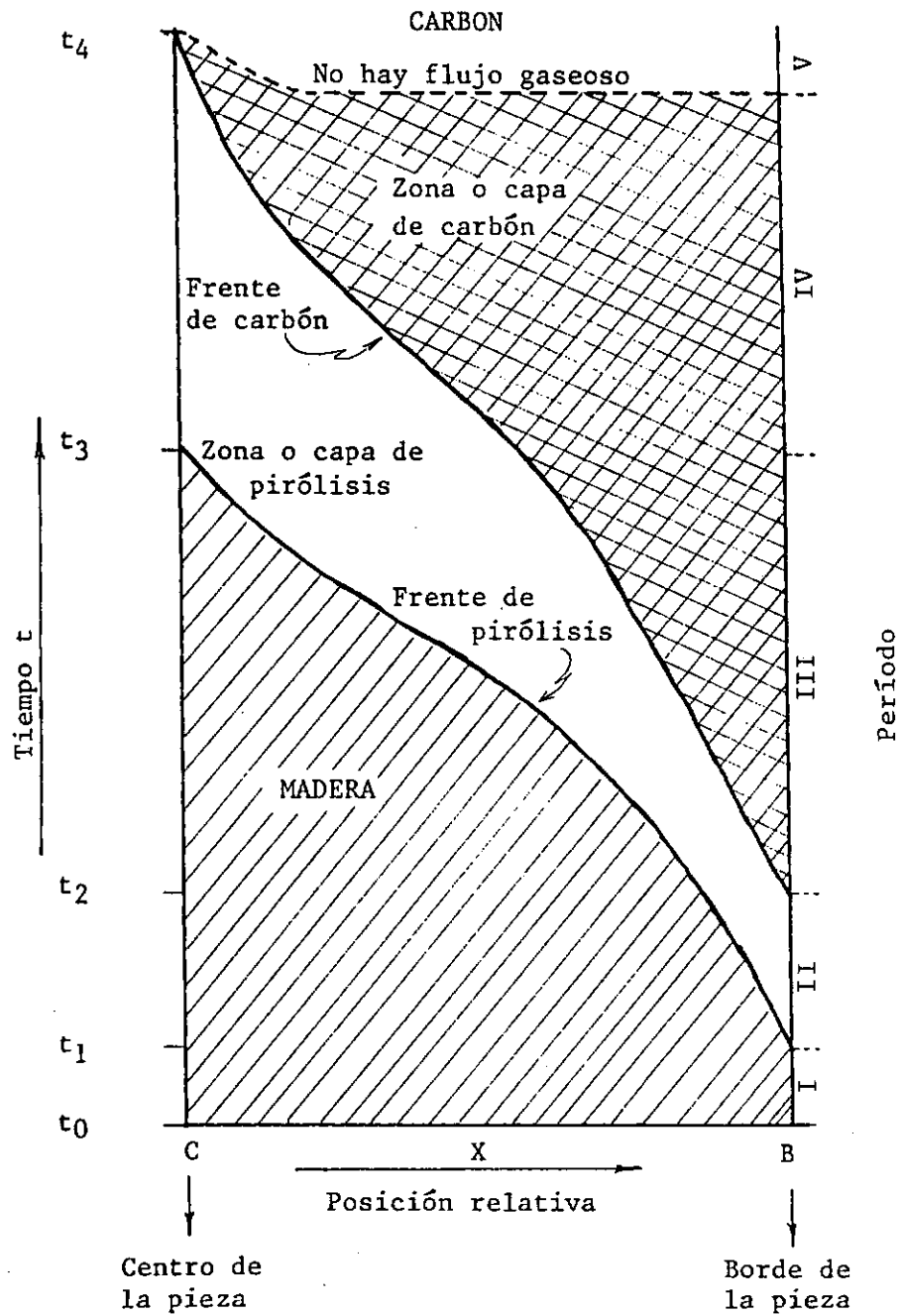


Figura 1. Modelo de carbonización de Kanury y Blackshear

Goldstein citado por Resende Penedo (15), dice que el tizón, es un material medio carbonizado, indeseable en la carbonización y que tiene su origen en detener el proceso en los períodos II al IV, además en el modelo se esclarece que siempre habrá necesidad de transferencia de calor a través de una capa de carbón ya formada que no necesita más calor, siendo posible que este fenómeno que contribuya al bajo rendimiento térmico y gravimétrico del proceso de carbonización en hornos de albañilería. La carbonización se efectúa mediante los procesos que involucran conjuntamente la temperatura y el tiempo.

Schaffer citado por Holmes, compilado por Resende Penedo (15), consiguió determinar la velocidad de formación de carbón, y determinó que la velocidad es constante e igual a 38 mm/Hora. La velocidad de carbonización será el resultado de la combinación de las variables temperatura y tiempo, y junto al tiempo de permanencia de los volátiles en la zona de reacción y del porcentaje de oxígeno libre en el ambiente, determinan la distribución y calidad de los productos formados.

3. Fases de la Carbonización:

Estas fases se establecen por Resende Penedo en su compilación (15).

- a) Gaseosa: Es una mezcla gaseosa, combustible conteniendo dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno, metano, etileno, etc., siendo más conocida por la denominación de gases no condensables.
- b) Acuosa o Piroleñosa: Es una solución acuosa de color castaño amarillento, contiene ácido acético, metanol, acetona y alquitrán B (soluble). Están disueltos en aproximadamente 80% de agua.
- c) Aceitosa: Consiste en una mezcla de color negro, densa y viscosa, con decenas de compuestos, que se presentan por una separación por decantación de la fracción acuosa. Es conocida como alquitrán A (insoluble).
- d) Sólida: Residuo sólido carbonoso remanente, el cual es el de mayor interés comercial.

Las etapas relacionadas con la temperatura de carbonización siempre establecidas en la compilación de Resende Penedo (15), son las siguientes:

- Abajo de 200°C. = secado y pérdida de agua de constitución.
- De 200 a 280°C. = reacción es endotérmica, liberando ácido acético, metanol, agua, dióxido de carbono, etc.
- De 280 a 500°C. = reacción exotérmica intensa, liberando gases combustibles, CO, CH₄, etc. y alquitranes.
- Encima de 500°C. = el carbón es en mayor parte carbono fijo y apenas pequeñas cantidades de volátiles (H₂O) son liberados.

La intensa generación de volátiles y de su tendencia a acumularse en el techo del horno, hace que la carbonización se desplace de arriba hacia abajo. A medida que cambie el color del humo, el frente de quema va descendiendo, reduciéndose simultáneamente la entrada de aire (6).

4. Carbonización de sus Componentes:

a) Carbonización de la Celulosa: Es el componente más fácil de aislar, produce sobre atmósfera de N₂ 34.2% de rendimiento de carbón a 300°C., al aumentar la temperatura a 600°C., este rendimiento disminuye a 5%. El empleo del vacío durante la carbonización disminuye el rendimiento de carbón, pero aumenta el de alquitrán. La degradación de la celulosa ocurre entre 325 y 375°C. (6).

b) Carbonización de la Hemicelulosa: Según Browne, citado por Beall y Eickner, referidos en (6) estableció, que la hemicelulosa es el componente responsable de la formación de ácido acético.

Domansky y Rendos, citados por los mismos autores, concluyeron que la hemicelulosa es el componente menos estable, debido a su naturaleza amorfa. Su descomposición sucede entre 225 y 325°C.

Fengel, establece que en la primera prueba de descomposición, la molécula se fragmenta y en la segunda prueba ocurre la depolimerización de cadenas pequeñas, formando unidades de monómeros, con gran formación de volátiles. Los productos formados a 500°C., el rendimiento es de apenas del 10% de carbón, contribuyendo

con ésto, la hemicelulosa muy poco en la formación de carbón.

- c) Carbonización de la Lignina: Resende Penedo (14), en su compilación, establece que la lignina es el componente más estable, la cual se descompone gradualmente entre 250 y 500°C. Brito y Barrichelo citados por Resende Penedo (14), concluyeron, que el valor de la lignina en madera tiene una sensible influencia en el rendimiento del carbón y también en el valor de carbono fijo. Además el rendimiento gravimétrico del carbón pasa de 26 a 30% cuando el valor de la lignina para de 21 a 29%, igualmente observaron que cuando el valor de la lignina, de la madera pasa de 21 a 31% el valor del carbono fijo varía de 74 a 78%.

El contenido de carbono fijo del carbón, es afectado por el comportamiento de la cantidad de lignina durante la carbonización, pues es el principal responsable de la formación de carbón vegetal, además, también interviene en la formación de alquitrán, gases no condensables, etc. Un rendimiento de 55% de carbón a 450 - 550°C., se le atribuye el contenido de lignina de la madera (6).

Según Petroff y Doat, encuentran una correlación directa entre el rendimiento de carbón y la regla de la lignina de las diversas maderas (6).

5. Aspectos Técnicos de la Carbonización:

- a) Influencia de la Temperatura sobre los Rendimientos de los Productos de la Carbonización: Se han realizado varias investigaciones al respecto, sobre los rendimientos en carbón, líquidos y gas no condensable. Al aumentar la temperatura, aumenta el rendimiento de líquidos y gases y disminuye el rendimiento del carbón, sin embargo, producido a menor temperatura tiene mayor contenido de materias volátiles que el carbón producido a temperatura alta, pero aumenta el contenido de carbono fijo al aumentar la temperatura (6).

La formación de gases aumenta, con el aumento de la temperatura, también la composición química de esos gases depende sensiblemente de dicha temperatura. A un principio son gases oxigenados, al aumentar la temperatura se forman gases hidrogenados, como el metano. Joun, citado por Klar, observó que hasta 280°C. se desprenden

gases oxigenados, y a medida que aumenta la temperatura, los gases hidrogenados predominan. El 90% del alquitrán se produce a 200 y 340°C. (6).

- b) Influencia de la Velocidad de Calentamiento: Con la velocidad o incremento del calentamiento, varían los rendimientos de carbón, alquitrán y carbono fijo. Con temperatura constante y diferentes tasas de calentamiento, el rendimiento en carbón de carbono fijo y de alquitrán, varía sensiblemente. Al disminuir la tasa de calentamiento se aumenta el rendimiento en carbono, pero disminuye el rendimiento de alquitrán (6).
- c) Influencia de la Presión: El efecto de variación de atmósfera, ejerce notable influencia sobre los rendimientos de los diversos productos de la carbonización. Experiencias de Violette, obtenidas en tubos sellados, determinó que el rendimiento de carbón bajo presión es mayor que a presión atmosférica, ya que los distintos compuestos gaseosos permanecen retenidos en el carbón, además el rendimiento a 340°C. bajo presión es casi 3 veces mayor que aquel obtenido a presión constante ambiental (6).

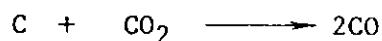
F. Características y Propiedades del Carbón Vegetal:

El carbón vegetal tiene baja densidad, alta reactividad, baja resistencia mecánica, bajo porcentaje de azufre, gran fragilidad y otras características comparándolo con el coque (14).

Las propiedades más representativas del carbón y que tienen acentuado efecto en el comportamiento del alto horno, son: Composición química, densidad, reactividad y resistencia mecánica. Aunque se puede incluir otras como la densidad y porosidad, absorción de humedad, poder calorífico, etc. menos representativas (6).

1- Reactividad:

Varios autores compilados por Resende Penedo (14), la definen como, la velocidad con la cual, a una temperatura determinada, el carbono reacciona con un gas conteniendo oxígeno (tal como el aire, CO₂, vapor de agua, el propio oxígeno o mezcla de estos), haciéndolo pasar a través de una capa de carbón granulometría y altura previamente fijadas. La reacción más importante es la establecida por Bourdouard.



Otra definición, es la capacidad que tiene el carbón vegetal de generar el poder reductor del gas, es decir el carbono del carbón, reacciona con el dióxido de carbono para producir monóxido de carbono. Se espera que un carbón de alta reactividad, reacciones en alto horno a bajas temperaturas y la reducción del mineral de hierro, con velocidad baja. Al disminuir la reactividad del carbón, provoca un aumento de la temperatura en la zona de reserva térmica, favoreciendo con ello, la reducción del mineral hierro de baja reductibilidad (6).

La medida de la reactividad consiste en tomar datos de temperatura al inicio de la reacción, evolución de la temperatura, durante la prueba, porcentaje de carbono o de gas antes y después de la prueba. La reactividad es posible compararla utilizando muestras de carbón de la misma faja granulométrica con el mismo equipo, pero no se puede comprar cuando las pruebas son hechas con otro equipo y en otras condiciones. A mayor porosidad, mayor área de contacto y por ende mayor reactividad, como la porosidad se relaciona con la densidad del carbón, y ésta con la de la madera, se dice que la reactividad del carbón depende de la especie de madera original, y dicha reacción es controlada por la porosidad del carbón y la velocidad del gas oxidante.

2. Composición Química:

En términos de análisis químico, el carbón se compone de carbono fijo y materias volátiles, los cuales son afectados principalmente por la temperatura de carbonización. Bergstrom y Wesslen citados por Resende Penedo (15), establecieron que al aumentar la temperatura de carbonización, aumenta la proporción de carbono fijo y disminuye el contenido de materias volátiles, a la vez que también lo hace el rendimiento de carbón vegetal. La variación de la temperatura en el interior del horno, produce carbón con diferentes contenidos de carbono fijo de una misma horneada. Además el proceso de carbonización es afectado por la velocidad y dirección del viento, etc. Con equipo de calentamiento externo y a través de un gas no oxidante, se puede controlar la temperatura y obtener así carbón de un carbono fijo determinado (15).

- a) Humedad: En la compilación de Resende Penedo (14), se establece que el carbón es relativamente higroscópico y su humedad depende de dos factores: Temperatura en que fue obtenido y Temperatura en la cual está expuesto. Se reporta la humedad del car-

bón como la pérdida de peso experimentada por el carbón cuando es sometido a calentamiento en estufa a temperatura de 105° C. durante 2 horas.

- b) Materias Volátiles: Estos materiales, según Resende Penedo (14), están compuestos por H, CO₂, CO e hidrocarbonatos; para su determinación, se usa una temperatura de 950° C. teniendo el cuidado de evitar oxidación del carbón.

El mayor efecto de su eliminación, en alto horno o fuera de él, se encuentra en la modificación estructural del carbón. Los cambios de las características físicas (porosidad, diámetro medio de los poros, área especificada total, etc.) por la eliminación de volátiles puede alterar su comportamiento en alto horno (6).

- c) Cenizas: Es el residuo de óxidos minerales obtenidos por combustión completa del carbón, permaneciendo 6 horas en la mufla a 750° C. (14).

El carbón vegetal, donde el contenido de cenizas es siempre bajo, su efecto sobre la composición final de la escoria y el volumen de la misma no es tan importante cuando su efecto estabilizador es sobre la reacción de C - CO₂ (8).

- d) Carbono Fijo: Al determinar el valor de materias volátiles, parte del carbono sale con gases como CO₂, CO e hidrocarbonatos. Otra cantidad de carbono es la responsable de la formación de la masa amorfa y como no sale junto con las materias volátiles, permanece fijo. Su cálculo se hace restando de cien el contenido de cenizas y el de materias volátiles. A medida que la temperatura de carbonización aumenta, el contenido de carbono fijo aumenta pasando de 52.3% a 200° C, a 96.4% a 1,100° C. (14).

Según Gómez y Matos, citados en la referencia (8), el efecto de la cantidad de carbono que se presenta en el carbón, es reflejado principalmente en la utilización del horno por unidad de volumen de carbón producido.

3- Fragilidad:

Es la propiedad del carbón vegetal de generar finos, cuando esta sujeto a abrasión y quebraduras. Carbón con alta fragilidad, preocupa a personas involucradas

en su producción, transporte, almacenaje y consumo (14).

Durante el manejo del carbón vegetal, desde la producción hasta su entrada en alto horno, son generados alrededor de 25% de finos en peso abajo de 10 mm. Estos 25% según Olivera, citado en la referencia (8), se distribuyen así:

En la carbonería	3.7%
Carguío y transporte	5.3%
Calor	9.7%
Almacenaje	<u>6.3%</u>
TOTAL	<u>25.0%</u>

Para la clasificación del carbón vegetal en su fragilidad, se utiliza la siguiente escala, según se establece en la referencia (3):

	% de pérdida (abajo de 20 mm)
Muy frágil	30
Bastante frágil	25 - 29
Medio frágil	15 - 24
Poco frágil	10 - 15
Muy poco frágil	10

- a) Prueba de Fragilidad: Se utiliza, para determinar el grado de fragilidad, la muestra de carbón se coloca en un tambor rotativo y se somete a determinado número de vueltas y a una velocidad de rotación prefijada (14).

Al respecto, se establece que la prueba de tamboramiento sirve para determinar comparaciones entre carbones producidos a partir de diferentes especies y en diferentes condiciones de carbonización. (6).

Las consideraciones sobre la prueba, establecida, por Resende Penedo (14), son las siguientes:

- A mayor velocidad de rotación, mayor generación de finos.
- A mayor número de rotaciones, mayor abrazión prolongada por lo tanto, mayor generación de finos.
- A mayor granulometría, más es el porcentaje de finos generados, pues el carbón de granulometría baja es más estable y produce menos finos.
- A mayor peso de muestra, menos cantidad de finos son generados, ya que muestras pesadas impiden el contacto de cierta cantidad de carbón con el tambor, lo que evita producir finos.

b) Factores que influyen en la Fragilidad del Carbón:

i. Humedad de la Madera:

Experimentos realizados en Brasil, por la Fundación CETEC, según Resende Penedo (14), muestran que a mayor contenido de humedad de la madera, mayor es la cantidad de finos generados por el carbón, ya que la leña causa mayor formación de rajaduras internas durante el proceso de carbonización.

ii. Temperatura de Carbonización:

Las diferentes temperaturas involucradas en la carbonización, producen cambios físicos y químicos en el carbón. Siempre en la Fundación CETEC, estudios realizados demostraron que la mayor generación de finos fue a 500° C. decreciendo su porcentaje cuando la temperatura de carbonización era menor 400° C. o mayor 700° C. (6).

iii. Diámetro y Largo de la Madera:

Rajaduras y fisuras internas constituyen zonas de concentración de tensión, esta tensión es atribuida a la gran impermeabilidad de la región central de la madera. La transferencia de humedad es por medio de micro aberturas, las cuales son selladas por secreciones de la madera, provocando dichas presiones por los gases internos, los que producen rajaduras y con ello, mayor área para generar finos (6).

iv. Densidad y Porosidad:

Esta propiedad es bastante importante, pues ella determina entre otras cosas el volumen ocupado por el reductor en los aparatos de reducción y gasificación. La densidad varía conforme la técnica de medida, por ejemplo si se tiene una caja de 1 m³. y se pesa la cantidad de carbón que llena la caja, se tendrá la relación peso/volumen, llamada densidad a granel, este valor, es alrededor de 200 a 300 Kg/m³. Pero, si se disminuye el volumen de la porosidad interna, o sea de los espacios vacíos entre los pedazos de carbón, considerando los poros internos como rellenos se obtiene la Densidad Aparente. En tanto que la densidad verdadera es la densidad aparente descartando el volumen de la porosidad interna (14).

El peso de determinado volumen de carbón varía con su granulometría, también por la presencia de hendiduras internas del carbón; la densidad relativa (gravedad

específica) es diferente a la densidad (peso por unidad de volúmen), que es una buena medida de la cantidad de carbón (substancia) que se presenta en la muestra. Es más fácil medir la densidad relativa si se considera el peso de un volúmen de carbón dividido por el peso igual al volúmen del agua (3).

La velocidad y temperatura final de carbonización influyen sobre la densidad y porosidad del carbón, resultando carbón menos denso con carbonizaciones rápidas que con carbonizaciones lentas, según los estudios realizados por Blankenhorn, al ser citado en la referencia (6). La densidad relativa verdadera aumenta al aumentar la temperatura de carbonización, igual sucede con la porosidad del carbón. La densidad a granel, depende de las granulometrías del carbón, humedad de dicho carbón y de las dimensiones del recipiente usado, además también varía con la temperatura final de carbonización y tasa de calentamiento.

4. Resistencia Mecánica:

A medida que la temperatura de carbonización aumenta, también lo hace la resistencia mecánica del carbón a la compresión. La generación de finos depende del diámetro y longitud, además de la humedad de la madera, cuando el carbón es sometido a compresión (14).

El ensayo de compresión es utilizado para medir la resistencia longitudinal y transversal del carbón, con la finalidad de preverse su comportamiento mecánico cuando es sometido a una carga. Según Assis, citado en la referencia (6), estableció que el carbón con baja resistencia mecánica, humedad elevada y alto contenido de volátiles, sufre una alteración dentro del horno de fundición alterando la distribución granulométrica, reduciendo así la penetración de la carga. La posición de la carga al cuerpo de prueba influye sobre el resultado de la resistencia, se tiene mayor resistencia en el centro del cuerpo de prueba que en los bordes. La resistencia disminuye cuando la temperatura de carbonización aumenta de 300 a 500° C. debido a la eliminación de volátiles, aumentando la porosidad del carbón; en tanto que arriba de 500 grados C. aumenta la resistencia (6).

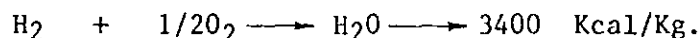
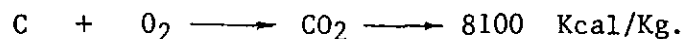
5. Absorción de Humedad:

El carbón absorbe humedad del ambiente, perdiendola parcialmente con la exposición al sol, esta humedad

influye mucho en la resistencia mecánica. El carbón absorbe humedad de la atmósfera, principalmente durante las lluvias, dependiendo del comportamiento de la humedad relativa. A mayor contenido de humedad aumenta la generación de finos en prueba de tamboramiento (6).

6. Poder Calorífico:

Resende Penedo (15), lo define como el número de calorías liberadas en la combustión completa de una unidad de masa combustible, siendo expresado en Kcal/Kg. para combustibles sólidos y líquidos y en Kcal/m³ para combustibles gaseosos. Es de mucha importancia cuando se piensa usar el carbón como sustituto de combustibles fósiles. Las reacciones consideradas en el poder calorífico del carbón vegetal son las siguientes:



Carbón producido a 500° C. tiene mayor poder calorífico que carbón producido a 300 y 700° C y entre éstos el de 700° C. tiene mayor poder calorífico. Esto indica que el poder calorífico del carbón vegetal esta afectado por la temperatura de carbonización a la cual se produjo (6).

G. Calidad del Carbón Vegetal:

Entre los indicadores tradicionales de la calidad del carbón vegetal, cuenta el sonido metálico que da cuando tropieza con un objeto duro y la fractura lisa al romperse, carece de sabor y olor, no mancha objetos que se froten contra la superficie de la fractura, enciende fácilmente y arde sin producir humo. El carbón tiene poca tendencia a absorber colores, gases y olores (8).

Las proporciones óptimas de los componentes químicos de un carbón, para considerarlo de buena calidad, debe estar dentro de los rangos siguientes (8).

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

Carbón con cantidades relativamente bajas de cuerpos volátiles y en consecuencia con mayor contenido de carbono fijo, es deseable para usos industriales especializados, al poseer un carbón mas del 24% de cuerpos volátiles se produce humo al arder. La especie de madera influye en la calidad química del carbón, y la densidad y estructura de dicha especie influye en la calidad física del carbón (8).

Resende Penedo (14), establece que en los procesos convencionales de producción de carbón vegetal, tanto el rendimiento como la calidad física y química dependen no solo de las características de la madera, sino de la habilidad de los operarios. De manera general, la calidad del carbón depende de: La especie de madera, del tamaño de la madera, del método de carbonización. La especie de madera es importante, pues la madera dura producirá carbón denso. El tamaño de la madera influye, en la calidad, pues madera en pedazos pequeños producen carbón duro y denso, que madera en pedazos grandes. Generalmente un carbón de buena calidad debe ser:

Físicamente : Denso, poco frágil, de granulometría uniforme y suficientemente resistente a compresión.

Químicamente : Alto porcentaje de carbono fijo, bajo porcentaje de cenizas, bajo porcentaje de fósforo. Evitar mojarse durante su manejo.

1) Efecto de la Especie y Forma de la Madera sobre la Calidad.

Todas las especies de madera, producirán carbón de buena calidad con un contenido de carbono fijo relativamente alto 75-82%, cuando las condiciones de carbonización son bien controladas. La forma de la madera no influye sobre la calidad del carbón, no así, el tamaño de los pedazos a carbonizar (8).

2) Efecto del Tamaño y Tipo de Horno sobre la Calidad del Carbón.

Según Hicock, citado en la referencia (8), establece que los hornos de 5 a 12 cuerdas de capacidad parecen capaces de mayor producción de cuerda, en realidad los más pequeños, pueden producir carbón de calidad satisfactoria para el mercado, siendo de cualquier tipo, siempre y cuando se maneje adecuadamente, principalmente los factores de tiempo y temperatura de carbonización.

3) Efectos del Tiempo y Temperatura de Carbonización sobre la Calidad del Carbón.

Puede producirse carbón de buena calidad a temperaturas de 510 y 570° C. aunque se produce de calidad aceptable a temperaturas un poco más bajas, pero se requiere más tiempo. La temperatura media del interior del horno afecta tanto la calidad como la cantidad de carbón. El tiempo de carbonización influye directamente en la cantidad de carbón, puesto que si se deja demasiado tiempo encendido se consume mayor cantidad de carbón, lo cual prácticamente no es conveniente desde el punto de vista económico (8).

Las características de la madera como la densidad, la cantidad de corteza y otras, como su estado seco o mojado, influye en la carbonización y la calidad del carbón. Madera que no está bien carbonizada, produce carbón de mala calidad, comunmente llamado tizón, posee alto contenido de materias volátiles y bajo porcentaje de carbono fijo. El control de la calidad del carbón debe de comenzar por la selección de la madera y seguir cuidando la preparación, la carbonización y la manipulación del carbón (6).

H. Hornos Usados en la Fabricación de Carbón Vegetal:

Según Resende Penedo (14), el hombre primitivo observó que la madera se quemaba hasta quedar prieta y frágil, además, daba un combustible que no producía humo ni llamas, y generaba calor más intenso que la madera.

Existen muchos modelos de hornos tales como:

- | | | |
|------------------------------|---|-------------------------|
| - Por su calentamiento | : | Internos
Externos |
| - Por su movilidad | : | Fijos
Portátiles |
| - Por su Flujo de Producción | : | Continuos
Por Cargas |

Los más comunes son los fijos de calentamiento interno, llamados de superficie (6).

1- Horno Media Naranja:

Es uno de los más baratos, de simple construcción, debiéndose de construir en lugares planos. Se pueden construir solos o en conjunto. El material de construc-

ción es el ladrillo de barro, cocido y argamasa de barro y arena o cal (ver fig. 2).

Este tipo de horno no posee chimenea, por lo tanto la entrada de aire y la salida del humo se hace a través de orificios llamados Tatus, Filas y Baianas. Posee 9 Tatus en la primera hilada, las filas, en número de 10, son orificios de 10 X 5 cms. en la 19a. hilada a partir del piso. La baianas, en número de 7 se localizan en la 40a. hilada (6).

El horno no requiere mantención especial, pero debe de tenerse cuidado con los ladrillos rotos y substituirlos, se debe de embarrar periodicamente, para tapar grietas e impedir la entrada de aire durante la carbonización. (6).

La operación del horno comprende su carga, la carbonización y descarga del carbón. La leña debe presentar ciertas calidades para no afectar la carbonización y la calidad del carbón: Leña mojada y verde perjudica el rendimiento del horno, a mayor humedad, menor rendimiento. Leña demasiado gruesa o larga atrasa la carbonización y produce muchos tizones. Características de la madera como densidad, cantidad de corteza y otras influyen en la carbonización y la calidad del carbón (6).

2. Horno de Albañilería con Cámara Externa:

Es un horno cilíndrico, con copa en forma de bóveda una chimenea lateral de tiraje central y una cámara de combustión externa. No posee tatus, filas o baianas, siendo que el control de la carbonización se da por la cámara (ver fig. 3). El calor para la carbonización de la leña es proporcionado por la quema, en la cámara de leña o cualquier otro tipo de material como corteza, ramas, etc. Toda la leña colocada en el interior es transformada en carbón, no hay necesidad de controlar la entrada de aire, simplificando la operación y disminuye el trabajo de albañilería (6).

Los gases caliente generados en la cámara son conducidos para el interior del horno, a través de 3 ductos construidos con tubos, dos laterales y uno central, las salidas tienen rejillas, los cuidados no varían mucho del de media naranja, solamente el cuidado de la puerta de metal de la cámara, se deben limpiar las rejillas, para permitir la buena circulación de aire (6).

El desarrollo de la carbonización es acompañado por

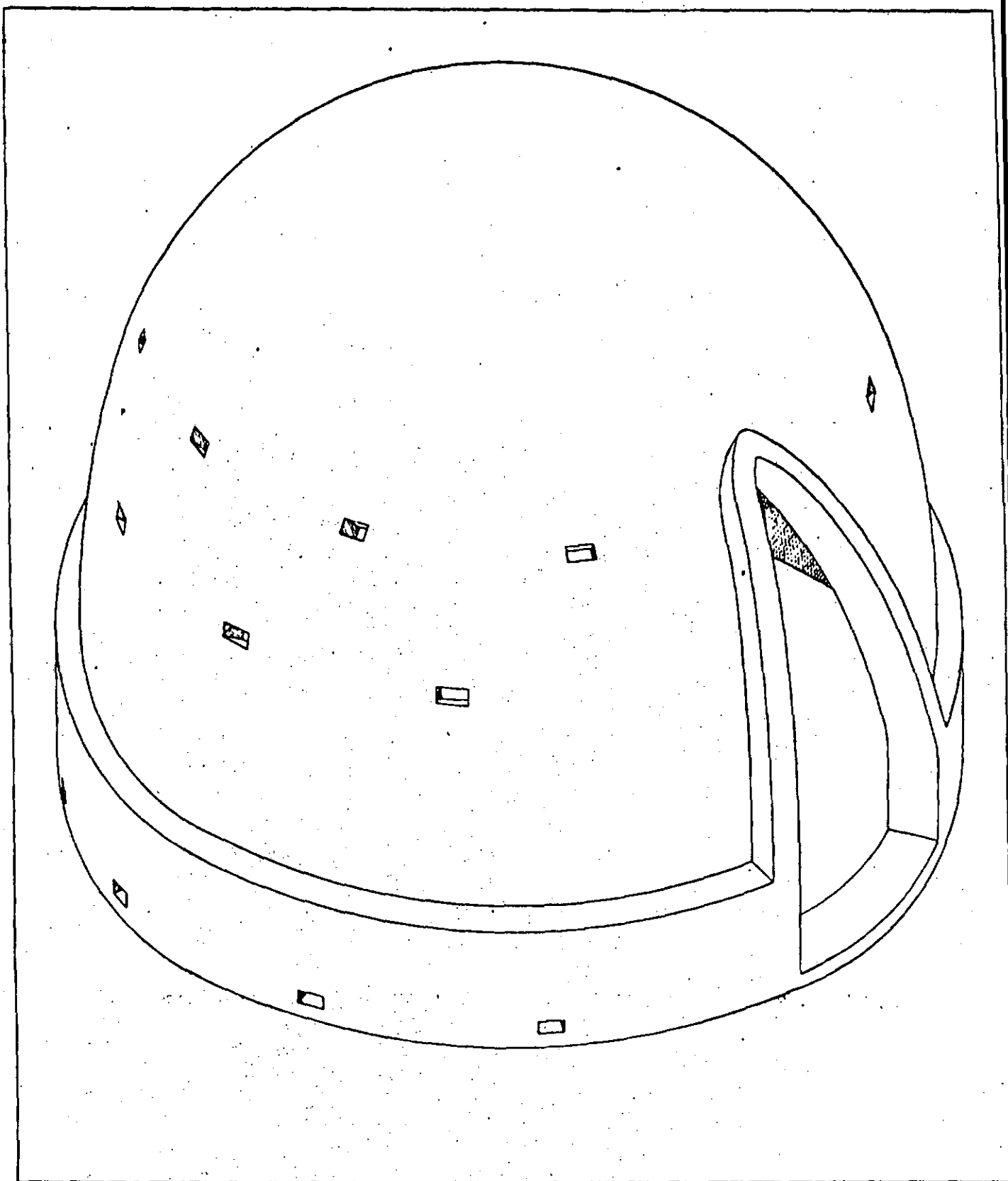


Figura 2. Aspecto general de un Horno de Ladrillo tipo Media Naranja.

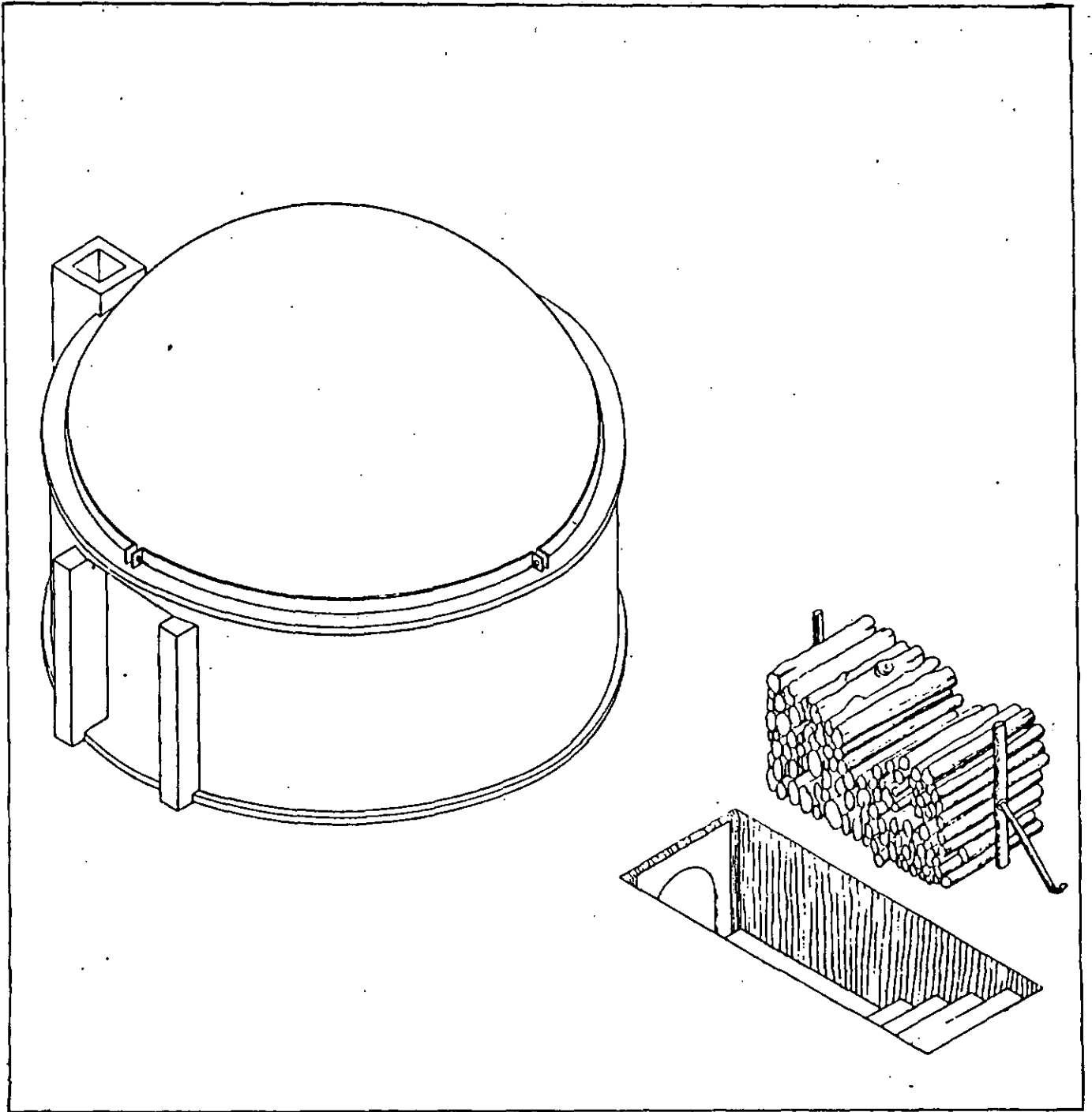


Figura 3. Aspecto general de un Horno de Albañilería con cámara externa.

el aspecto del color del humo, humo denso y azulado continuo indica que el frente de carbonización alcanzó el fondo, también el calor de la pared indica el frente de carbonización. Se debe controlar, que no falte leña en la cámara y mantener una llama para controlar la entrada de aire, a mayor volumen de aire que entre a la cámara, la carbonización será más rápida y se quemará mayor cantidad de material en la cámara (6).

3. Horno de Metal:

a- Descripción del Horno:

Escoto y Graham (7), lo describen como 2 secciones cilíndricas entrelazadas, una sobre otra y una cubierta cónica. Dicha cubierta posee 4 puertas circulares igualmente espaciadas para dejar salir los vapores, además poseen tapaderas. En la parte inferior se colocan los 8 canales con tapadera donde entra aire y sale humo. Tiene 4 chimeneas cilíndricas, de 3 m. de largo aproximadamente (ver fig. 4).

b- Selección del Terreno:

Según Escoto y Graham (7), el terreno seleccionado debe ser plano y firme, con un área de 3 X 3 m. Además se le debe de hacer acequias de desagüe para evitar inundaciones.

c- Ensamble y Carga del Horno:

Escoto y Graham (7), describen el proceso de la manera siguiente: Utilizando leños uniformes para nivelar la primera sección y luego se colocan equidistantemente las 8 entradas de aire, un mínimo de 25 cm. debe sobresalir del canal de entrada de aire. Luego comenzamos a colocar el material inflamable en el fondo del horno, encima de éste se colocan radialmente trozos de madera, evitando tapar con éstos las entradas de aire. Al llenarse el primer aro metálico, se coloca el segundo y se continúa colocando la madera de manera uniforme para llenar el horno con su máxima capacidad. Luego de llenados los dos aros, se coloca la tapadera, y se sellan las uniones con arena, además se sella la parte inferior del horno, dejando un espacio donde está el material inflamable para proceder a encender cuando ya se han colocado las cuatro chimeneas.

Según Roos y Roos (16), la madera para carbonización

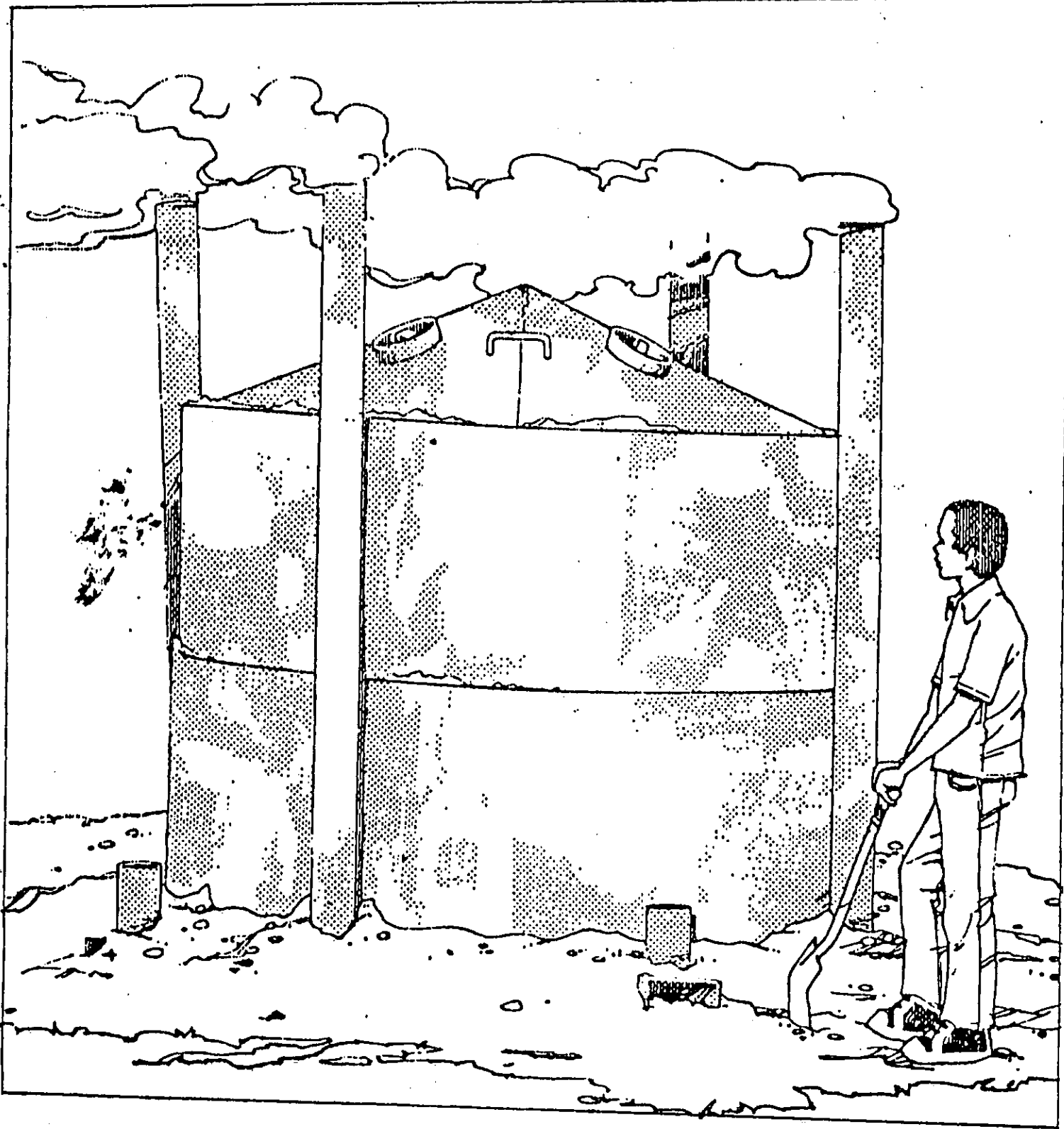


Figura 4. Aspecto general de un Horno de Metal en funcionamiento.

debe cortarse de 30 a 50 cm. de largo y no más de 20 cms. de diámetro. Se debe poner mucho cuidado en el arreglo al colocar la madera en el interior del horno. Los primeros leños son colocados radialmente y entre ellos el material inflamable. La ignición de cada punto debe hacerse sucesivamente y luego taparse sin perder tiempo, 15 minutos después de la ignición.

d- Operación:

Según Escoto y Graham (7), 15 minutos después de encendidos los puntos de ignición, deben taparse con arena. Cada chimenea a los 30 minutos debe emitir humo blanco, de lo contrario remover temporalmente la arena de los puntos para permitir mayor entrada de aire.

De los 30 a 60 minutos, se coloca la tapadera superior además, 4 cajas de la parte inferior funcionan como chimeneas y 4 como entrada de aire. Luego de cierto tiempo, debe de removerse el alquitrán depositado en la entrada y salida, para permitir la libre entrada de aire y la libre salida de humo. Después, de 8 a 10 horas se mueven las chimeneas a las entradas de aire de a lado, para convertirse dichos canales de entrada de aire en chimeneas y viceversa. Cuando se ha completado la carbonización de toda la madera, el color del humo se torna de un matiz azulado, o casi transparente, esto ocurre a las 16 o 24 horas de encendido el horno, en este momento se deben cerrar completamente todas las entradas y salidas del horno, removiendo las chimeneas, y luego colocar arena para tapar. Después de 16 a 24 horas de enfriamiento se abre y se descarga. El carbón es colocado en costales, el rendimiento del horno, depende de la densidad de la madera que se utilizó.

e- Ventajas de los Hornos de Metal:

Estas ventajas están relacionadas con los hornos de ladrillo fijos. Según la referencia (12).

- Se pueden transportar hasta el lugar donde se encuentra la madera a carbonizar.
- Son de fácil operación.
- No requieren grandes cantidades de madera para poder operar como sucede con los hornos fijos.
- El tiempo de producción es bastante corto dependiendo del tipo de madera y condiciones de carbonización.

Entre los hornos transportables más comunes encontramos el C.U.S.A.B., el Missouri y el Marck V., éstos dos últimos son más económicos, el primero de mayor costo, pero de mayor rendimiento (12).

f- Componentes del Hornos de Metal:

- 2 Cilindros de 2.32 m. de diámetro x 0.91 m. de altura, a 2.32 m. de diámetro x 0.67 de altura.
- Una tapa o cofia de 2.32 m. de diámetro x 0.46 m. de altura en el centro, cónica.
- Una caperuza de 0.45 m. de diámetro.
- 8 cámara de tiro, con tapadera y collarines de cierre de 0.15 x 0.90 x 0.70 m.
- 4 chimeneas de 2.30 m. de altura 0.10 de diámetro (12).

4. Hornos de Tierra:

El método más sencillo de producción de carbón vegetal es el que utilizan los hornos de tierra, el cual es el más primitivo y es el origen de los otros tipos de hornos y diferentes procesos para producir carbón vegetal (12).

Generalmente en este método, la madera es apilada de cierta forma en un hoyo de tierra, cubriéndola después con vegetación (zacate u hojas de banano, etc.), y tierra, dejando aberturas para el flujo y control del aire. Dependiendo de la cantidad de madera que se coloque en el horno, el período de carbonización tarda una semana o más. Se termina el proceso de carbonización cuando termina el flujo de humo, se tapan las aberturas por donde sale éste, el horno se deja enfriar por varios días y se saca el carbón. La mayor desventaja de éste tipo de horno es que el rendimiento por lo general es bajo, y el carbón producido está muchas veces, contaminado con tierra y piedras, además quedan muchos pedazos de tizones (12).

Según Roos y Roos (16), entre los tipos de hornos de tierra, algunos son superficiales y otros bajo tierra, en algunos la madera es colocada verticalmente en otros se hace horizontalmente. Básicamente la principal operación, es colocar una capa de vegetación (hierbas, grama, ramas, etc.) y tierra, para surtir un aislamiento con el medio ambiente. Estos mismos autores establecen, que todos los hornos de tierra deben ser construídos, en suelo seco y sólido, libre de vegetación. Además se debe contar con barriles de agua para apagar el carbón. Un horno en funcionamiento debe inspeccionarse 2 a 3 ho-

ras de intervalos, en días lluviosos y con viento la inspección es más frecuente.

a- Horno Horizontal:

Según Roos y Ross (16), este horno tiene una capacidad aproximada de 6 m^3 de madera, en promedio produce 30 a 40 Kg. de carbón/ m^3 de madera.

En un área de 2 x 5 m. se nivela y se limpia de vegetación, se colocan palos de madera de 1.5 m. de largo y 5 cm. de diámetro, distanciados 0.5 m., luego se coloca la madera hasta hacer una pila de 3 a 5 m. de largo, 1.5 m. de ancho y 1 m. de alto. Esta pila se orienta en dirección del viento, el material inflamable es mezclado entre la madera, luego se procede a colocarle una capa de 30 cm. de vegetación tupida, dejando abiertos solamente los puntos de ignición. Después se coloca una capa de tierra de 15 cm (ver Fig. 5).

Las paredes del horno se pueden reforzar con grandes trozos de madera o piedras, para darle firmeza.

Se hace un pequeño fuego cerca del horno y al estar bien encendido, se toman 2 a 3 paladas de madera ardiendo y se colocan en los puntos de ignición del horno, si después de 15 minutos no sale humo, se mueve la tierra en 4 a 5 puntos del horno, después se tapa el punto de ignición con vegetación y tierra, después de cierto tiempo de carbonización, el humo se torna tenue y escaso, se deben tapar las entradas de aire con tierra, a estas alturas el horno ha perdido la mitad de su volúmen. Su enfriamiento se lleva a cabo durante 3 a 4 días, dependiendo de las condiciones atmosféricas, del tipo de madera y del tipo de tierra utilizado. Para descargar el horno se quita toda la tierra, existiendo algunos tizones encendidos y a los cuales se debe colocar tierra y no mojarlos para apagarlos.

b- Horno Vertical:

Según Roos y Roos (16), en esta clase de horno la madera se apila en varias capas verticales. El tamaño de la madera debe ser uniforme, o sea, del mismo largo. La carga de este horno puede ser de 5 a 100 m^3 de madera (ver Fig. 6).

En un terreno plano y firme, varias capas de madera son apiladas en el centro del área. La madera es

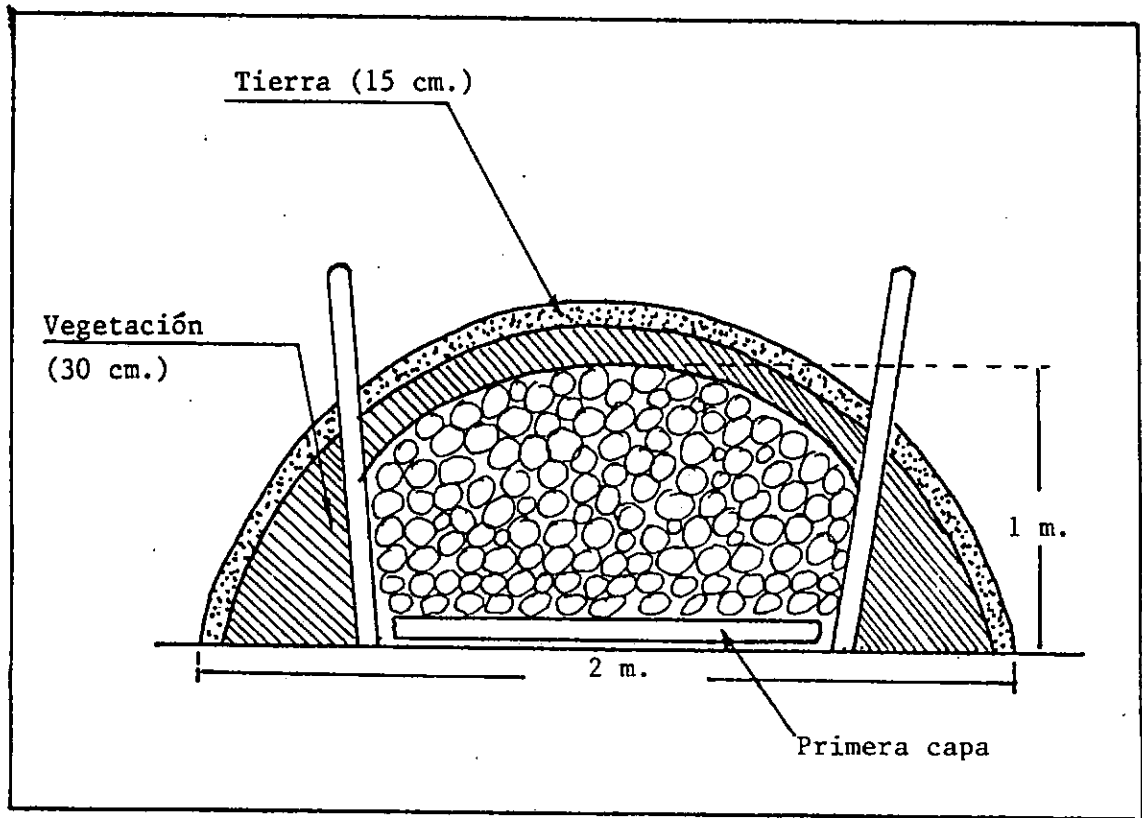


Figura 5. Esquema de la sección transversal del Horno de Tierra Horizontal.

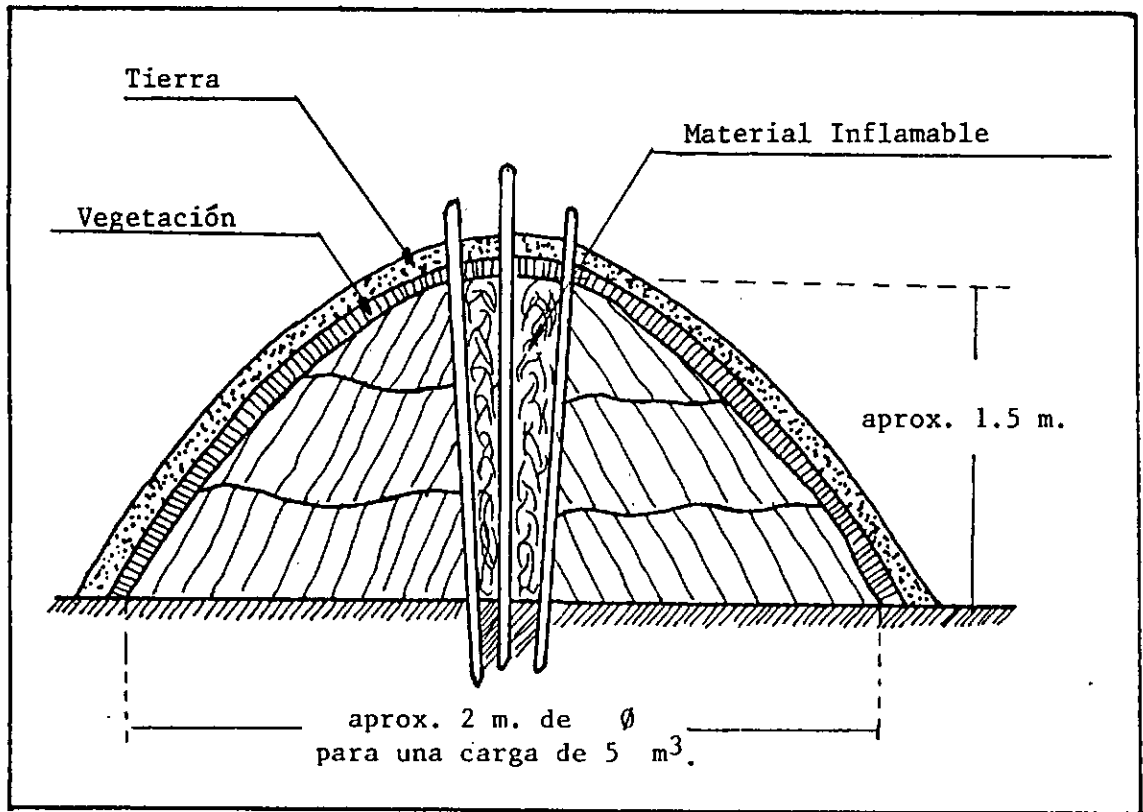


Figura 6. Esquema de la sección transversal del Horno Vertical de Tierra.

colocada alrededor del espacio designado como chimenea. El material inflamable es colocado en la chimenea, entre estacas de madera. La pila circular de madera es cubierta por una capa de vegetación y por una de tierra, quedando abierta la chimenea.

El material de la chimenea es encendido, para regular el proceso de combustión, es agregar tierra por varios lugares alrededor del horno, la chimenea y las entradas son cerradas al concluir el proceso después de 2 a 3 días. El enfriamiento toma aproximadamente 2 días. Para una carga de 100 m^3 de madera, el proceso tardará aproximadamente 2 meses, según Roos y Roos (16).

c- Pila de Madera Horizontal en Fosa de Tierra:

Roos y Roos (16), describen a este horno de tierra como una fosa de 2.4 m. de largo, 2.1 m. de ancho (en el piso de la fosa), 1.2 m. de profundidad, y el lado de las paredes inclinado. El fondo de la fosa es cubierta por una capa de material inflamable, luego la madera se coloca en capas horizontales, de tal manera que en el centro de la fosa se vaya formando una chimenea cónica, la cual tenga contacto con el material inflamable del fondo. Después de haberse cargado, se tapa con una capa de vegetación y una de tierra (ver Fig. 7). Se procede a encender previamente de cubrirse con estas capas, el proceso de carbonización es controlado cada 2 a 3 horas, removiendo tierra en varios puntos del horno. El proceso dura 2 a 3 días, luego se tapan las entradas de aire y se enfría durante días.

d- Pila de Madera Vertical en Fosa de Tierra:

Roos y Roos (16), describen este horno de la manera siguiente, es una fosa de tierra circular, que posee una chimenea de metal, la madera es colocada verticalmente en varias capas, con capacidad de 3.5 a 10 m^3 . Para una carga de 3.5 m^3 , las dimensiones de la fosa se establecen en la figura 8. A un lado de la pared se coloca la chimenea vertical, y en el lado opuesto se prepara un punto de ignición. Luego de llenada la fosa con madera se cubre con una capa de vegetación y una de tierra. El material inflamable es encendido, la car-

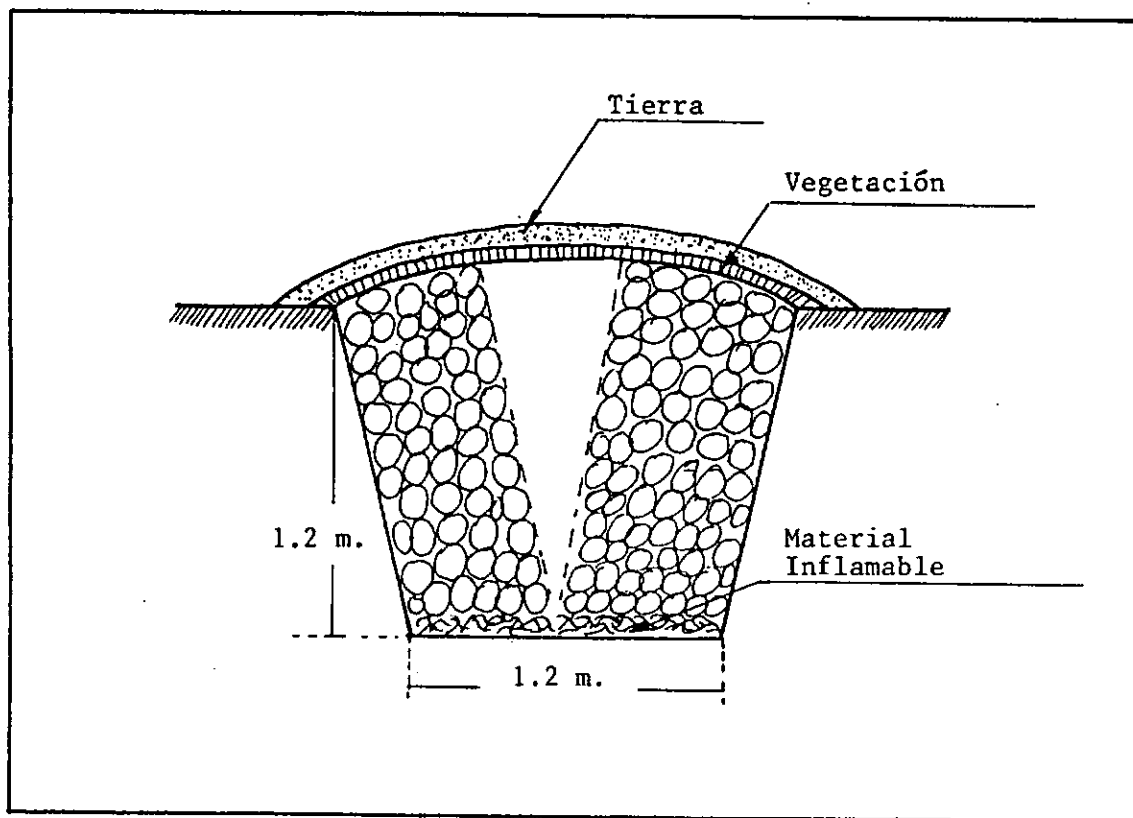


Figura 7. Esquema de la sección transversal de la Pila de Madera Horizontal en Fosa de Tierra.

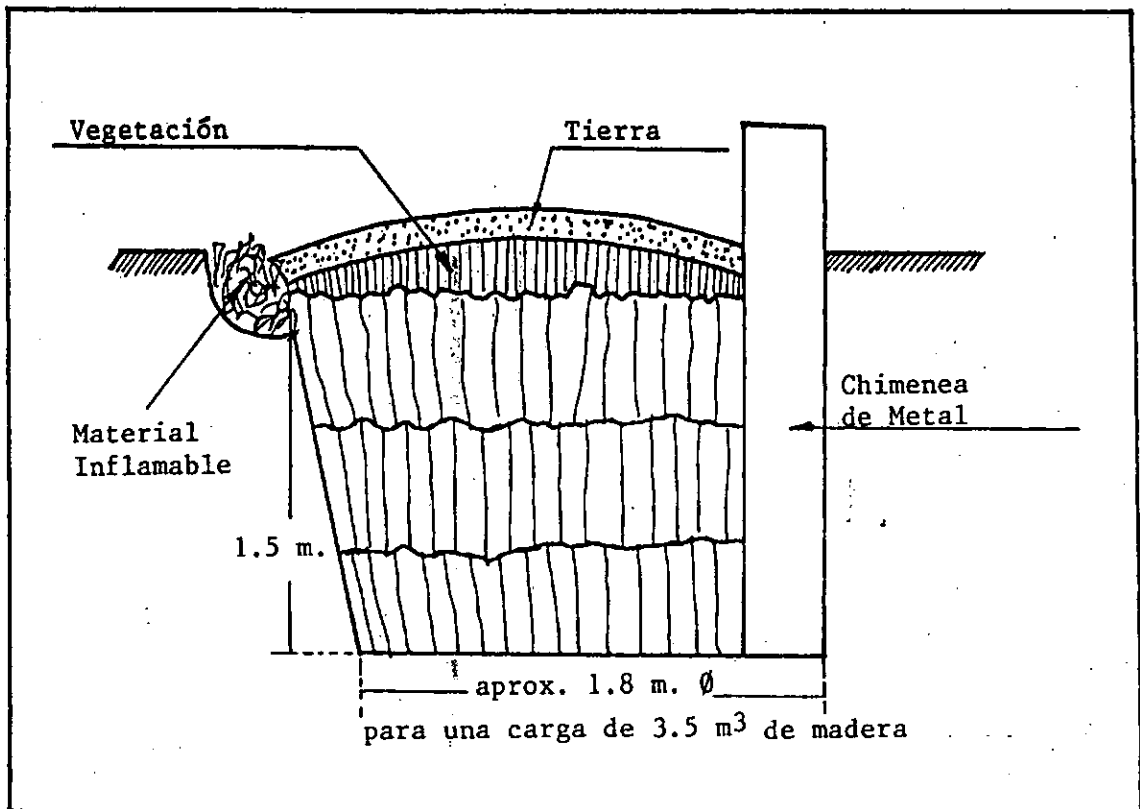


Figura 8. Esquema de la sección transversal de la Pila de Madera Vertical en Fosa de Tierra.

bonización se controla abriendo y cerrando agujeros alrededor del horno, dicho proceso y el de enfriamiento duran de 2 a 3 días, luego 2 días más para su enfriamiento.

I. Usos del Carbón Vegetal:

1. Doméstico: En muchos países, se emplea el carbón para cocinar y para obtener agua caliente; también para obtener calefacción central. También es un combustible para asados y barbacoas (4).
2. Industriales: Para producir calor en usos industriales, el carbón puede substituir al coque y al aceite combustible, que en muchos países son muy caros y tiene que ser importado.

El carbón se utiliza:

- Para secar productos tales como: Lúpulo, tabaco y pescado, en horno especial.
- En estufas, para calentar agua que se hace circular a fin de conseguir el secado indirecto de muchos productos agrícolas.
- Como combustible, en el proceso de fabricación de cal y cemento.
- Para la extracción de metales, particularmente el hierro, a partir de sus minerales.

En Guatemala, se usa actualmente en los Talleres Rossi, para forjar hierro, fundir aluminio, calentar crisoles, pero aún no ha llegado a substituir al coque. También en la industria de vidrio CAVISA usan carbón vegetal como un agente reductor y refinante del vidrio, eliminando el oxígeno del vidrio. Además asociado con otras materias, el carbón sirve para dar coloración ambar al vidrio.

3. Metalúrgicos: Para la fundición de cobre, latón, hierro en lingotes, acero, níquel, aluminio, electromanganeso, plancha de blindaje y moldes de fundición (8).
4. Químicos: Bisulfuro de carbono, carburo de silicio, cianuro de potasio, carbono activado, carbono de calcio, cianuro de sodio, monóxido de carbono, pólvora negra, plásticos, cauchos, lápices, absorbentes de gas (8).

5. Otras aplicaciones importantes:

- El carbón vegetal encuentra aplicación en la forja, el dibujo y la depuración de aguas de cloaca.
- En horticultura, los menudos de carbón (briznas y polvo) se emplean en cultivo de verduras para incrementar rendimiento, como suavizante del suelo, en el cultivo de flores, como: Rosas; también como acondicionador del suelo, productos farmacéuticos y alimentos para aves y animales. (12)

De los subproductos de la carbonización tenemos: El alquitrán, es un excelente combustible y puede substituir los aceites combustibles y el diesel, sin mucho problema técnico, debido a su mayor densidad, viscosidad y buena temperatura adiabática. Este alquitrán se puede utilizar como combustible en la industria de cerámica, de cemento, de cal y de numerosos locales de donde el uso de combustibles fósiles es onerosa (6).

El Carbón puede ser substituto del combustible óleo, en los procesos industriales usados en las calderas de vapor, hornos de cerámica, etc. Cada tonelada de alquitrán bruto substituye a 2/3 de tonelada de óleo combustible y cada tonelada de metanol proveniente del carbón substituye a 1/2 tonelada de gasolina (3).

J. Descripción de las Especies en Estudio.

1) Pino Blanco (Pinus pseudostrobus L.)

- a) Ecología: Crece en elevaciones de 800 a 1,500 msnm, en climas húmedos y muy húmedos. Bajo condiciones de las zonas de vida Montano Bajo húmedo y además el bosque subtropical muy húmedo. Es una especie de rápido crecimiento, y entre todas las de su género es la que menos resina contiene, exceptuando a P. ayacahuite. Por su amplia distribución como la mayoría de las especies de pino, ofrece buenas posibilidades de explotación a escala comercial (5).
- b) Usos: Sus principales usos son para leña, carpintería y construcciones rurales (5).

Según Aguilar Girón (1), el peso específico de esta especie de pino puede variar de 0.49 a 0.662, dependiendo la edad del árbol.

- 2) Encino Colorado o Negro (Quercus sapotaefolia Liebm.) y Encino Blanco (Quercus peduncularis Née.)

Según Aguilar Girón (1), ambas especies varían, no solo en su morfología, sino que en su peso específico, el del encino colorado se encuentra entre 0.72 a 0.96, en tanto que el de encino blanco es ligeramente menor de 0.68 a 0.89.

a) Ecología: Ambas especies, se pueden adaptar a regiones con las siguientes condiciones de 1,000 a 2,700 msnm, temperatura de 18 a 24° C. de 1,000 a 2,000 mm. de precipitación. Zona de vida predominante, bosques subtropicales húmedos y secos del altiplano guatemalteco, según lo establecido por Young (17).

b) Usos: Ambas especies de encino, se usan principalmente para leña y carbón, según Young (17).

- 3) Eucalipto (Eucaliptus citriodora Hook. Mitch.)

Según Aguilar Girón (1), establece un rango para el peso específico de ésta especie que varía de 0.85 a 1.01.

Según Penfold y Willis (13), determinaron que E. citriodora, posee una composición química de 45% de celulosa, 25% de hemicelulosa y 30% de lignina, en valores promedio.

a) Ecología: Las condiciones ambientales, según Martínez (10), para esta especie de eucalipto, no varía a las requeridas por las demás especies, así tenemos que se adapta al trópico y subtrópico, con precipitaciones de 640 a 1,200 mm. altitud de 0 a 2,000 msnm, suelos de grava, pobres, y de colores grises y rojos, además tolera muy bien la sequía.

b) Usos: Según Martínez (10), el uso potencial del eucalipto en nuestro medio se enfoca a leña, madera, control de erosión, pulpa, aceites esenciales, producción de miel y carbón vegetal.

- 4) Mangle colorado (Rhizophora mangle L.)

Aguilar Girón (1), establece un rango para el valor del peso específico del mangle colorado de 0.95 a 1.10.

- a) Ecología: Según Morales Calderón (11), los manglares en Guatemala están formados en un 80% de mangle colorado y el resto de asociaciones de colorado, negro y blanco. Su adaptación se enmarca predominantemente, en zonas salinas, en los márgenes de la desembocadura de los ríos y en litoral del mar.
- b) Usos: Según Morales Calderón (11), se usa principalmente como madera en las construcciones de ranchos de manaco, en postes para cercado, obtención de corteza para curtir pieles y cueros, además posee usos medicinales. Estos usos están enfocados a nivel nacional.

VI. MATERIALES Y METODOS

A. Descripción del Area Experimental:

- 1) Chimaltenango: En este departamento se encuentran los hornos de tierra, bajo condiciones ambientales de 1100 a 1600 milímetros de precipitación al año, temperatura de 15 a 23° C. y una humedad relativa de 70 a 80%.
- 2) Progreso: En la parte norte del departamento, en la región de la Sierra de las Minas, se localizan los hornos de Metal y de Ladrillo con Cámara Externa, bajo las siguientes condiciones ambientales: Precipitación pluvial anual 2000 a 2500 milímetros, temperatura de 16 a 23° C. y una humedad relativa de 70 a 85%.
- 3) Izabal: En el litoral de este departamento, se localizan los hornos de Ladrillo Media Naranja, bajo las siguientes condiciones ambientales: Precipitación atmosférica de 2000 a 3500 milímetros anuales, temperatura de 21 a 25° C. y una humedad relativa de 80 a 85%.

B. Tratamientos:

- 1) Tipos de Hornos: Los tipos de hornos utilizados en este estudio fueron:
 - Horno de Metal: Capacidad aproximada de 7 m³ de leña, duración del proceso de carbonización de 2 a 3 días.
 - Horno de Tierra: Capacidad aproximada de 30 m³ de leña, duración del proceso de carbonización de 8 a 10 días.
 - Horno de Ladrillo Media Naranja: Capacidad aproximada de 5 a 6 m³ de leña, duración del proceso de carbonización de 3 a 4 días.
 - Horno de Ladrillo con Cámara Externa: Capacidad máxima aproximada de 36 m³ de leña, duración del proceso de carbonización de 6 a 8 días.
- 2) Especies Forestales: Las especies se seleccionaron en relación a su peso específico, desde livianas hasta densas.
 - Pino blanco (P. pseudostrobus)
 - Encino blanco (Q. peduncularis)
 - Encino colorado (Q. sapotaefolia)
 - Eucalipto (E. citriodora)
 - Mangle colorado (Rhizophora mangle)

a) Recolección de Muestras:

Se recolectaron muestras de las especies mencionadas, excepto para encino blanco, procedentes de árboles de 5 a 6 años de edad, con dimensiones de 50 cms. de largo y 20 cms. de diámetro.

b) Preparación de Muestras:

Las muestras de madera recolectadas, se les eliminó la corteza y se cortaron en trozos pequeños y luego se les colocó en botes de metal de 25 cms. de alto y 15 cms. de diámetro con agujeros; preparándose cuatro botes por especie, para colocar un bote arriba y el otro en el fondo del horno.

No hubo necesidad de preparar muestras de encino colorado, ya que los hornos se llenaron con esta especie, para carbonizarse simultáneamente con las otras.

c) Carbonización de Muestras:

- El encino colorado, se carbonizó en horneadas completas en los cuatro tipos de hornos mencionados.
- En tanto que las muestras de pino, eucalipto y mangle, solo fueron carbonizadas en los hornos de metal y de ladrillo 1/2 naranja, simultáneamente con las horneadas de encino colorado.

3) Diámetro de la Madera para Carbonización:

a) Preparación de las Muestras:

Se seleccionaron muestras de las especies encino blanco y colorado, de 50 cms. de largo y de 5, 10, 15, 25, 35, y 45 cms. de diámetro.

b) Carbonización de las Muestras:

Se utilizó el horno de metal, para carbonizar simultáneamente las muestras de los distintos diámetros de cada una de las especies.

C- Análisis de Laboratorio:

Las muestras de carbón obtenidas a partir de cada una de las especies y de cada tipo de horno, además de los distintos diámetros de las especies carbonizadas, fueron analizadas gravimétricamente en el Laboratorio de Química de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos, con base al método de análisis químico inmediato

establecido por la Sociedad Norteamericana para la Prueba de Materiales, descrito en el apéndice de este trabajo.

D- VARIABLES A MEDIR:

A cada una de las muestras de carbón vegetal, se les determinó los componentes del análisis químico inmediato siguientes:

- % De humedad
- % De materias volátiles
- % De cenizas
- % De carbono fijo

E- ANÁLISIS ESTADÍSTICO:

- 1- A las muestras de carbón de encino colorado producido en los cuatro tipos de hornos mencionados, se analizó solamente el porcentaje de carbono fijo, con el propósito de establecer la influencia del tipo de horno sobre la calidad gravimétrica del carbón, además, determinar diferencias significativas entre las muestras obtenidas de dichos hornos.
- 2- A las muestras de carbón obtenidas a partir de pino blanco, encino colorado, eucalipto y mangle; y producidas en hornos de ladrillo 1/2 naranja y de metal se analizó estadísticamente el porcentaje de carbono fijo de todas las muestras, con base a un diseño factorial completamente al azar, con el propósito de determinar la influencia de la especie forestal y el tipo de horno sobre la calidad gravimétrica del carbón vegetal, además, establecer diferencias significativas entre dichas muestras de carbón.
- 3- Las muestras de carbón obtenidas de los distintos diámetros de madera de encino colorado y blanco, se les analizó estadísticamente el porcentaje de carbono fijo, con base al análisis de regresión lineal y correlación simple, con el propósito de establecer el grado de dependencia y de asociación entre el diámetro y el porcentaje de carbono fijo.

VII. RESULTADOS

En el cuadro 2, se presentan los resultados del análisis gravimétrico del carbón de encino colorado, producido en los siguientes hornos: De tierra, de metal, de ladrillo con cámara externa y de ladrillo media naranja. Se aprecia una marcada diferencia entre la calidad gravimétrica del carbón obtenido del horno de tierra, en relación a la calidad de las muestras de carbón de los otros hornos; por tener menor porcentaje de carbono fijo y mayor porcentaje de materias volátiles.

Analizando estadísticamente el porcentaje de carbono fijo de dichas muestras de carbón, se determinó que el carbón obtenido de los hornos de metal y de media naranja, poseen el mayor porcentaje y además son estadísticamente iguales entre si (ver cuadro 11 b. del apéndice).

También se observa que la muestra de carbón de menor poder calorífico, es la que se obtuvo del horno de tierra, por tener mala calidad gravimétrica.

En la figura 9, se comparan gráficamente los componentes del análisis químico del carbón encino colorado presentados en el cuadro 2. Se observa una marcada diferencia entre el porcentaje de los componentes del carbón del horno de tierra, en relación al porcentaje de los componentes del carbón obtenido de los otros hornos.

En la figura 10, se muestran gráficamente los valores del poder calorífico del carbón de encino colorado del cuadro 2. Se aprecia que el carbón que presenta el más bajo poder calorífico, en relación a las demás muestras de carbón, es del carbón que se obtuvo del horno de tierra. Si observamos dicho valor no varía entre las de carbón de los otros hornos.

En el cuadro 3, se presentan los resultados del análisis gravimétrico del carbón de pino blanco, producido tanto en el horno de metal, como en el de media naranja. Se observa que el carbón que presenta mejor calidad gravimétrica es el que se obtuvo del horno de metal, ya que tiene mayor porcentaje de carbono fijo y menor porcentaje de materias volátiles, en relación al carbón que se obtuvo del horno de media naranja, siendo estadísticamente diferente el porcentaje de carbono fijo del carbón de ambas muestras (ver cuadro 12 c. del apéndice). Sin embargo, el poder calorífico de ambas muestras de carbón es bastante similar.

En la figura 11, se comparan gráficamente el contenido de los componentes químicos de las muestras de carbón del cuadro 3. La diferencia entre el porcentaje de carbono de fijo y el porcentaje

Cuadro 2. Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de encino colorado, producido en cuatro tipos de hornos.

Tipo de horno	Repetición	Humedad (%)	Materias volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico Kcal/Kg. <u>1/</u>
Tierra	I	7.34	36.65	2.64	60.67	7907
	II	7.29	36.43	2.61	60.96	7913
	III	7.39	36.55	2.65	60.81	7910
	IV	7.11	36.17	2.23	61.61	7946
	MEDIA	7.28	36.45	2.53	61.01	7919
Metal	I	4.29	22.33	1.83	75.84	8519
	II	4.07	22.12	1.99	75.89	8501
	III	4.56	22.44	1.72	75.84	8530
	IV	4.19	22.23	1.80	75.98	8520
	MEDIA	4.28	22.28	1.84	75.89	8518
Ladrillo con cámara externa	I	2.42	23.20	2.23	74.47	8504
	II	2.38	23.30	2.36	74.35	8497
	III	2.46	23.33	2.31	74.37	8501
	IV	2.31	23.10	2.41	74.50	8488
	MEDIA	2.39	23.23	2.33	74.45	8498
Ladrillo media naranja	I	3.86	22.17	1.48	76.36	8545
	II	3.83	22.38	1.42	76.21	8554
	III	3.90	22.22	1.51	76.28	8544
	IV	3.67	22.45	1.59	75.97	8542
	MEDIA	3.82	22.31	1.50	76.21	8546

1/ Calculado a partir de la fórmula de Goutal
(PCs = (82C + AV))

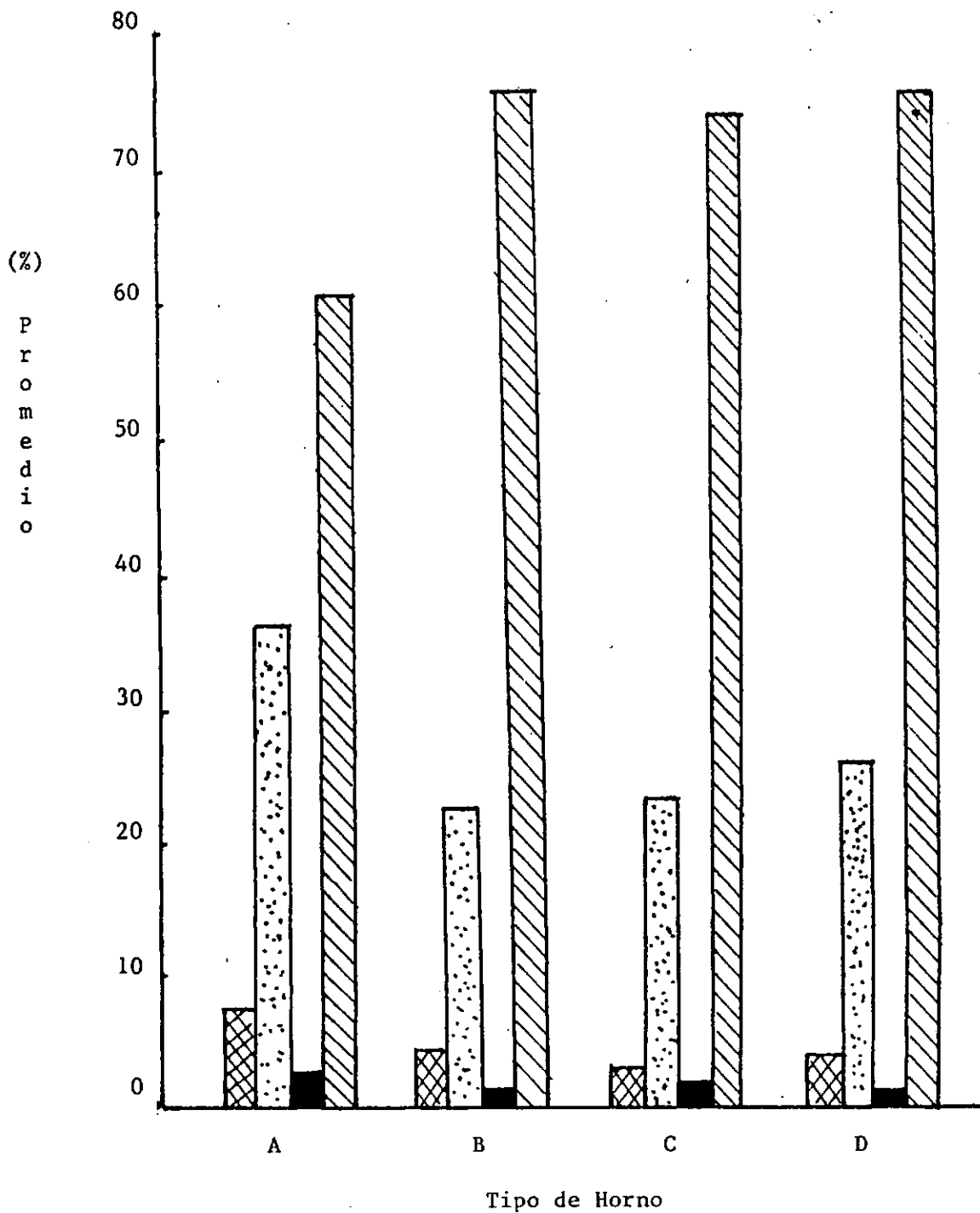


Figura 9. Comparación de los componentes del análisis químico inmediato del carbón de encino colorado, producido en los siguientes hornos: Tierra (A), Metal (B), Ladrillo con cámara externa (C) y Ladrillo media naranja (D).

▨ = % de humedad

■ = % de cenizas

▤ = % de materias volátiles

▧ = % de carbono fijo

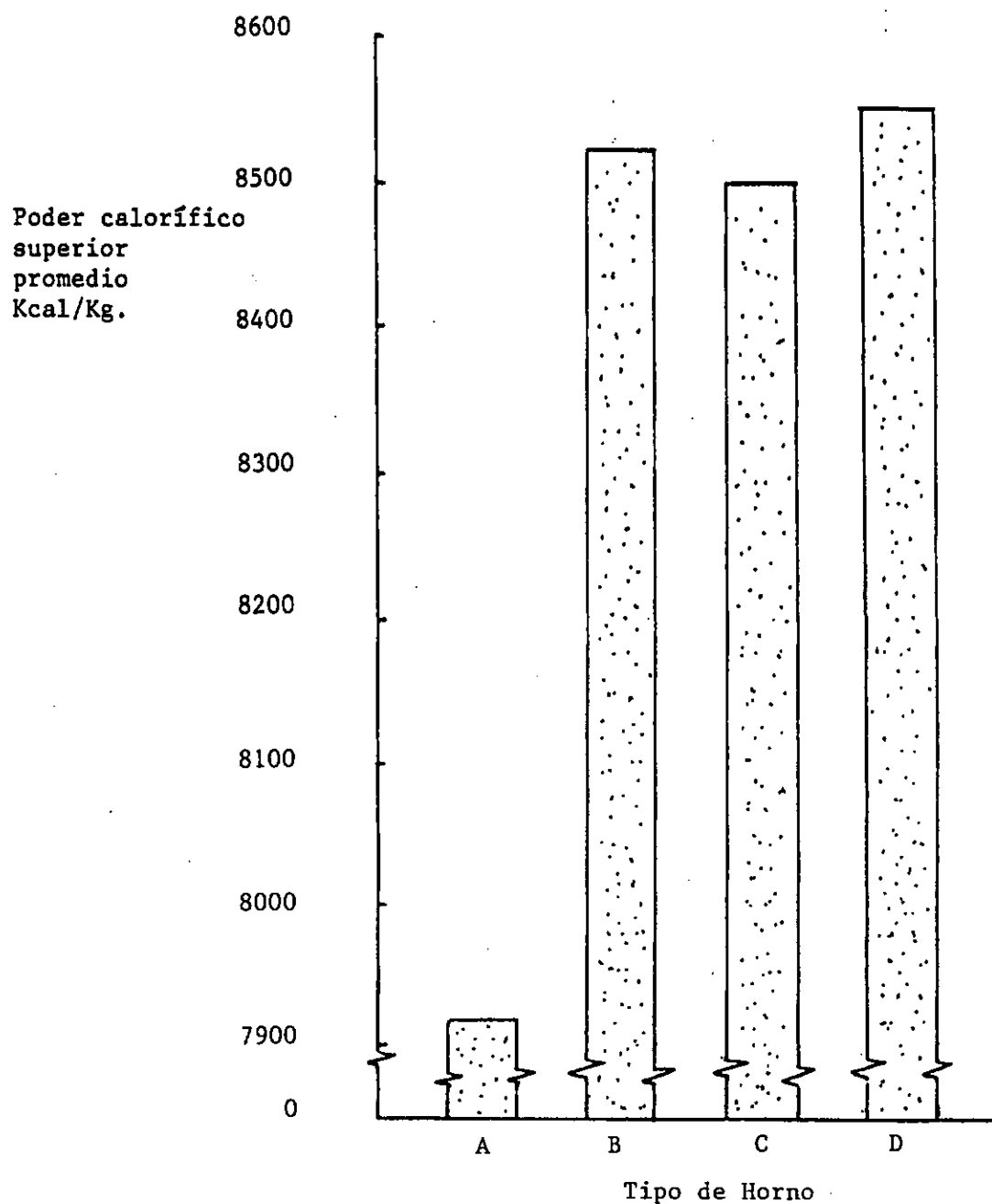


Figura 10. Comparación del poder calorífico del carbón de encino colorado, producido en los siguientes hornos: Tierra (A), Metal (B), Ladrillo con cámara externa (C) y Ladrillo media naranja (D).

Cuadro 3. Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de pino blanco, producido en dos tipos de hornos.

Tipo de Horno	Repetición	Humedad (%)	Materias volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico Kcal/Kg. <u>1/</u>
Metal	I	3.07	15.39	1.04	83.58	8654
	II	2.82	16.24	1.12	83.69	8681
	III	2.91	16.31	1.08	82.62	8683
	IV	3.02	15.93	1.06	83.01	8671
	MEDIA	2.96	15.97	1.08	82.98	8672
Ladrillo media naranja	I	3.47	25.04	1.35	73.62	8616
	II	3.57	24.83	1.22	73.96	8622
	III	3.30	24.55	1.30	74.16	8610
	IV	3.17	24.94	1.19	73.88	8627
	MEDIA	3.38	24.84	1.27	73.91	8619

1/ = Calculado a partir de la fórmula de Goutal (PCs = (82C + AV))

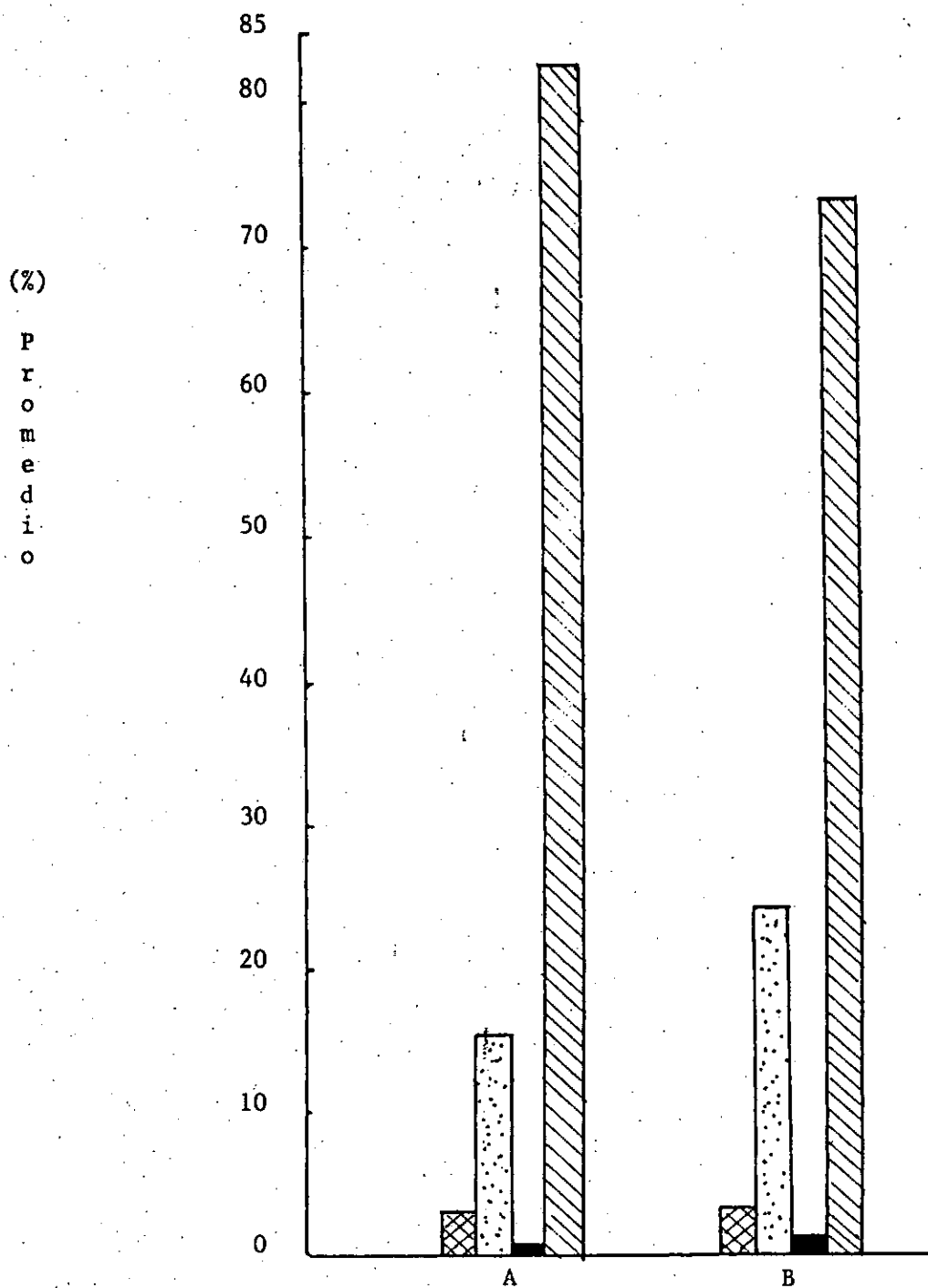


Figura 11. Comparación de los componentes del análisis químico inmediato del carbón de pino blanco, producido en los siguientes hornos: Metal (A) y Ladrillo media naranja (B).

▣ = % de humedad

▣ = % de materias volátiles

■ = % de cenizas

▨ = % de carbono fijo

de materias volátiles es bastante marcada, no así, entre el resto de componentes.

En el cuadro 4, se muestran los resultados del análisis gravimétrico del carbón de eucalipto, producido tanto en el horno de metal como en el de media naranja. Se aprecia que el carbón producido en el horno de metal, reportó mejor calidad gravimétrica, que el carbón producido en el otro horno, por tener mayor porcentaje de carbono fijo y menor porcentaje de materias volátiles, aunque el contenido de humedad y el de cenizas, no varió entre una y otra muestra. Sin embargo, aunque el porcentaje de carbono fijo, sea estadísticamente diferente entre ambas muestras de carbón (ver cuadro 12 c del apéndice), reportan un poder calorífico similar.

En la figura 12, se observan gráficamente el porcentaje de cada uno de los componentes del análisis químico del carbón del cuadro 4. Se aprecia una diferencia marcada entre los componentes de ambas muestras de carbón, excepto entre el contenido de cenizas.

En el cuadro 5, se presentan los resultados del análisis gravimétrico del carbón de mangle, producido tanto en el horno de metal como en el de media naranja. Se observa que el carbón producido en el de metal, posee una mínima diferencia, respecto a porcentaje de carbono fijo, en relación a la muestra de carbón del horno de media naranja, por lo tanto, se observa que el valor del poder calorífico es prácticamente el mismo.

En la figura 13, se aprecian gráficamente, el porcentaje de **los componentes del análisis químico del carbón del cuadro 5. No se observan diferencias muy marcadas entre el contenido de dichos componentes.**

En el cuadro 6, se agrupan los resultados del análisis gravimétrico del carbón de pino, encino colorado, eucalipto y mangle, producido en el horno de metal. Se aprecia, que existe variación entre el porcentaje de los componentes del análisis químico del carbón de todas las especies, reportando mayor porcentaje de carbono fijo el carbón de eucalipto, por lo tanto, mejor calidad gravimétrica, aunque no muy diferente al obtenido por el carbón de pino. El carbón de mangle, reportó mayor contenido de cenizas, que el resto de las especies, sin embargo, a pesar de tener buen contenido de carbono fijo, su poder calorífico resultó ser el menor en relación al reportado por el carbón de las otras especies.

Cuadro 4. Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de eucalipto, producido en dos tipos de hornos.

Tipo de Horno	Repetición	Humedad (%)	Materias volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico Kcal/Kg. <u>1/</u>
Metal	I	4.00	14.88	1.36	83.88	8619
	II	4.12	15.13	1.43	83.45	6813
	III	4.03	15.01	1.27	83.73	8622
	IV	4.09	15.11	1.29	83.61	8624
	MEDIA	4.06	15.03	1.34	83.67	8620
Ladrillo media naranja	I	1.85	23.17	1.12	75.71	8595
	II	1.97	23.40	1.07	75.54	8604
	III	2.02	23.23	1.11	75.66	8597
	IV	2.07	23.30	1.03	75.67	8605
	MEDIA	1.98	23.28	1.08	75.65	8600

1/ = Calculado a partir de la fórmula de Goutal (PCs = (82C + AV)

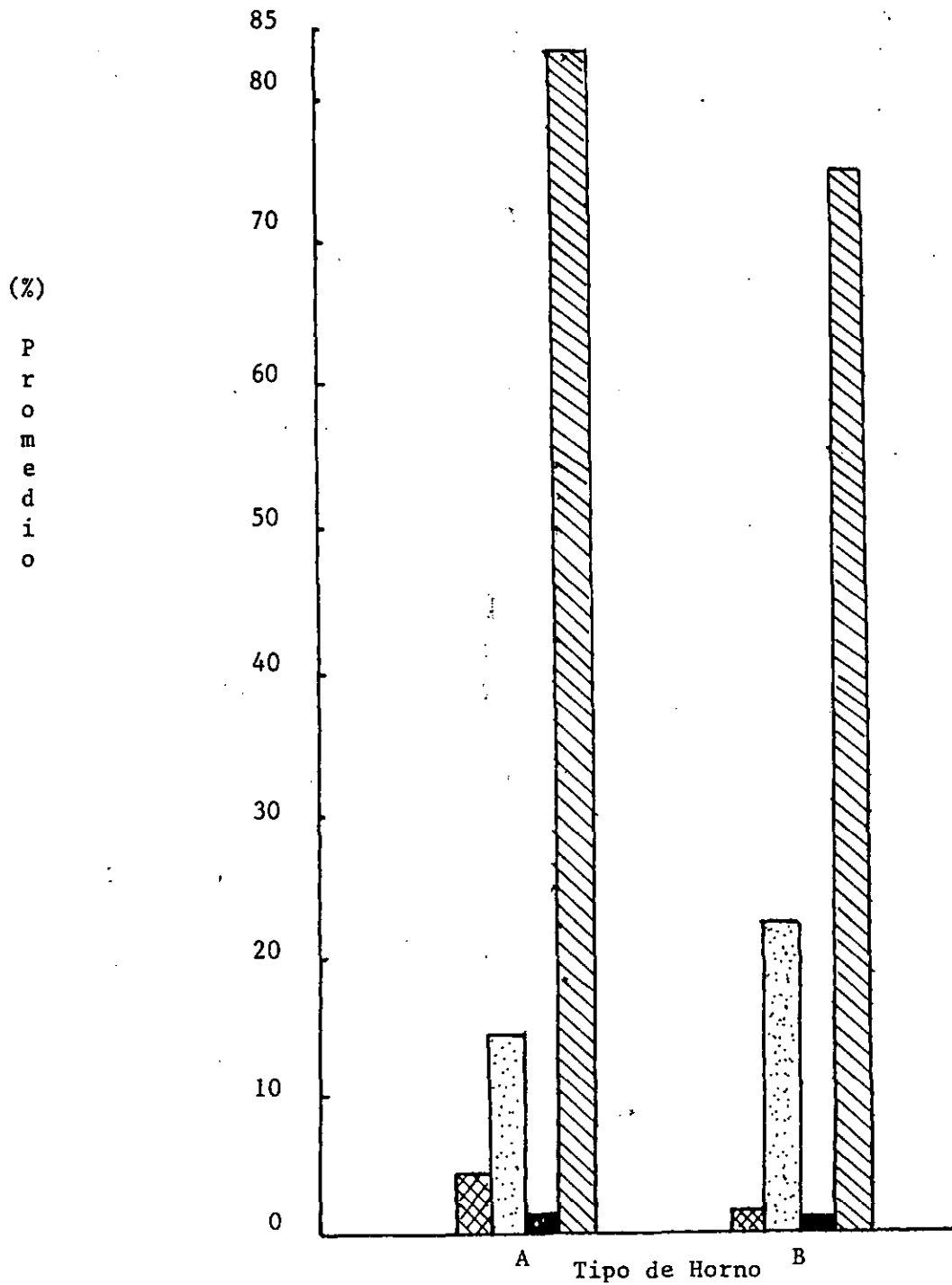


Figura 12. Comparación de los componentes del análisis químico inmediato del carbón de eucalipto, producido en los siguientes hornos: Metal (A) y Ladrillo media naranja (B).

▣ = % de humedad

▣ = % de materias volátiles

■ = % de cenizas

▨ = % de carbono fijo

Cuadro 5. Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de mangle colorado, producido en dos tipos de hornos.

Tipo de horno	Repetición	Humedad (%)	Materias volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico Kcal/Kg. <u>1/</u>
Metal	I	3.83	15.62	4.39	80.00	8388
	II	3.73	16.24	4.51	79.29	8397
	III	3.75	16.41	4.37	79.28	8421
	IV	3.46	15.93	4.48	79.60	8391
	MEDIA	3.69	16.04	4.44	79.54	8399
Ladrillo media naranja	I	5.44	18.15	3.50	78.35	8403
	II	5.25	18.53	3.70	77.78	8398
	III	5.40	18.30	3.73	77.97	8388
	IV	5.54	18.40	3.60	78.01	8402
	MEDIA	5.41	18.35	3.63	78.03	8398

1/ = Calculado a partir de la fórmula de Goutal (PCs = (82C + AV)).

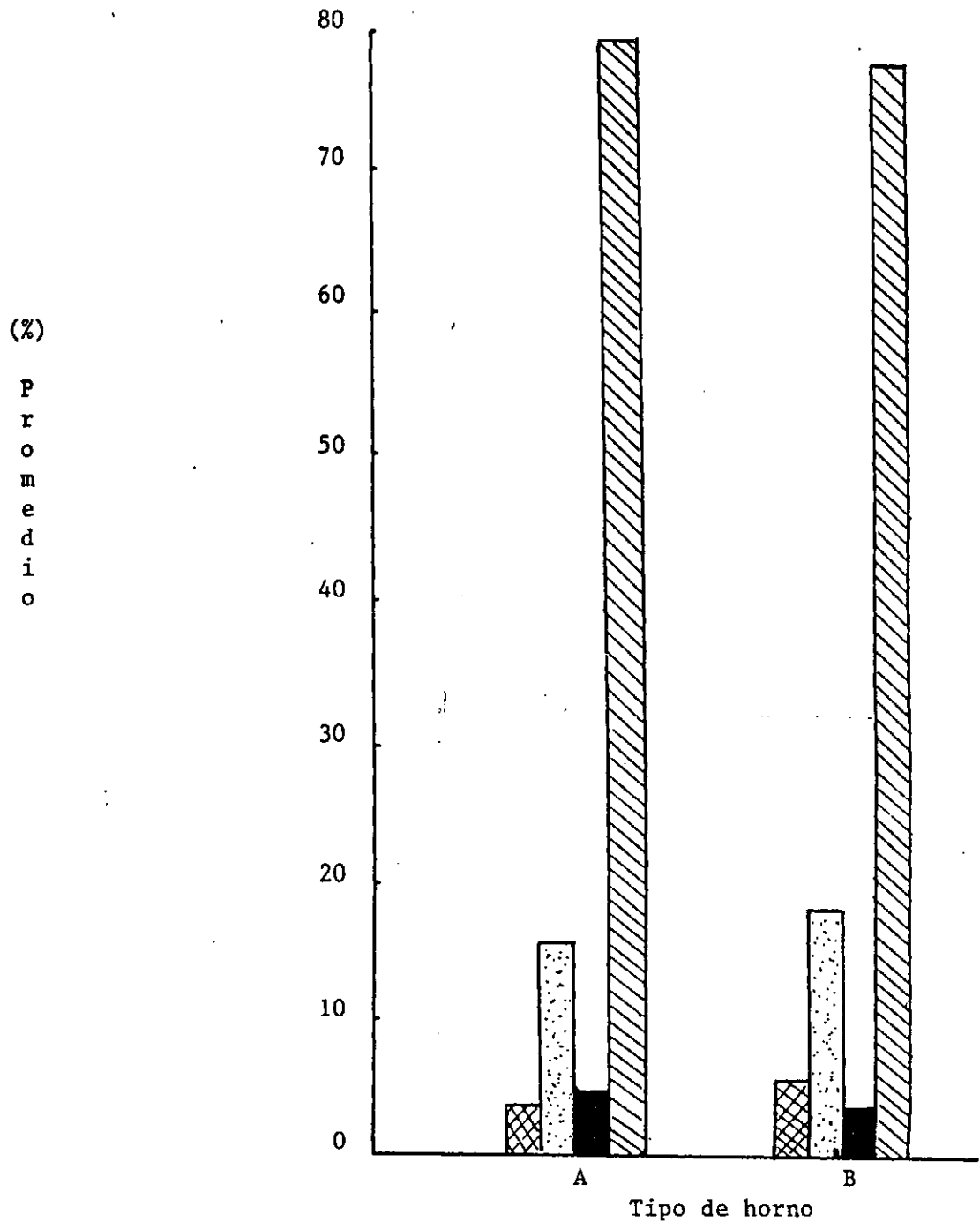


Figura 13. Comparación de los componentes del análisis químico inmediato del carbón de mangle colorado, producido en dos tipos de hornos: Metal (A) y Ladrillo media naranja (B).

 = % de humedad  = % de cenizas
 = % de materias volátiles  = % de carbono fijo

Cuadro 6. Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de cuatro especies, producido en horno de metal.

Especie forestal	Repetición	Humedad (%)	Materias volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico Kcal/Kg. <u>1/</u>
Pino blanco	I	3.07	15.39	1.04	83.58	8654
	II	2.82	16.24	1.12	82.69	8681
	III	2.91	16.31	1.08	82.62	8683
	IV	3.02	15.93	1.06	83.01	8671
	MEDIA	2.96	15.97	1.08	82.98	8672
Encino colorado	I	4.29	22.33	1.83	75.84	8519
	II	4.07	22.12	1.99	75.89	8501
	III	4.56	22.44	1.73	75.84	8530
	IV	4.19	22.23	1.80	75.98	8520
	MEDIA	4.28	22.28	1.84	75.89	8518
Eucalipto	I	4.00	14.88	1.36	83.88	8619
	II	4.12	15.13	1.43	83.45	8613
	III	4.03	15.01	1.27	83.73	8622
	IV	4.09	15.11	1.29	83.61	8624
	MEDIA	4.06	15.03	1.35	83.67	8620
Mangle colorado	I	3.83	15.62	4.39	80.00	8388
	II	3.73	16.20	4.51	79.29	8397
	III	3.75	16.41	4.37	79.28	8421
	IV	3.46	15.93	4.48	79.60	8391
	MEDIA	3.69	16.04	4.44	79.54	8399

1/ = Calculado a partir de la fórmula de Goutal (PCs = (82C + AV)).

En la figura 14, se muestran gráficamente los porcentajes de los componentes del análisis químico del carbón de las distintas especies forestales presentados en el cuadro 6. La variación entre cada uno de los componentes del carbón de las distintas especies, es bastante marcada principalmente el porcentaje de carbono fijo y el de materias volátiles.

En el cuadro 7, se agrupan los resultados del análisis gravimétrico del carbón de pino blanco, encino colorado, eucalipto y mangle colorado, producido en horno de media naranja. Se aprecia, que el carbón que reporta mejor calidad gravimétrica es el que se obtiene de mangle, aunque presente ligeramente elevado porcentaje de cenizas, también se observa que la variación entre el porcentaje de materias volátiles y de cenizas es mínima presentada por todas las muestras de carbón. El poder calorífico de menor valor lo presentó el mangle, a pesar, de tener el más alto contenido de carbono fijo.

En la figura 15, se observan gráficamente los porcentajes de los componentes del análisis químico, de las muestras de carbón del cuadro 7. La diferencia entre cada uno de ellos, de todas las muestras de carbón no es muy marcada.

En la figura 16, se aprecia gráficamente la comparación del poder calorífico superior del carbón producido a partir de las cuatro especies estudiadas y en los hornos de metal y media naranja. Se observa diferencia interespecífica e intraespecífica respecto al poder calorífico del carbón producido en ambos tipos de hornos, presentando mayor poder calorífico para ambos hornos, el carbón de pino.

En el cuadro 8, se presentan los resultados del análisis gravimétrico de la mezcla del carbón de las cuatro especies estudiadas y producido en cada uno de los hornos utilizados. Se observa que la mezcla del carbón del horno de metal, reportó mejor calidad gravimétrica, que las mezclas del horno media naranja y la mezcla de ambos hornos, sin embargo, el poder calorífico resultó ser mayor el presentado por la mezcla del carbón de cada uno de los hornos.

En la figura 17, se muestran gráficamente la comparación del porcentaje de cada uno de los componentes del análisis químico de las mezclas de carbón del cuadro 8. Se aprecia diferencias poco marcadas, respecto al porcentaje de cada uno de dichos componentes.

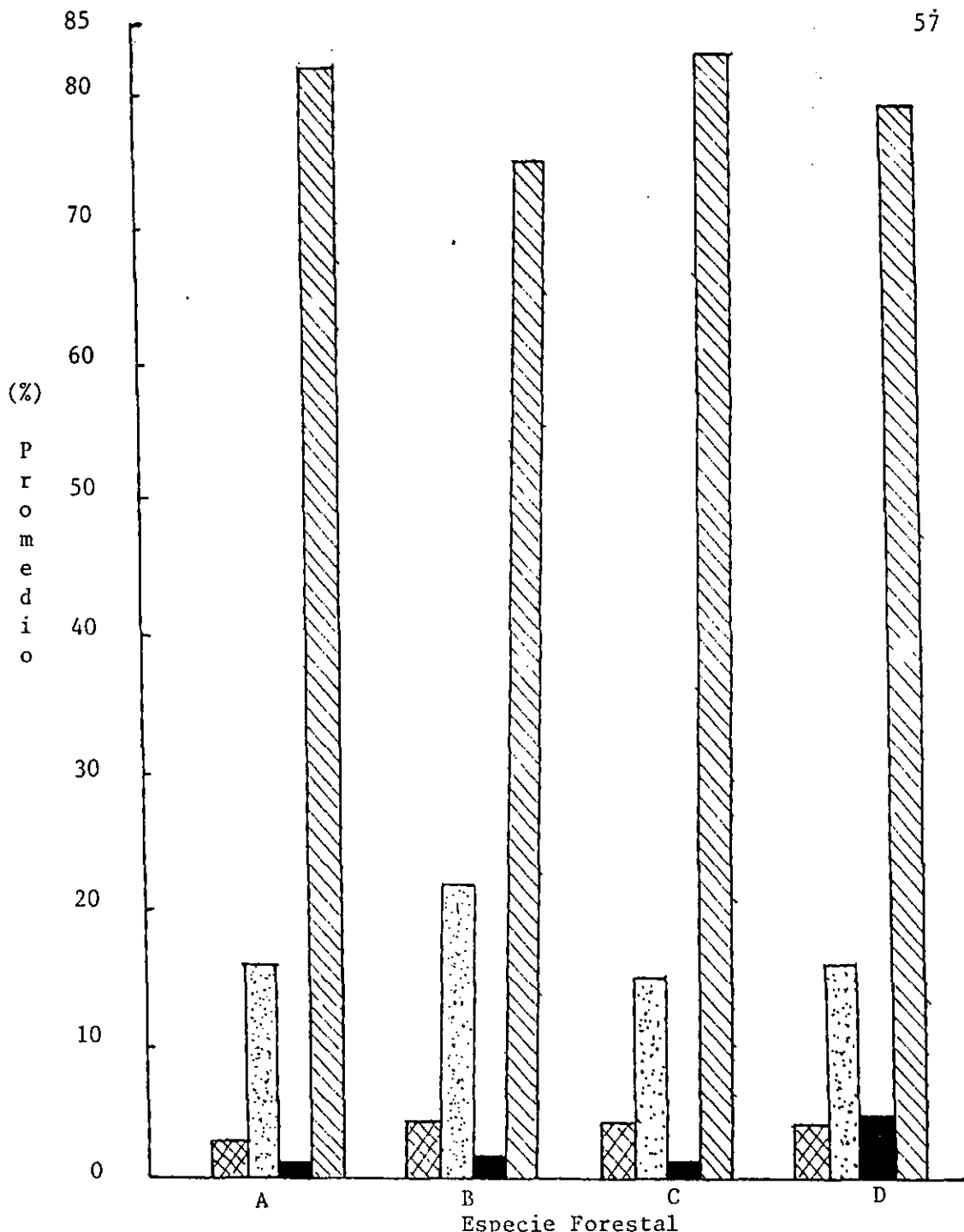






Figura 14. Comparación de los componentes del análisis químico inmediato del carbón de: Pino blanco (A), Encino colorado (B), Eucalipto (C) y Mangle colorado (D), producido en horno de metal.

-  = % de humedad
-  = % de materias volátiles
-  = % de cenizas
-  = % de carbono fijo

Cuadro 7. Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de cuatro especies forestales, producido en horno de media naranja.

Especie Forestal	Repetición	Humedad (%)	Materias volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico Kcal/Kg. <u>1/</u>
Pino blanco	I	3.47	25.04	1.35	73.62	8616
	II	5.57	24.83	1.22	73.97	8622
	III	3.30	24.55	1.30	74.16	8544
	IV	3.17	24.94	1.19	73.88	8442
	MEDIA	3.38	24.84	1.27	73.19	8619
Encino colorado	I	3.86	22.17	1.48	76.36	8545
	II	3.83	22.38	1.42	76.21	8554
	III	3.90	22.22	1.51	76.28	8544
	IV	3.67	22.45	1.59	75.97	8542
	MEDIA	3.82	22.31	1.50	76.21	8546
Eucalipto	I	1.85	23.17	1.12	75.71	8595
	II	1.97	23.40	1.07	75.54	8604
	III	2.02	23.23	1.11	75.66	8597
	IV	2.07	23.30	1.03	75.76	8605
	MEDIA	1.98	23.28	1.08	75.65	8600
Mangle colorado	I	5.44	18.15	3.50	78.35	8403
	II	5.24	18.53	3.70	77.78	8398
	III	5.40	18.30	3.73	77.97	8388
	IV	5.54	18.40	3.50	78.01	8402
	MEDIA	5.41	18.35	3.63	78.03	8398

1/ = Calculado a partir de la fórmula de Goutal (PCs = (82C + AV)).

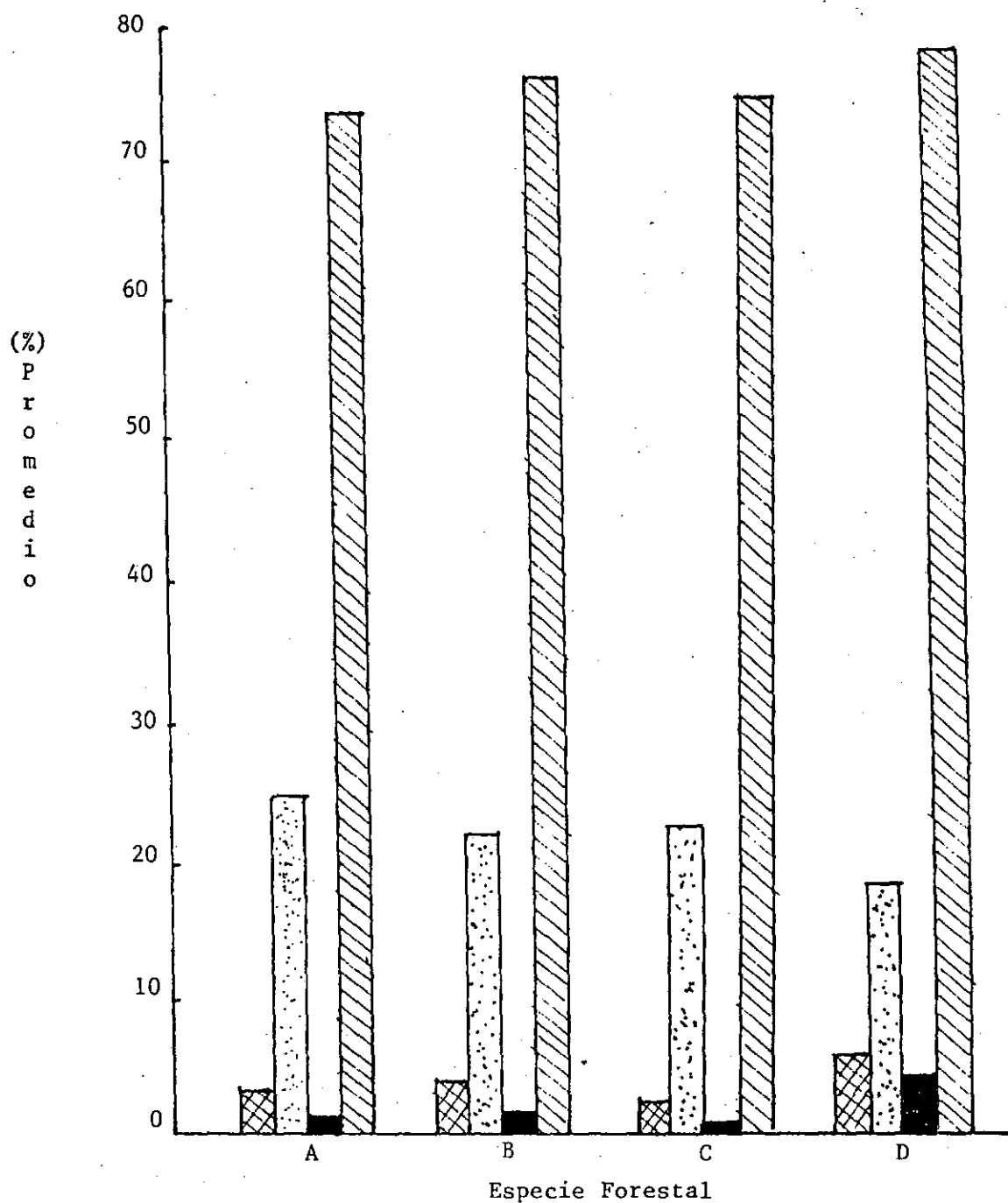






Figura 15. Comparación de los componentes del análisis químico inmediato del carbón de: Pino blanco (A), Encino colorado (B), Eucalipto (C) y Mangle colorado (D), producido en horno de ladrillo media naranja.

-  = % de humedad
-  = % de materias volátiles
-  = % de cenizas
-  = % de carbono fijo

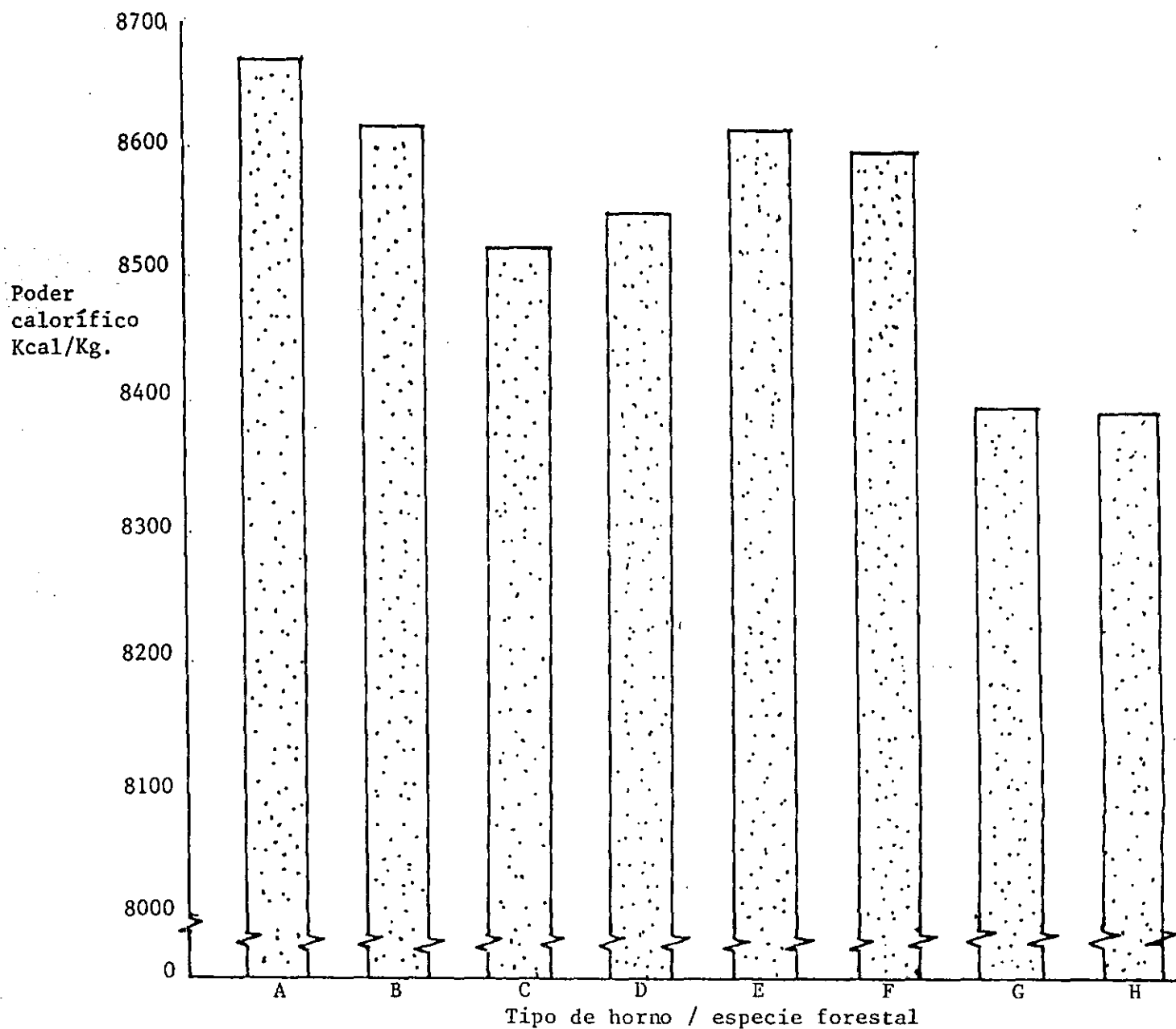


Figura 16. Comparación del poder calorífico del carbón de las cuatro especies forestales, producido en los dos tipos de hornos.

- | | |
|-----------------------------------|---|
| A = Horno metal / pino blanco | B = Horno media naranja / pino blanco |
| C = Horno metal / encino colorado | D = Horno media naranja / encino colorado |
| E = Horno metal / eucalipto | F = Horno media naranja / eucalipto |
| G = Horno metal / mangle colorado | H = Horno media naranja / mangle colorado |

Cuadro 8. Valores promedio del análisis gravimétrico de la mezcla del carbón de las cuatro especies forestales, producido en horno de metal y media naranja.

Mezcla	Repetición	Humedad (%)	Materias volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico Kcal/Kg. <u>1/</u>
Del horno de metal	I	4.68	18.25	2.24	79.52	8510
	II	4.81	18.36	2.19	79.46	8517
	III	4.56	18.59	2.30	79.12	8514
	IV	4.83	18.40	2.35	79.26	8505
	MEDIA	4.72	18.40	2.27	79.34	8529
Del horno media naranja	I	4.03	23.76	1.61	74.64	8568
	II	4.10	23.19	1.64	75.18	8553
	III	4.08	23.36	1.63	75.02	8558
	IV	4.11	23.55	1.60	74.86	8564
	MEDIA	4.08	23.47	1.62	74.93	8561
De ambos hornos	I	3.91	20.40	1.91	77.69	8594
	II	4.01	20.10	1.67	78.23	8606
	III	4.12	20.54	2.00	77.47	8591
	IV	4.04	20.33	2.03	77.65	8583
	MEDIA	4.02	20.34	1.90	77.76	8594

1/ = Calculado a partir de la fórmula de Goutal (PCs = (82 + AV)).

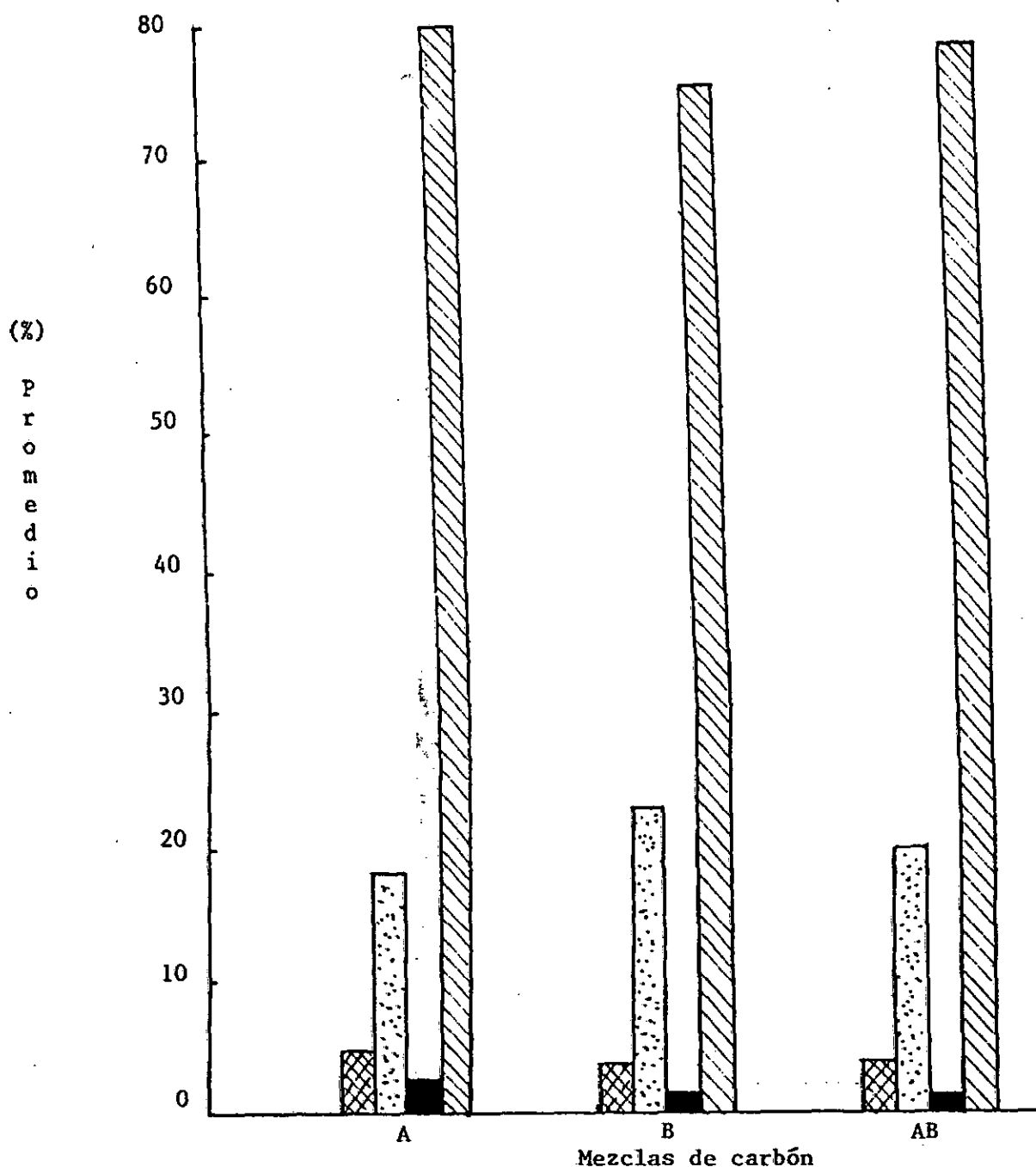


Figura 17. Comparación de los componentes del análisis químico inmediato de la mezcla de carbón de 4 especies forestales, producido en los dos tipos de hornos.

A = Mezcla de carbón de pino, encino colorado, eucalipto y mangle colorado, del horno de metal.

B = Mezcla de carbón de pino, encino colorado, eucalipto y mangle colorado, del horno media naranja.

AB = Mezcla de carbón de las cuatro especies y de ambos hornos.

☒ = % de humedad

■ = % de cenizas

▨ = % de materias volátiles

▧ = % de carbono fijo

En la figura 18, se observa gráficamente la comparación del poder calorífico de las mezclas de carbón del cuadro 8. Se aprecia una marcada diferencia entre cada uno de dichos valores, presentando mayor poder calorífico la mezcla de carbón de ambos hornos.

En el cuadro 9, se presentan los resultados del análisis gravimétrico del carbón de encino colorado, producido en el horno de metal, variando el diámetro de la madera para carbonizar. Se aprecia que al variar el diámetro de 5 a 45 cms., el contenido de carbono fijo del carbón varió de 74.95 a 77%, y el contenido de materias volátiles de 23.02 a 20.36%, además se determinó que existe un alto grado de relación entre el porcentaje de carbono fijo y el diámetro (ver cuadro 13 a. del apéndice). Sin embargo, no se estableció ningún grado de relación entre el diámetro y el contenido de humedad y cenizas del carbón obtenido.

Cuadro 9. Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de encino colorado, producido en horno de metal, variando el diámetro de la madera para carbonizar.

Diámetro (cms.)	Humedad (%)	Materias volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico Kcal/Kg. <u>1/</u>
5	2.56	23.02	2.04	74.95	8517
10	4.29	22.33	1.83	75.84	8519
15	2.53	21.75	2.11	76.14	8614
25	4.92	20.90	2.72	76.38	8541
35	2.77	20.63	2.39	76.98	8561
45	2.68	20.36	2.65	77.00	8533

1/ = Calculado a partir de la fórmula de Goutal ($PCs = (82C + AV)$).

En la figura 19 a, se muestra el incremento del porcentaje de carbono fijo del carbón de encino colorado, en función del diámetro de la madera, se establece que el porcentaje de carbono fijo es una variable dependiente de la variable diámetro.

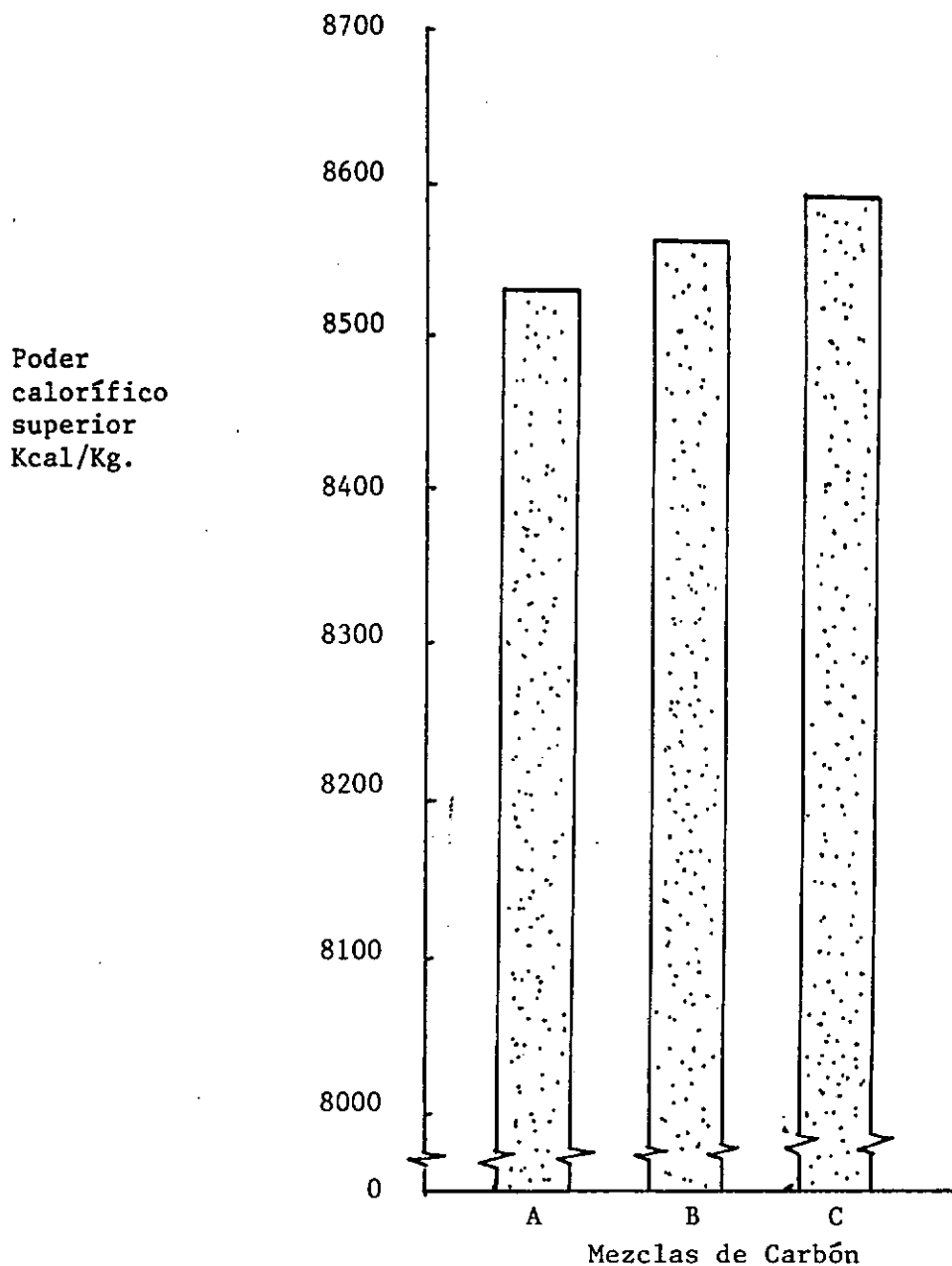


Figura 18. Comparación del poder calorífico superior de la mezcla de carbón de pino blanco, encino colorado, eucalipto y mangle colorado, producido en horno de metal y de ladrillo media naranja.

A = Mezcla de carbón de las 4 especies forestales, del horno de metal

B = Mezcla de carbón de las 4 especies forestales, del horno media naranja

C = Mezcla de carbón de las 4 especies forestales y de ambos hornos.

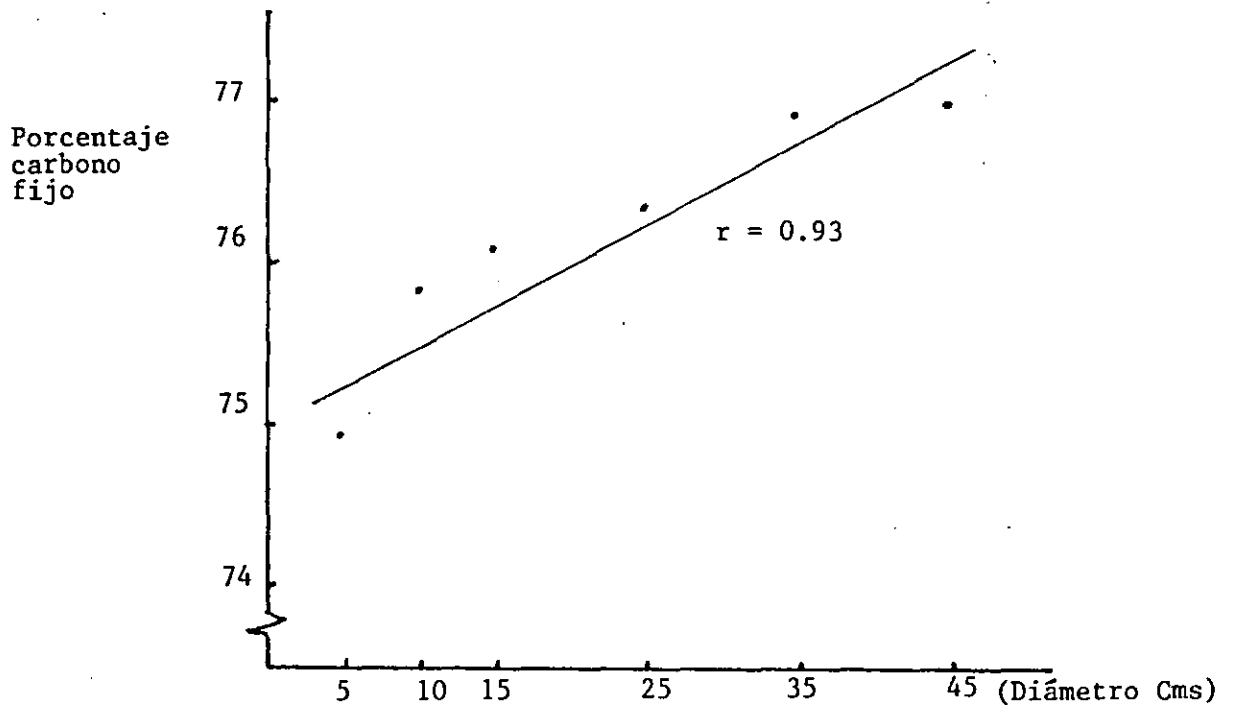


Figura 19 a. Variación del porcentaje de carbono fijo del carbón de encino colorado, en función del diámetro de la madera.

En la figura 19 b, se muestra el decremento del porcentaje de materias volátiles, de las muestras de carbón del cuadro 9. Se establece una relación inversa entre dicho porcentaje y el diámetro de la madera, con un alto grado de correlación.

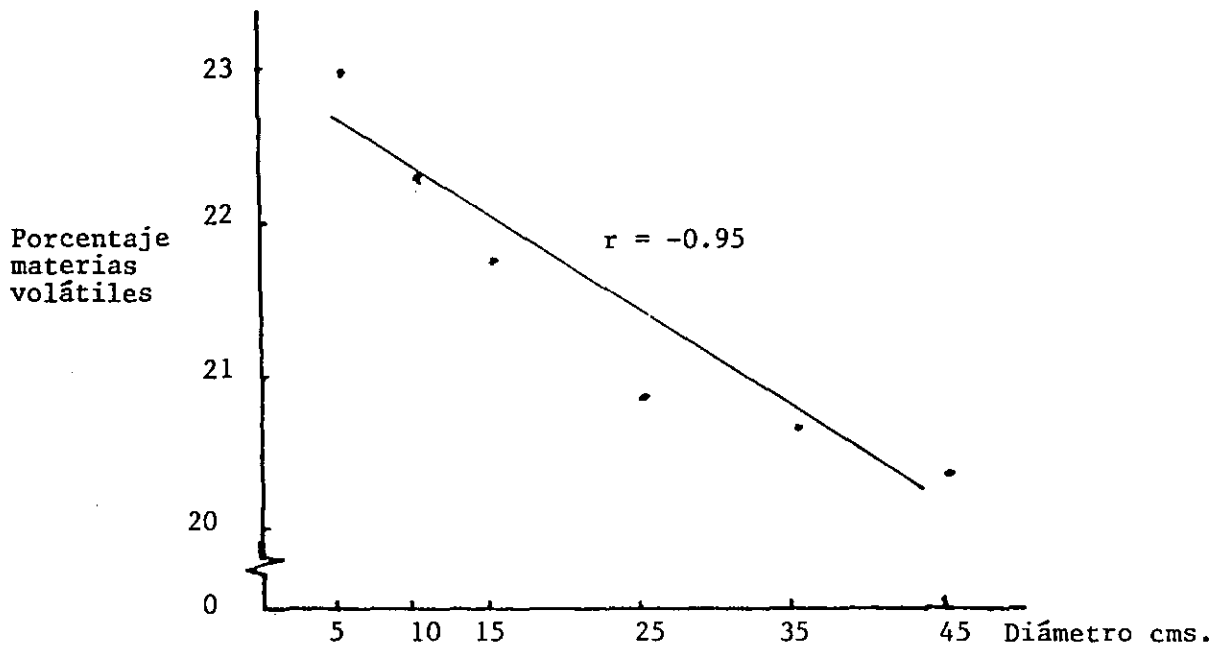


Figura 19 b. Variación del porcentaje de materias volátiles del carbón de encino colorado, en función del diámetro de la madera.

En el cuadro 10, se presentan los resultados del análisis gravimétrico del carbón de encino blanco, producido en horno de metal, variando el diámetro de la madera para carbonizar. Se observa un incremento en el contenido de carbono fijo de 74.15 a 76.19% y un decremento en el contenido de materias volátiles de 23.05 a 21.42% del carbón obtenido, al variar el diámetro de la madera de 5 a 45 cms. Además se estableció una dependencia con un alto grado de relación entre el porcentaje de carbono fijo y el diámetro (ver cuadro 14 a, del apéndice), sin embargo, no se estableció relación con el contenido de humedad y de cenizas.

Cuadro 10. Valores promedio del análisis gravimétrico del carbón de encino blanco, producido en horno de metal, variando el diámetro de la madera para carbonizar.

Diámetro Cms	Humedad (%)	Materias volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico Kcal/Kg. <u>1/</u>
5	4.17	23.05	2.81	74.15	8454
10	4.61	22.95	2.17	74.89	8505
15	4.27	22.41	2.38	75.22	8476
25	4.64	22.17	3.14	75.70	8491
35	4.90	21.42	2.77	75.82	8424
45	4.69	21.87	1.95	76.19	8500

1/ = Calculado a partir de la fórmula de Goutal
(PCs = (82C + AV)).

En la figura 20 a, se muestra el incremento del porcentaje de carbono fijo del carbón de encino blanco, en función del incremento del diámetro, estableciéndose una relación directa entre ambas variables.

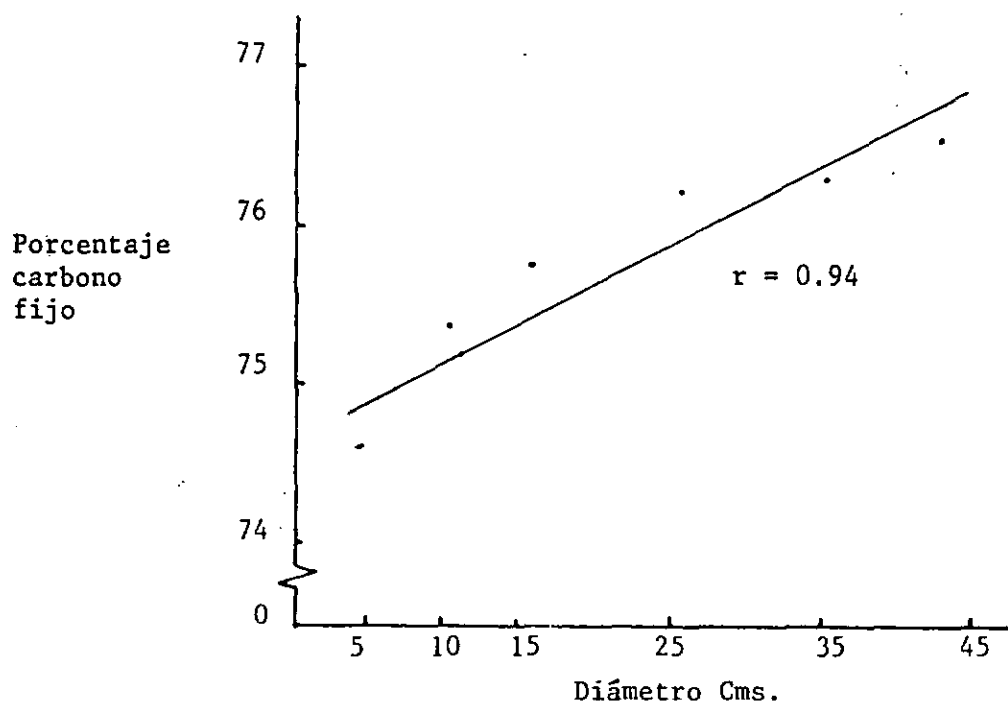


Figura 20 a. Variación del porcentaje de carbono fijo del carbón de encino blanco, en función del diámetro de la madera.

En la figura 20 b, se muestra el decremento del porcentaje de materias volátiles, presentado por el carbón de encino blanco en función de la variación del diámetro, estableciéndose una relación inversa entre ambas variables.

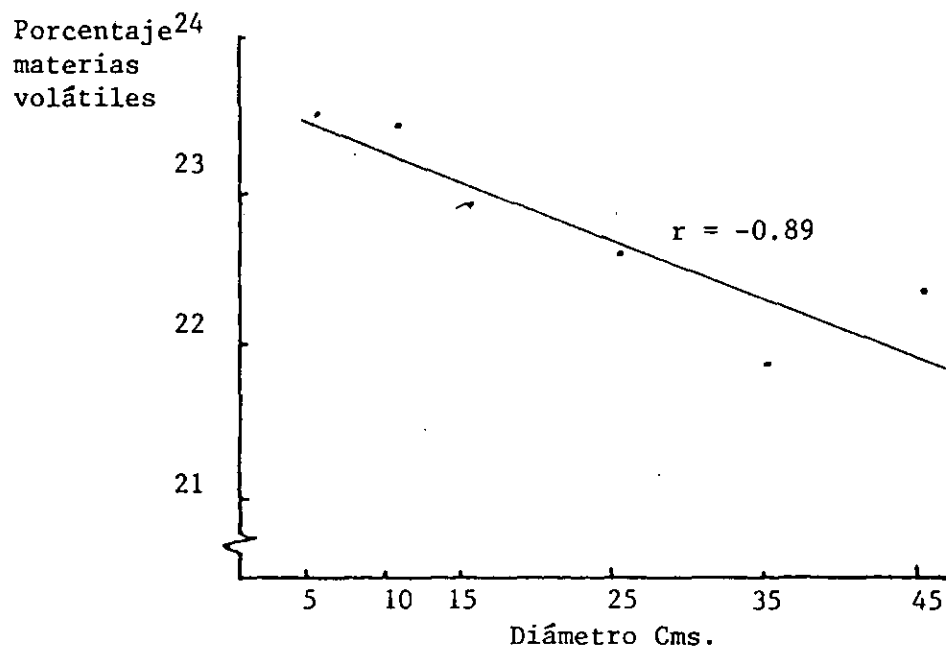


Figura 20 b. Variación del porcentaje de materias volátiles del carbón de encino blanco, en función del diámetro de la madera.

VIII. DISCUSION DE RESULTADOS

Discusión General:

Al referirse a la calidad del carbón vegetal, se deben de tomar en cuenta, no solo, características químicas, sino que también físicas. Dentro de las químicas tenemos los componentes del análisis químico (Porcentaje de Humedad, Porcentaje de Cenizas, Porcentaje de Materias Volátiles y Porcentaje de Carbono fijo).

De manera general, la variación en el contenido de humedad del carbón, se debe al contenido de humedad de la madera antes de carbonizarla y a las condiciones ambientales en que es expuesto el carbón.

La variación en el contenido de materias volátiles del carbón, se debe principalmente a la temperatura de carbonización que se alcanza en el interior del horno, a mayor temperatura, menor porcentaje de materias volátiles, según lo establecido por varios autores citados por Resende Penedo (14). Además se puede deber al alto contenido de componentes volátiles (celulosa y hemicelulosa) de la especie utilizada.

La variación en el contenido de cenizas del carbón vegetal, se debe principalmente al mal manejo del carbón, es decir, cuando se contamina con corteza semicarbonizada, con tierra, arena y con otros materiales inertes, sin embargo, el calor que reporta el carbón, es característica de la especie donde se produjo.

La variación en el contenido de carbono fijo del carbón vegetal, se debe principalmente a la temperatura de carbonización, predominante en el interior del horno. A mayor temperatura de carbonización, mayor contenido de carbono fijo, según varios autores citados por Resende Penedo (14). Además dicha variación se debe, a la variación en el contenido de lignina de la madera, es decir, a mayor contenido de lignina de la madera, mayor será el contenido de carbono fijo del carbón. Lo anterior se basa, en las conclusiones establecidas por Brito y Barrichelo, citados por Resende Penedo (14), reportan que cuando el valor de la lignina en la madera varía de 21 a 31%, el contenido de carbono fijo del carbón, varió de 74 a 78%, lo que nos indica que la variación en el contenido de lignina de la madera, influye en el contenido de carbono fijo del carbón.

La variación en el poder calorífico superior del carbón vegetal, calculado a partir de la fórmula de Goutal ($PCs = (82C + AV)$ Kcal/Kg. donde PCs = poder calorífico superior, C = porcentaje de carbono fijo, V = porcentaje de materias volátiles y A = coeficiente obtenido de la relación $V / (V + C)$) y del análisis

químico inmediato del carbón, se deba a la variación en el contenido de carbono fijo y de materias volátiles del carbón, y además de la variación en el contenido de cenizas, por lo tanto, si el porcentaje de carbono fijo y el de materias volátiles depende de la temperatura de carbonización, también el poder calorífico calculado con esta fórmula depende de dicha variable.

Lo anterior se basa en los experimentos realizados en la Fundación CETEC de Brasil (6) utilizando Eucaliptus grandis, a diferentes temperaturas concluyeron: Que cuando la temperatura fue de 300°C, el poder calorífico fue de 7070 Kcal/Kg., con temperatura de 500°C. el poder calorífico aumentó a 8157 Kcal/Kg., y con temperatura de 700°C. el poder calorífico disminuyó a 7659 Kcal/Kg. Además establecieron que el contenido de cenizas del carbón, tiene una relación inversa con el poder calorífico.

La variación en la calidad gravimétrica del carbón vegetal obtenido de una misma especie, pero en diferentes tipos de hornos como se puede apreciar en los cuadros 2, 3, 4 y 5; se debe a las características y manejo de cada horno. Así tenemos, que en el horno de metal se obtuvo carbón de mayor porcentaje de carbono fijo y menor porcentaje de materias volátiles por cada especie analizada, que el carbón obtenido del horno media naranja, probablemente porque, el horno de metal es más hermético y se alcanzó una mayor temperatura de carbonización, que en el otro horno.

La mala calidad gravimétrica, establecida para el carbón del horno de tierra, se debe al mal manejo del horno y del carbón, es decir, no se alcanzó la temperatura óptima de carbonización (+ 500°C), el carbón fue mojado al destapar el horno, además, se contaminó con corteza semicarbonizada, con tierra y con tizones.

La variación en la calidad gravimétrica del carbón vegetal presentada por las cuatro especies estudiadas, producido en cada uno de los tipos de hornos, como se puede ver en los cuadros 6 y 7, se debe principalmente a la influencia de las características de la especie sobre la calidad del carbón, dentro de estas características tenemos, el contenido de lignina y la densidad de cada especie..

El decremento en el contenido de materias volátiles y el incremento en el contenido de carbono fijo, mostrado tanto por el carbón de encino colorado, como por el carbón de encino blanco, en función del incremento del diámetro de la madera (ver cuadros 9 y 10) probablemente se deba a la variación del contenido de lignina, en función de la variación del diámetro de la madera de un mismo árbol.

IX. CONSLUSIONES

- 1- La calidad gravimétrica del carbón vegetal depende de: Las características físicas y químicas, de la especie forestal seleccionada, del tipo de horno utilizado y del manejo de dicho horno.
- 2- Dentro de los factores del manejo del hornos, que afectan directa o indirectamente la calidad del carbón estan: El tiempo que dura el proceso de carbonización, la temperatura de carbonización, la tasa de calentamiento del tipo de horno utilizado, la cantidad de aire que se deja entrar al horno, el momento indicado para apagar y para abrir el horno.
- 3- La diferencia entre la calidad gravimétrica del carbón vegetal producido a partir de las diferentes especies analizadas y en los distintos tipos de hornos utilizados, fue estadísticamente significativa. Por lo tanto se acepta la primera hipótesis propuesta, la cual se refiere a que existen diferencias significativas, respecto a la calidad gravimétrica del carbón vegetal obtenido de distintas especies forestales y producido en diferentes tipos de hornos.
- 4- La influencia del tipo de horno sobre la calidad gravimétrica del carbón vegetal, se debe principalmente al manejo de dicho horno.
- 5- Para este estudio en particular, el horno donde se produjo carbón de mejor calidad gravimétrica, para cada una de las especies analizada, fue el de metal.
- 6- La influencia de la especie forestal, sobre la calidad gravimétrica del carbón obtenido, se debe a las características químicas y físicas de cada especie.
- 7- El carbón que reportó mejor calidad gravimétrica, fue el que se obtuvo a partir de eucalipto, por ser una especie bastante densa, luego en su orden se ubican: El de pino blanco, el de mangle y el de encino colorado, utilizando el horno de metal. Sin embargo, en el horno de media naranja, las especies se ubican así: Mangle colorado, encino colorado, eucalipto y pino blanco.

- 8- La calidad gravimétrica de la mezcla del carbón vegetal, depende de: La calidad gravimétrica del carbón de cada una de las especies forestales, que constituyen dicha mezcla y además de la calidad del carbón que se obtiene en determinado tipo de horno.

- 9- El diámetro de la madera preparada para carbonizar, influye directamente sobre la calidad gravimétrica del carbón obtenido. Por lo tanto, se acepta la segunda hipótesis propuesta, la cual se refiere a que existe una relación directa entre el diámetro de la madera preparada para carbonizar y la calidad gravimétrica del carbón obtenido, mejorando su calidad, a medida que aumenta el diámetro.

X. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda utilizar hornos de ladrillo, en lugar de los de metal para la producción de carbón, ya que desde el punto de vista económico, la capacidad de producción instalada del horno de ladrillo media naranja es de Q 60.00/m³, en tanto que, la del horno de metal es de Q 260.00/m³, es decir, el horno de metal es aproximadamente cuatro veces más caro que el de ladrillo. Aunque el horno de ladrillo es de más difícil manejo, de mayor utilización de mano de obra para operarlo y no es móvil. Dicho horno es recomendable, no solo por su bajo costo en construcción, sino que manejándolo adecuadamente con personas capacitadas, produce carbón de buena calidad.

2. Se recomienda utilizar especies densas, no solo porque de dichas especies se obtiene carbón denso, sino porque además es carbón de buena calidad gravimétrica.

3. Dependiendo del destino que se le pretende dar al carbón vegetal, así será el diámetro recomendado de la madera para carbonizar.

Si el carbón se utilizara molido en algunas fábricas, se recomienda usar trozos de madera gruesos, para producir carbón bastante frágil y de fácil molienda, pero si el destino del carbón es la exportación, se recomienda carbonizar trozos de madera delgados, los cuales producen carbón bastante compacto.

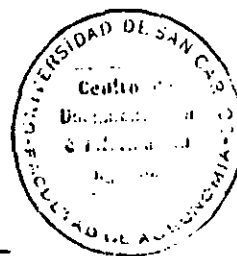
XI. BIBLIOGRAFIA

1. AGUILAR GIRON, J. I. Relación de unos aspectos de la flora útil de Guatemala. 2 ed. Guatemala, Tipografía Nacional, 1966. 382 p.
2. CARRILLO, A. El carbón vegetal como fuente de energía renovable en Guatemala. 7 Días en la USAC, Guatemala; octubre, 10-16, 1983:12.
3. CARVÃO VEGETAL; destilação, propriedades, carvoejamento e controle de qualidade. Belo Horizonte. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Serie de Publicações Técnicas, v. 1, no. 6. 1982. 173 p.
4. CHARCOAL PRODUCTION using a transportable metal kiln. London, Tropical Products Institute. Rural Technology Guide no. 12. 1980. s.p.
5. LAS CONIFERAS de Guatemala. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Informe Técnico no. 1. 1975. 45 p.
6. CURSO SOBRE carbón vegetal para centro américa, 1. Guatemala, Ministerio de Energía y Minas de Guatemala, OLADE/CETEC, 1983. v. 1, 286 p.
7. ESCOTO, M. y GRAHAM, M. Producción y características del carbón vegetal. In Congreso Nacional de Ingeniería de la Madera, 2 do, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 1981. Memorias. Costa Rica, 1981. pp. 384-422.
8. EU. SERVICIO FORESTAL. Carbón de leña; producción, venta y uso. México, Herrero, 1964. 167 p.
9. LOMA, J.L. DE LA. Experimentación agrícola. 2 ed. México, UTEHA, 1980. 493. p.
10. MARTINEZ, H. A. Algunas especies aptas para leña. Guatemala, INAFOR/CATIE, 1981. 44 p. Proyecto de Leña y Fuentes Alternas de Energía.
11. MORALES CALDERON, J. V. Importancia nacional del uso y manejo racional para la conservación del mangle (Rhizophora mangle) en el litoral del pacífico. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos, Facultad de Agronomía, 1979. 92 p.
12. OFICINA INTERNACIONAL DEL TRABAJO. Fabricación artesanal de carbón vegetal para la pequeña empresa. Ginebra, 1975. 26 p.
13. PENFOLD, A. R. y WILLIS, J. L. The eucalypts; botany, cultivation, chemistry and utilization. London, Leonard Hill, 1978. 111 p.

14. RESENDE PENEDO, W., comp. Uso de madeira para fines energéticos. Belo Horizonte. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Serie de Publicações Técnicas, v. 1, no. 6. 1980. 158 p.
15. _____, comp. Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Serie de Publicações Técnicas, v. 1, no. 8. 1982. 398 p.
16. ROOS, E. y ROOS, U. Survey of simple kiln systems and recommendations for the selection of kiln. German, Appropriate Technology Exchange, 1979. 31 p.
17. YOUNG, K. R. Guía de árboles para viveros forestales. Guatemala. INAFOR. Informe no. 1. 1980. 191 p.

Vo. Bo

Patruelle



XII. APENDICE

Cuadro 11. Análisis de varianza del contenido de carbono fijo (%) del carbón de encino colorado, producido en cuatro tipos de hornos, con base al diseño completamente al azar.

REPETICION	TIERRA A	METAL B	LADRILLO CON CA- MARA EXTERNA C	LADRILLO ME- DIA NARANJA D
I	60.67	75.84	74.57	76.36
II	60.96	75.89	74.35	76.21
III	60.81	75.84	74.37	76.28
IV	61.61	75.98	74.50	75.97
Yi.	244.05	303.55	297.79	304.82
$\bar{Y}_i.$	61.01	75.89	74.45	76.21

Cuadro 11 a. ANDEVA.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc.	Ft (0.01)
Tratamientos	3	637.84	212.61	3925.11**	5.95
Error	12	0.65	0.05		
Total	15	638.49			

Coefficiente de Variación = 0.31%

Cuadro 11 b. Comparación múltiple de medias "TUKEY"

		A	C	B	D
		61.01	74.45	75.89	76.21
D	76.21	15.20**	1.76**	0.32 ^{N.S}	--
B	75.89	24.88**	1.44**	---	
C	74.45	13.44**	---		
A	61.01	---			

Comparador

0.61

D		a
B		a
C		b
A		c

Cuadro 12. Análisis de varianza del contenido de carbono fijo (%) del carbón de las cuatro especies estudiadas, producido en horno de metal y de ladrillo media naranja. Diseño estadístico "Factorial 2 X 4, completamente al azar.

REPE- TICION	A ₁				A ₂			
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
I	83.58	75.84	83.88	80.00	73.62	76.36	75.71	78.35
II	82.69	75.89	83.45	79.29	73.96	76.21	75.54	77.78
III	82.62	75.84	83.73	79.28	74.16	76.28	75.66	77.97
IV	83.01	75.98	83.61	79.60	73.88	75.97	75.67	78.01
Y _{ij} .	331.90	303.55	334.67	318.17	295.62	304.82	302.58	312.11
Y _{ij} .	82.98	75.89	83.67	79.54	73.91	76.21	75.65	78.03

A₁ = Horno de Metal, A₂ = Horno Ladrillo Media Naranja
 B₁ = Q. pseudostrobus, B₂ = Q. sapotaefolia, B₃ = E. citriodora y
 B₄ = R. mangle

Cuadro 12 a. Cuadro adicional.

	A ₁	A ₂	Y.j.	Y.j.
B ₁	331.90	295.62	627.52	312.76
B ₂	303.55	304.82	608.37	304.19
B ₃	334.67	302.58	637.25	318.63
B ₄	318.17	312.11	630.28	315.24
Y _{i..}	1288.29	1215.13	2503.42	
$\bar{Y}_{i..}$	322.07	303.78		

Cuadro 12 b. ANDEVA

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc.	Ft (0.01)
Tratamientos	7	355.28	50.75	834.25**	3.50
A	1	167.26	167.26	2749.48**	7.82
B	3	57.24	19.08	313.64**	4.72
AB	3	130.78	43.59	716.55**	4.72
Error	24	1.46	0.06		
Total	31	356.74			

Coefficiente de Variación = 0.31%

Cuadro 12 c. Comparación múltiple de medias "TUKEY".

		A ₂ B ₁	A ₂ B ₃	A ₁ B ₂	A ₂ B ₂	A ₂ B ₄	A ₁ B ₄	A ₁ B ₁	A ₁ B ₃
		73.91	75.65	75.89	76.21	78.03	79.54	82.98	83.67
A ₁ B ₃	83.67	9.76	8.02	7.78	7.46	5.64	4.13	0.69**	--
A ₁ B ₁	82.98	9.07	7.33	7.09	6.77	4.95	3.44**	---	
A ₁ B ₄	79.54	5.63	3.89	3.65	3.33	1.51**			
A ₂ B ₄	78.03	4.12	2.38	2.14	1.82**	---			
A ₂ B ₂	76.21	2.30**	0.56 ^{N.S}	0.32 ^{N.S}	---				
A ₁ B ₂	75.89	1.98**	0.24 ^{N.S}	---					
A ₂ B ₃	75.65	1.74**	---						
A ₂ B ₁	73.91	---							

Comparador = 0.68

Presentación de Medias:

A ₁ B ₃	a
A ₁ B ₁	b
A ₁ B ₄	c
A ₂ B ₄	d
A ₂ B ₂	e
A ₁ B ₂	e
A ₂ B ₃	e
A ₂ B ₁	f

Cuadro 13. Análisis de regresión lineal del contenido de carbono fijo (en %) del carbón de encino colorado, en función del diámetro de la madera.

DIAMETRO Cms.	CARBONO FIJO (%)
5	74.95
10	75.84
15	76.14
25	76.38
35	76.98
45	77.00

Cuadro 13 a. ANDEVA

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc.	Ft (0.01)
Regresión	1	2.72	2.72	42.54**	21.20
Desviación	4	0.26	0.06		
Total	5	2.98			

Coeficiente de Regresión R² = 0.91

Coeficiente de Correlación r = 0.98

Cuadro 14. Análisis de regresión lineal del contenido de carbono fijo (en %) del carbón de encino blanco, en función del diámetro de la madera.

DIAMETRO Cms.	CARBONO FIJO (%)
5	74.15
10	74.89
15	75.22
25	75.70
35	75.82
45	75.19

Cuadro 14 a. ANDEVA.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc.	Ft (0.01)
Regresión	1	2.40	2.40	30.51**	21.20
Desviación	4	0.31	0.08		
Total	5	2.71			

Coefficiente de Regresión $R^2 = 0.88$

Coefficiente de Correlación $r = 0.94$

ANÁLISIS QUÍMICO INMEDIATO
(Según referencia 8)

1. Equipo:

- Molino a granel, para reducir la muestra.
- Estufa con control automático de temperatura, a 105°C. ± 1°C.
- Mufla con control de temperatura a 750°C. ± 5°C y 950°C. ± 5°C.
- Balanza analítica, con capacidad mínima de 100 gr. y sensibilidad de 0.1 grs.
- Desecador.
- Colador de 20 y 100 mallas U.S. Tyler.
- Crisoles de porcelana con dimensiones de 41 X 37 mm.
- Recipiente sellado para escoger las muestras.

2. Preparación de las Muestras:

Todas las muestras que se someterán al análisis gravimétrico se preparan bajo iguales condiciones, de la siguiente manera:

Para que el análisis tenga valor y sentido hay que escoger una muestra representativa, ésta selección puede hacerse de acuerdo con los métodos de la Sociedad Norteamericana para la Prueba de materiales (SNPM). Las muestras serán normalmente trozos o briquetas de carbón de leña secados al aire. Muestras mojadas por la lluvia o húmedas deben extenderse para que se sequen antes de analizarlas.

- Para determinar el contenido de humedad del carbón tal como se recibe, la prueba debiera triturarse para que pase por una criba gruesa, no. 20. Demasiada trituración produce pérdida de humedad.
- Si la cantidad de muestras es grande, se sugiere reducir todo el material hasta granulometría abajo de 2 mm. y luego esta porción es cuarteada, retirándose una cantidad suficiente para el análisis, retenida entre 20 y 100 mallas.
- Para cuerpos volátiles se necesita una muestra triturada con un molino Wiley no. 2 con cedazo de 1mm. y moler 300 grs. en menos de 5 minutos, evitar tiempos largos de molienda para no perder humedad y no producir partículas menudas, las cuales dan errores en el cálculo de volátiles. Partículas grandes dan valores bajos de materias volátiles, la muestra debe estar entre 20 y 100 mallas. La muestra molida debe guardarse en un recipiente sellado.

3. Etapas del análisis:

Los análisis se hacen por duplicado:

- Se necesita una mufla que controle temperaturas de 750 y 950° C. \pm 5°C. Caliéntese la mufla a 750°C. y colóquense crisoles de porcelana previamente calentados y tápanse durante 10 minutos.
- Los crisoles se enfrían en desecador durante 1 hora.
- Péseense los crisoles y anádase una mezcla exactamente pesada (hasta una décima de gramo) de carbón de 1 gramo.

3-1 Determinación de la humedad:

Pesar exactamente 1 gramo de muestra, colóquense en el horno estabilizado a 105°C. durante 2 horas y pesar (#).

(#): Se considerará suficientemente seca la muestra cuando la disminución de peso en pesadas consecutivas es de 0.0005 grs. o menos. Los sucesivos períodos de secado no serán menores de 1 hora.

3-2 Determinación de materias volátiles:

Caliéntese la mufla estabilizada a 950°C.

- Los crisoles, con las tapas puestas y conteniendo las muestras usadas para la determinación de la humedad, se calientan previamente del siguiente modo: Con la puerta de la mufla abierta deje el crisol durante 2 minutos en el anaquel superior (o sea, en el extremo externo de la mufla) (300°C.); y después 3 minutos en el borde (500°C.), luego introduzca para el interior de la mufla, cierre la puerta y espere 6 minutos (son convenientes cestillos individuales de alambre de micromo para manejo de los crisoles). Enfríe las muestras en el desecador por una hora y pese.
- Si hay chisporroteo los resultados serán erróneos. Si la muestra chisporrotea no comprueba los resultados de duplicado que no chisporrotea, dentro de más o menos 0.5% hay que repetir el análisis.

3-3 Determinar cenizas:

Colóquense las tapas y los crisoles con las muestras usadas, para determinar las materias volátiles, en la mufla a 750°C. durante 6 horas.

- Los crisoles tapados se enfrían por 1 hora en el desecador y se pesan.

4) Cálculo de los Componentes del Análisis Químico:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{A - B}{A} \times 100$$

A = peso inicial de la muestra, al aire

B = peso después de sacar de la estufa

Regístrense los resultados hasta la primera cifra decimal los valores de los duplicados deben de coincidir dentro de 0.1%

$$\% \text{ Materias Volátiles} = \frac{B - C}{B} \times 100$$

C = peso de muestra después de secar a 950°C

Los valores de duplicados deben de coincidir en 0.5%

$$\% \text{ de Cenizas} = \frac{D}{B} \times 100$$

D = peso del residuo después de la calcificación a 750°C.

Valores de duplicados deben coincidir en 0.1%

$$\% \text{ de Carbono Fijo} = 100 - (\% \text{ de Materias Volátiles} + \% \text{ de Cenizas}).$$

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE AGRONOMIA

Ciudad Universitaria, Zona 12.

Apartado Postal No. 1845

GUATEMALA, CENTRO AMERICA

Referencia.....
Asunto.....
.....

"IMPRIMASE"



ING. AGR. CESAR A. CASTAÑEDA S.

D E C A N O