

Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Secretaría de Investigación y Postgrado. Maestrías en Madera, Celulosa y Papel

Maestrando
Ernesto Osvaldo Sanabria

Optimización del proceso de producción de carbón vegetal

**Tesis de Maestría presentada para obtener el título de “Magíster en Ciencias de la Madera, Celulosa y Papel”
OTM**

Directora
Dra. Graciela Bolzón de Muñiz

Posadas, 1998



Esta obra está licenciada bajo Licencia Creative Commons (CC) Atribución-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES

**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN
DE CARBÓN VEGETAL”**

ERNESTO OSVALDO SANABRIA

**Tesis presentada a la Universidad
Nacional de Misiones como
Exigencia Parcial de la Maestría en
Ciencias de la Madera, Celulosa y Papel.**

Noviembre 1998

A mi padre (en memoria).

A mi madre, a mi hermano y su señora, a mis sobrinas, por el constante apoyo y aliento brindado durante la realización de esta Tesis.

A mi Abuela, que alguna vez me decía “... **hijo, pon un objetivo en tu mente y ve hacia él**”.

A Ely, mi novia.

AGRADECIMIENTOS

A mi Directora de Tesis, Dra. Graciela Inés Bolzón de Muñiz, por sus certeras sugerencias y atenta dedicación, en la orientación de este trabajo de tesis.

A la Universidad Nacional del Nordeste y por su intermedio, al Honorable Consejo Superior de esta Universidad, por brindarme la oportunidad de perfeccionarme en la Universidad Nacional de Misiones.

A la Universidad Nacional de Misiones, y por su digno intermedio a las Ingenieras: Graciela Gavazzo, María Cristina Area y Alicia Bohren; y a los Ingenieros: Obdulio Pereyra y Luis Delfederico, por atenciones y consejos durante el desarrollo de la Maestría.

A la Universidad Nacional de Santiago del Estero y por su intermedio a las Ingenieras: Silvia Velez y María Isabel Ruiz de Riveri y a la Arquitecta: Beatriz Cisneros.

A mis colegas de la Facultad de Agroindustrias, en especial al Dr. Alfredo Garro por su ayuda en la parte de Informática y en particular, a la Cátedra de Química Orgánica, y a todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido a la realización de este trabajo.

Por último y no por ello menos importante, a mis compañeros de Maestría, por la amistad brindada.

RESUMEN

La producción de carbón de residuos de aserraderos de la especie *Aspidosperma quebracho-blanco* en la provincia del Chaco, Argentina, se realiza por medio de hornos convencionales, tipo media naranja con un rendimiento en peso de carbón sobre base anhidra de aproximadamente un 25 %, siendo en el mejor de los casos de un 31 %, y con un rendimiento en carbono fijo de 74 %.

Por ello, el objetivo del presente trabajo, es inferir en una alternativa más eficiente del uso de residuos de aserraderos para optimizar por un lado el rendimiento en peso de carbón y por otro lado, el rendimiento en carbono fijo.

Para ello, se procedió a fabricar carbón por destilación seca, con los residuos provenientes de aserraderos y carpinterías de la provincia, en una Planta Piloto de Destilación Seca que consta de una retorta vertical con una capacidad de 50 kg de madera, con calefacción indirecta; condensador a aire y condensador a agua en contracorriente; medidor múltiple de temperatura conectado a termocuplas Tipo “K”.

Las destilaciones secas se realizaron de acuerdo a un diseño experimental compuesto controlando los siguientes parámetros, por un lado, variando la velocidad de calentamiento entre 60 °C/h y 120 °C/h y, por otro lado, variando la temperatura final de carbonización entre 450 °C y 550 °C.

Los residuos utilizados para la realización de las destilaciones secas así como los carbones obtenidos de las mismas fueron analizados por Normas IRAM referentes al tema. Esto es, Norma IRAM N° 9532 para determinar contenido de humedad en maderas y Normas IRAM N° 17005/6/7/13 para determinar el contenido de humedad, contenido de cenizas, materias volátiles y carbono fijo en carbón vegetal.

Los resultados obtenidos arrojan un rendimiento en peso de carbón, en base anhidra, del 48 % trabajando con una velocidad de calentamiento y temperatura final de carbonización bajas. Disminuyendo este rendimiento a un 36 %, cuando se realiza la destilación seca a velocidades de calentamiento y temperaturas finales de carbonización, altas. En lo que respecta a rendimiento en carbono fijo, se puede decir que el mismo se comporta de manera inversa en referencia a las variables antes mencionadas, pero siempre con un rendimiento superior al 82 %.

CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
CONTENIDO	v
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE FOTOS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	x
1 – INTRODUCCION	1
2 – MATERIALES Y METODOS.....	10
2.1 Delegaciones y oficinas forestales	10
2.2 Descripción y características de la materia prima.....	11
2.3 Descripción y características del equipo utilizado	12
2.4 Delineamiento estadístico	16
3 – RESULTADOS Y DISCUSION	19
3.1 Resultados de hornos media naranja	19
3.1.1 Análisis estadísticos de los resultados	21
3.2 Resultados de las destilaciones secas	22
3.2.1 Análisis estadístico de resultados – Rendimiento en peso de de carbón	27
3.2.1.1 Rendimiento en peso de destilación seca vs Rendi- miento en peso de hornos media naranja.....	29
3.2.2 Análisis estadístico de resultados – Rendimiento en carbono fijo	30
3.2.2.1 Rendimiento en carbono fijo de destilación seca vs Rendimiento en carbono fijo de hornos media naranja	32
3.3 Factibilidad de aplicación industrial	32
4 – CONCLUSIONES	35
BIBLIOGRAFIA	36

ANEXO 1	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE ZONAS FORESTALES DE LA PROVINCIA DEL CHACO	39
ANEXO 2	PRODUCCIÓN DE MADERA ROLLIZA POR DELEGACION FORESTAL.....	41
ANEXO 3	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN MADERAS – NORMA IRAM Nº 9532	43
ANEXO 4	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD, CENIZAS, MATERIAS VOLÁTILES Y CARBONO FIJO – NORMA IRAM Nº 17005, 17006, 17007 Y 17013, PARA CARBÓN VEGETAL	45
ANEXO 5	MARCHAS DE LAS DESTILACIONES SECAS.....	50

LISTA DE TABLAS

1.1 Rendimiento en peso de carbón en base anhidra	6
1.2 Rendimiento en peso de carbón en base anhidra <i>Macademia nut</i> Shell...	6
2.1 Delegaciones y oficinas forestales de la provincia del chaco.....	10
2.2 Rango de las variables independientes.....	18
3.1 Cálculo de contenido de humedad y madera anhidra	19
3.2 Rendimiento en peso de carbón por horno en base anhidra	20
3.3 Rendimiento en carbono fijo del carbón por horno media naranja.....	21
3.4 Contenido de humedad y madera anhidra del carbón de destilaciones secas.....	25
3.5 Rendimiento en peso de carbón de destilaciones secas en base anhidra..	25
3.6 Rendimiento en carbono fijo de destilaciones secas	26
3.7 Rango de las variables independientes y dependientes.....	26
3.8 1er. Análisis de varianza para rendimiento en peso.....	27
3.9 Análisis de varianza para rendimiento en peso.....	27
3.10 1er. Análisis de varianza de rendimiento en carbono fijo	30
3.11 Análisis de varianza de rendimiento en carbono fijo	31

LISTA DE FIGURAS

1.1 Destilación seca convencional vs Flash	4
1.2 Rendimiento en peso de carbón en función de la temperatura final	7
1.3 Carbono fijo en función de la temperatura final de carbonización.....	8
2.1 Diseño central compuesto.....	17
3.1 Marcha de temperaturas en destilación seca “ lenta ”	22
3.2 Marcha de temperaturas en destilación seca “ rápida ”	23
3.3 Comparación de destilación seca N° 3 y N° 4.....	24
3.4 Rendimiento en peso de carbón en base anhidra	28
3.5 Rendimiento en carbono fijo.....	31

LISTA DE FOTOS

2.1 Costaneros	11
2.2 Rechazos y despuntes.....	11
2.3 Retorta vertical y horno de calefacción.....	12
2.4 Etapa de condensación y control.....	13
2.5 Indicador múltiple	14
2.6 Extracción de la retorta del horno de calefacción.....	14
2.7 Carbón obtenido.....	15
2.8 Horno convencional tipo media naranja.....	15
3.1 Planta industrial de producción de carbón.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

A : Anualidad

C : Cuota

Carb. F. : Carbono Fijo

CH : Contenido de Humedad

CML : Marca registrada de Planta Industrial de destilación seca

Cont. C : Contenido de Cenizas

ed : edición

F : Valor Futuro

GL : Grados de Libertad

h : hora

IRAM : Instituto Argentino de Racionalización de Materiales

I.U.F.R.O. : Internations Union of Forestry Research Organization

M. Vol. : Materias Volátiles

pp : página

TIR : Tasa Interna de Retorno

U.S.A. : United State of America (Estados Unidos de América)

vs : versus

1 - INTRODUCCION

Obtener beneficios de recursos forestales, ha sido y es la constante del desarrollo económico del hombre sobre la Tierra. Si además se consigue que estos beneficios contribuyan a revalorizar ecosistemas de un gran valor ecológico, como es el bosque, llegamos a la conclusión evidente de que toda actividad que obtenga beneficios económicos y revalorice estos ecosistemas adquiere importancia y debe ser estudiada, siendo la producción de carbón una de estas actividades.

El carbón vegetal obtenido, debe potenciar y revalorizar estos ecosistemas.

Pueden ser varias las definiciones de carbón vegetal que se pueden citar, pero una de las más acertadas y quizás más antigua, es según la cual, el carbón vegetal es el producto de la combustión incompleta de la madera (1).

Decir que el carbón vegetal es “ un combustible de color negro y sólido con mayor poder calorífico que la madera ” para poder diferenciarlo de la misma, sería faltar a la verdad, porque la diferencia radica en que aparte de su apariencia física que es muy distinta, el carbón vegetal tiene mayor contenido en carbono fijo que la madera, por lo que su poder calorífico es mayor y es mejor combustible que ésta. Otra gran diferencia es que el carbón vegetal es inerte, difícilmente alterable con las condiciones atmosféricas normales y no es atacado por agentes biológicos, hongos y agentes xilófagos, que atacan la madera.

Hasta ahora hemos visto qué es el carbón, pero, ¿ cómo se obtiene? Cuando la madera es sometida a la acción del calor con temperaturas elevadas y en presencia de cantidades controladas de aire, sufre un proceso de transformación denominado carbonización, en el cual todos sus componentes son modificados, desprendiendo productos, como ser, vapor de agua, gases condensables y gases no condensables, quedando como residuo el carbón. Ahora bien, cuando el proceso de obtención de carbón se realiza en ausencia completa de aire y con la recuperación de los productos de la carbonización, entendiéndose por ello la condensación de los gases condensables y utilización de los gases no condensables, el proceso se da en llamar destilación seca de la madera (2).

En los procesos de producción de carbón convencionales se produce, internamente, la quema de una parte de la madera introducida en el horno porque está presente, aunque de manera controlada, el oxígeno del aire. Este carbón se produce desde antaño y hasta nuestros días en hornos o carboneras de tierra, hornos metálicos

y hornos de albañilería, que pueden ser, hornos con paredes cilíndricas y techo abovedado y hornos abovedados, conocidos también en nuestra región, como hornos media naranja. En estos hornos, la temperatura del proceso de carbonización se podría decir que es incontrolable y por consiguiente, las calidades de los carbones obtenidos y los rendimientos en peso, son muy heterogéneos (3, 4).

Análogamente, en los procesos de destilación seca de la madera (continuos y no continuos), el calor necesario para transformar la madera en carbón es suministrado externamente. De esta manera la temperatura del proceso de carbonización es controlada y como además no hay oxígeno, se observa un mayor índice de transformación de la madera en carbón, por consiguiente, las calidades de los carbones y los rendimientos en peso, son mejores y más homogéneos.

Esta industria, destilación seca de madera, surgió con el nombre de destilación de madera, en sus comienzos, y se la utilizaba principalmente para producir compuestos químicos, tales como: metanol, ácido acético, acetona, terpenos, fenoles y alquitranes de madera (5).

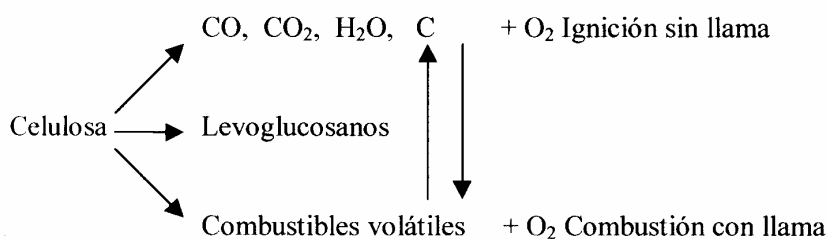
Describiendo el proceso de destilación seca de madera en forma general, podríamos decir (6):

- Entre los 150 ° C – 200 ° C: ocurre la vaporización, en forma mecánica, del agua ligada a la madera.
- Entre los 200 ° C – 280 ° C: se produce la liberación de monóxido y dióxido de carbono, acompañada de una pequeña cantidad de vapores condensables que contienen ácido acético y metanol.
- Entre los 280 ° C – 380 ° C: se inicia la reacción exotérmica de descomposición de la madera. Durante esta fase los gases oxigenados desaparecen en beneficio del hidrógeno. La formación del ácido piroleñoso llega a su máximo.
- Entre los 380 ° C – 500 ° C: se entra en la fase de disociación del carbón. La liberación de hidrocarburos aumenta hasta los 500 ° C y se obtiene una cantidad importante de destilado (7).
- Encima de los 500 ° C: los hidrocarburos son sustituidos por el hidrógeno.

Diversos investigadores explican que la madera, como material celulósico, se descompone térmicamente mediante complejas reacciones químicas, acopladas con procesos de transferencia del calor y masa. La composición heterogénea de los

materiales descompuestos y las posibles interacciones entre los distintos componentes hacen que las reacciones se compliquen y que la química de la pirólisis no sea actualmente bien comprendida (8).

Para la celulosa se puede esquematizar la pirólisis de la siguiente manera:



Estas reacciones de pirólisis, que inciden directamente sobre el material celulósico se denominan reacciones primarias, llamándose secundarias, a las reacciones que descomponen algunos de los tres grupos de productos intermedios formados (por ejemplo, degradación de levoglucosanos o de productos volátiles).

Análogamente, la madera es descompuesta de la siguiente manera: las hemicelulosas son degradadas en un rango de temperaturas de $200^\circ\text{C} - 260^\circ\text{C}$, la celulosa en un rango de $240^\circ\text{C} - 350^\circ\text{C}$ y la lignina en un rango de $280^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$ (9).

Otro proceso de destilación seca de la madera, es la destilación seca flash. En este proceso se introducen astillas de madera anhidra (entre 50 g y 100 g, aproximadamente) a un reactor de cuarzo, calefaccionado por resistencias eléctricas, y se lo somete a un calentamiento que oscila entre 700°C y 1000°C . Este proceso dura segundos, mientras que la descrita anteriormente, dura aproximadamente unas 10 horas a 12 horas.

La destilación seca tipo flash, si bien tarda mucho menos tiempo, tiene el inconveniente de que los rendimientos en peso de carbón son mucho menores.

Esto se puede apreciar en el figura 1.1, donde se ven los rendimientos en peso de carbón sobre base anhidra de cada uno de los dos procesos de destilación seca (10).

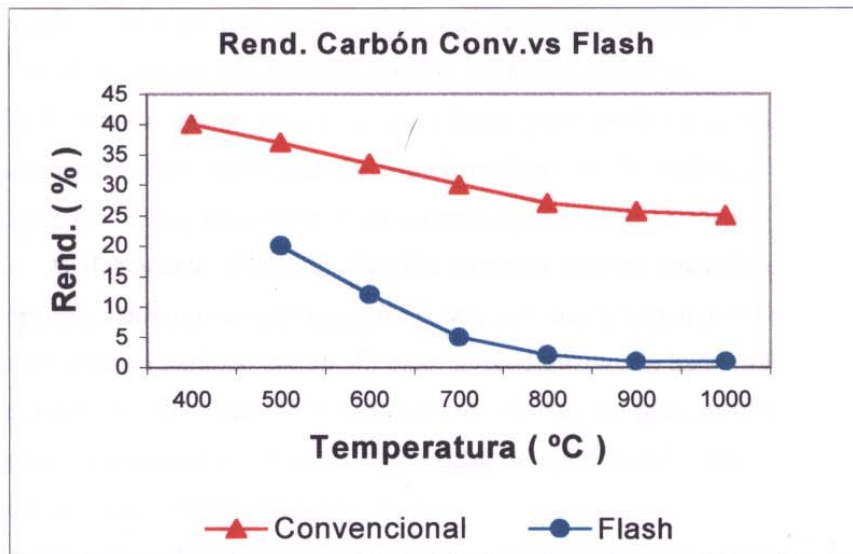


Figura 1.1: Destilación seca convencional vs Flash

Lo anteriormente citado sirve por un lado, para explicar la extremada sensibilidad que presentan los productos de la pirólisis con respecto al tipo de materia prima utilizada y por otro lado, al tipo de proceso de fabricación de carbón y su control. Entonces el carbón obtenido por destilación seca, puede variar en sus propiedades, dependiendo de la densidad la madera y de la temperatura final de carbonización que se adopte y de la velocidad de carbonización.

El rendimiento de carbón en base anhidra en hornos convencionales es de aproximadamente de 20 % y en instalaciones modernas es posible alcanzar un 40 % de rendimiento en peso utilizando los gases producidos como elemento secundario de calefacción, de esta manera se utiliza mejor la energía térmica liberada en el proceso (11).

Por otra parte, la producción de carbón en hornos convencionales tarda alrededor de 20 a 30 días y los gases producidos durante la carbonización no son recuperados y tienen mucha energía que podría ser utilizada. Los rendimientos de carbón de este tipo de horno es del 15 % al 20 % sobre base anhidra y este rendimiento puede ser llevado a un 30 % - 35 %, con un mejor diseño del horno, con un control de la velocidad de calentamiento dentro del mismo y con una temperatura final de calentamiento adecuada (12).

Tomando en consideración lo citado en el párrafo anterior, *Aspidosperma quebracho-blanco* es una madera dura que tiene una densidad $0,87 \text{ gr/cm}^3$ y sería una excelente madera para producir carbón. De hecho, la misma está siendo utilizada en la Argentina, en la provincia del Chaco, para producir carbón, en hornos convencionales tipo media naranja, con un rendimiento de carbón en base anhidra, del orden del 32% y un porcentaje de carbono fijo del 74%(13, 14).

Análogamente, el carbón obtenido en forma convencional, de especies como por ejemplo, *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth, con una densidad de $0,86 \text{ gr/cm}^3$ tiene un porcentaje en carbono fijo de 73 % y un rendimiento en base anhidra de 26 %; *Acacia caven* Mol tiene un rendimiento de carbón en base anhidra del 26 % y *Atriplex mummularia* Lindl, con una densidad de $0,89 \text{ gr/cm}^3$, tiene un rendimiento en base anhidra del 25 %, (15, 16 y 17).

El carbono fijo de la especie *Anadenanthehera macrocarpa* Benth, de densidad $0,98 \text{ gr/cm}^3$ es de aproximadamente 70 % (18).

Si comparamos estos valores de rendimiento en peso y carbono fijo, obtenidos en hornos convencionales, con los obtenidos mediante destilaciones secas de distintas especies forestales, tenemos:

El carbón de *Eucalyptus grandis*, W. Hill ex Maiden, con una densidad de $0,50 \text{ g/cm}^3$, obtenido mediante destilación seca de madera con temperaturas finales de carbonización $450 \text{ }^\circ\text{C}$ y $525 \text{ }^\circ\text{C}$ tienen rendimientos en peso de carbón sobre base seca de 32,79 % y 30,05 % respectivamente. Análogamente, este carbón tiene un porcentaje de carbono fijo para estas condiciones de 76,42 % y de 80,34 %, respectivamente. La velocidad de calentamiento fue constante, $100 \text{ }^\circ\text{C/hora}$ (19).

El carbón de *Prosopis juliflora* DC, obtenido mediante destilación seca de madera en un horno de calefacción eléctrica, a una velocidad de calentamiento de $678 \text{ }^\circ\text{C/h}$ y con una temperatura final de carbonización de $450 \text{ }^\circ\text{C}$ y $550 \text{ }^\circ\text{C}$, tiene un rendimiento en base anhidra de 33,09% y 30,79%, respectivamente. Análogamente, el carbono fijo para estas condiciones es de 80,47% y 86,53%, respectivamente (20).

Según Fengel, D., Wegener, G., el rendimiento práctico de carbón producido industrialmente es del 35 %, y depende de la especie de madera con la que se esta trabajando, las condiciones del proceso y la temperatura final que se alcanza en el mismo. Este mismo autor indica que los valores carbono fijo están entre 80 % y 90 % respectivamente (21).

Por otro lado el rendimiento en peso de carbón en base anhidra por

destilación seca para maderas como por ejemplo, Abedul, Haya y Olmo, son de 39,01 %, 37,04% y 40,07 % respectivamente, y para Roble, un rendimiento de hasta un 49,5 %. Hay que destacar que las densidades de la tres primeras se encuentra entre 0,63 gr/cm³ y 0,68 gr/cm³, mientras que para el Roble es de 0,81 gr/cm³ (22).

El carbón de *Eucalyptus grandis*, obtenido a partir de destilación seca de madera, trabajando a 300 °C, 500 °C y 700 °C de temperatura final de carbonización da rendimientos en peso de 42 %, 33 % y 30 % respectivamente (23).

El carbón de *Mimosa hostilis* Benth, obtenido a partir de destilación seca de madera trabajando con una velocidad de calentamiento de 300 °C/h y una temperatura final de 400 °C y 550 °C, tienen un rendimiento de 43,40 % y 37,13 %. Análogamente los rendimientos en carbono fijo son de 73,75 % y 88,75 %, respectivamente (24).

El carbón producido por destilación seca de residuos de madera de la especie *Acacia mearnsii*, de densidad 0,79 gr/cm³, tiene un rendimiento en base anhidra de 33,2 % (25).

El carbón obtenido por destilación seca de *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala* y *Gmelina arborea*, con temperaturas finales de carbonización de 280 °C, 300 °C, 320 °C y 340 °C, decreció en términos de rendimiento en peso, a medida que aumentaba la temperatura. Los rendimientos promedios para las tres especies se indican en la tabla 1.1 (26).

Tabla 1.1: Rendimiento en peso de carbón en base anhidra

Temperatura Final (° C)	280	300	320	340
Rend. Carbón b/anhidra (%)	46,2	36,6	31,3	24,7

El rendimiento de carbón en base anhidra, en destilación seca, se puede aumentar trabajando con presión (MPa) dentro de la retorta. Se observa que para la especie *Macademia nut* Shell, aumenta el rendimiento en peso de carbón a medida que aumenta la presión efectiva dentro de la retorta, tabla 1.2 (27).

Tabla 1.2: Rendimiento en peso de carbón en base anhidra – *Macademia nut* Shell

Presión en la retorta (Mpa)	0,4	0,7	1,0	3,3
Rend. Carbón b/anhidra (%)	40,5	40,2	44,4	51,0

Para *Schinopsis balansae*, de densidad $1,16 \text{ gr/cm}^3$, el carbono fijo es de 86,75 % y en *Aspidosperma quebracho-blanco* es de 86,43 %, con un rendimiento en peso de carbón en base anhidra de 43,4% y 32 %, respectivamente; ambos obtenidos por destilación seca de madera con un incremento de temperatura de $1,06 \text{ }^\circ\text{C}$ por minuto y una temperatura final de $500 \text{ }^\circ\text{C}$ (28).

De manera general, se puede decir que el rendimiento en peso de carbón disminuye cuando se aumenta la temperatura final de carbonización, figura 1.2, (29).

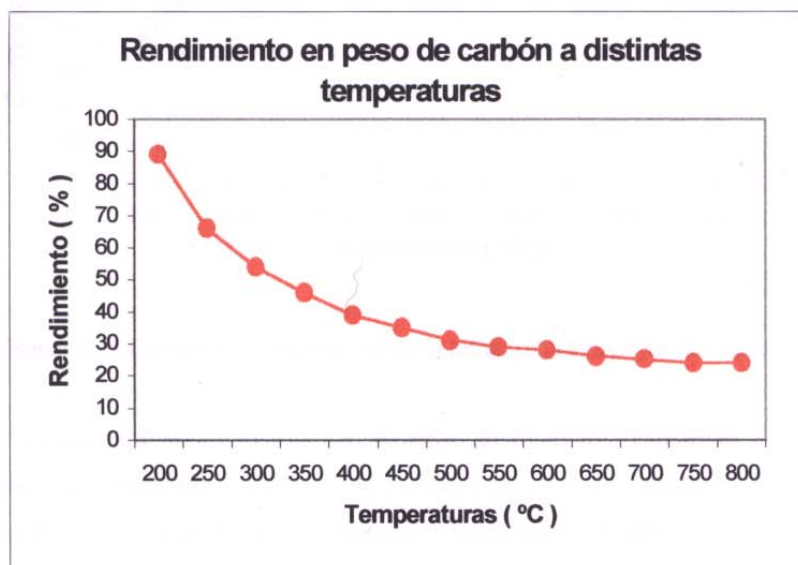


Figura 1.2: Rendimiento en peso de carbón en función de la temperatura final

Por otro lado, el rendimiento en carbono fijo se comporta de manera inversa al rendimiento en peso, esto es, a medida que aumenta la temperatura final de carbonización, su porcentaje aumenta, figura 1.3. (30).

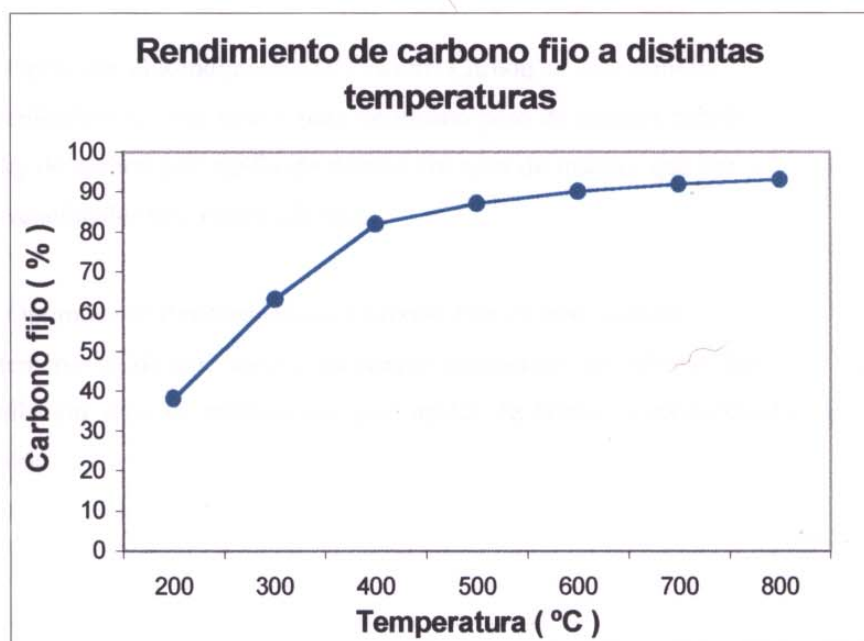


Figura 1.3: Carbono fijo en función de la temperatura final de carbonización

Como podemos observar los mayores rendimientos de carbón, ya sea en carbono fijo y rendimiento en peso de carbón, para distintas especies, se producen por destilación seca de madera trabajando a temperaturas finales y velocidades de calentamiento bajas. De esta manera, al poder controlar las condiciones del proceso de carbonización se homogeneizará el rendimiento y la calidad del carbón, y se podrá cumplir con la normativa francesa B-55-101, de comercialización de carbón, que estipula que el carbón vegetal de categoría “ A ” ha de tener, al menos, un 82 % de carbono fijo, con una tolerancia de $- 2$, y el de categoría “ B ” un 75 %, con una tolerancia de $- 2$ (31).

Por ello, los objetivos de la tesis con la especie *Aspidosperma quebracho-blanco*, para producir carbón por medio de la destilación seca de la madera son:

Objetivo General

- Inferir alternativa de uso de residuos más eficiente.

Objetivos Específicos

- Optimizar el Rendimiento en Peso del Carbón en base anhidra.

Obteniéndose de este modo, para un mismo peso de madera anhidra, un mayor peso en kg de carbón por medio de destilación seca de madera que por medio de hornos convencionales tipo media naranja.

- Optimizar el Rendimiento en Carbono Fijo en base anhidra.

Obteniéndose de este modo, un mayor porcentaje de carbono fijo, por medio de destilación seca de madera que por medio de hornos convencionales tipo media naranja.

2 - MATERIALES Y METODOS

La materia prima que se utilizó para la realización de las destilaciones secas de madera es *Aspidosperma quebracho-blanco* proveniente de los aserraderos y carpinterías de la provincia del Chaco.

2.1. Delegaciones y oficinas forestales

Esta especie proviene de las nueve delegaciones forestales en que está dividida la provincia del Chaco y que comprenden los siguientes departamentos:

Tabla 2.1: Delegaciones y oficinas forestales de la provincia del Chaco

Delegación	Localidad	Oficinas Forestales	Dep. Jurisdiccionales
Zona I	Resistencia	-----	San Fernando, Tapenaga, Gral. Donovan, Libertad, 1° de Mayo
Zona II	Charata	Las Breñas, Gral. Pinedo, Corzuela	12 Octubre, Chacabuco, 9 de Julio, Gral. Belgrano
Zona III	Pcia. R. Sáenz Peña	Campo Largo, Tres Isletas, Avia Terai	Cte. Fernández, Maipú, Independencia
Zona IV	Lib. Gral. San Martín	Pampa del Indio	Bermejo, Gral San Martín Sto. Cabral
Zona V	Pampa del Infierno	Concep. Del Bermejo, Los Frentones	Almirante Brown Zona B, C y D
Zona VI	Taco Pozo	-----	Almirante Brown Zona E, F y G
Zona VII	Juan José Castelli	-----	Gral. Güemes
Zona VIII	Machagay	Pcia. De la Plaza, Quitilipi, Colonias Unidas	Pcia. De la Plaza, 25 de Mayo, Quitilipi
Zona IX	Villa Angela	La Tigra, La Clotilde, Villa Berthet	Mayor J.L. Fontana, Sta. María de Oro, O'Higgins, San Lorenzo

Fuente: Ministerio de la Producción – Dirección de Bosques 22/04/98

En el Anexo 1 se detalla la distribución geográfica de las zonas forestales y departamentos jurisdiccionales de la provincia del Chaco, Argentina.

2.2. Descripción y características de la materia prima

La especie tiene una aprovechabilidad cuando es aserrada, de hasta un 50 %, dependiendo del tipo de piezas que se extraigan del rollo. O sea que, para la producción de carbón se utilizaría aproximadamente, descontando un 10 % de producción de aserrín y virutas, un 40 % (32).

Se puede observar en las fotos 2.1 y 2.2 los costaneros, rechazos y despuntes utilizados por los productores para la producción de carbón. Como se observa en la foto 2.2, los rechazos corresponden a trozos de rollos enfermos, atabacados, base de horquetas en un tramo del fuste.



Foto 2.1: Costaneros



Foto 2.2: Rechazos y despuntes

Si tomamos en cuenta la producción de madera rolliza para esta especie, se tendría una media anual de 32.590 toneladas de madera con las que se podría producir carbón.

En el Anexo 2 se detalla la producción, por delegación forestal, de madera rolliza en la provincia del Chaco.

2.3. Descripción y características del equipo utilizado

Los equipos utilizados para producir carbón por destilación seca, son: un horno de calefacción, foto 3, de 1,45 metros de altura, con aristas de 1,05 metros y 1,10 metros, recubierto interiormente con ladrillos refractarios. Dentro de este horno se introduce una retorta vertical, foto 2.3, discontinua, con una capacidad de aproximada 50 Kg de madera, de 85 cm de altura y 65 cm de diámetro útil, de acero inoxidable ASI 304, con un caño de salida para gases condensables y no condensables de 10 cm de diámetro interno. La tapa de la retorta, también de acero inoxidable ASI 304, posee una termocupla tipo “ K ” para medir la temperatura de la retorta. Para evitar la pérdida de gases entre la tapa y la retorta se utilizó una junta de amianto grafitado resistente a altas temperaturas.



Foto 2.3: Retorta vertical y horno de calefacción

Los gases producidos durante la destilación seca son conducidos a la etapa de condensación y control, foto 2.4, que consta de: un ciclón, de aleación acero inoxidable – aluminio, de 30 cm de diámetro por 60 cm de altura, luego los gases son conducidos por un caño de 5 cm de diámetro, a un condensador de agua en contracorriente con los gases de la destilación, de 1 metro de alto por 0,60 metros de diámetro, cuya capacidad es de 280 litros. El agua de refrigeración es impulsada por

una bomba centrífuga de baja presión desde un tanque pulmón de 3000 litros y es recirculada continuamente.

Los gases condensados, líquido piroleñoso, ingresan a un separador líquido-gas de 5 litros de capacidad, donde son extraídos y los gases no condensables salen del separador e ingresan a un lavador de gases, en contracorriente, para posteriormente ser medidos, en un medidor de gases. Luego del medidor de gases, son desechados a la atmósfera.



Foto 2.4: Etapa de condensación y control

La marcha de la destilación es controlada, como ya fue dicho, por termocuplas tipo “K” ubicadas en la retorta, a la entrada del ciclón y a la salida de este, de manera de poder seguir las temperaturas del proceso. Estas termocuplas tienen un rango efectivo de medición entre 0°C y 1260°C , y están conectadas a un indicador múltiple con capacidad para 6 termocuplas, foto 2.5.



Foto 2.5: Indicador múltiple

Cuando la destilación ha concluido y la temperatura de la retorta descendió lo suficiente, hasta aproximadamente 30 °C, es retirada del horno de calefacción mediante un aparejo eléctrico automático, foto 2.6.



Foto 2.6: Extracción de la retorta del horno de calefacción

Una vez que ha sido retirada la retorta del horno de calefacción se procede a abrir la misma para extraer el residuo, carbón, para el análisis respectivo, foto 2.7.



Foto 2.7: Carbón obtenido

La industria carbonera en la provincia del Chaco produce carbón en hornos convencionales tipo media naranja, foto 2.8. . Estos hornos tienen unas dimensiones que varían entre 5 y 7 metros de diámetro interno y una altura que va desde 2,50 metros a 3,50 metros, con un volumen real que va desde 33 m³ a 90 m³. De esta manera se introducen aproximadamente 12 toneladas de madera en los hornos chicos y 33 toneladas de madera en los grandes, con un contenido de humedad que varía desde el 44 % al 62 %.



Foto 2.8: Horno convencional tipo media naranja

De los departamentos jurisdiccionales que producen carbón de la especie *Aspidosperma quebracho-blanco* se tomaron aleatoriamente a 16 hornos de productores distintos de carbón. Cuando estos hornos se cargaban con madera se extraían muestras representativas de la misma para determinar el contenido de humedad según la Norma IRAM N° 9532, Anexo 3, y se tomaban los pesos en toneladas de madera que se introducía al mismo, para luego con estos datos, determinar el peso de madera en base anhidra. Transcurrido el tiempo de 19 días, tiempo promedio de producción de carbón en estos hornos, se tomó el peso en toneladas que había producido cada uno de los 16 hornos y se extrajeron las muestras respectivas de carbón para determinar el contenido de humedad, contenido de cenizas y materias volátiles, y con ellos determinar el carbono fijo. Estas determinaciones se hicieron según las Normas IRAM para carbón N° 17005, N° 17006, N° 17007 y N° 17013 respectivamente, Anexo 4.

De esta manera se obtuvo, para cada horno, el rendimiento en peso y el rendimiento en carbono fijo en base anhidra. Con ellos se determinó, mediante estadística descriptiva, la media y desviación estándar, en términos de rendimiento en peso y en términos de rendimiento en carbono fijo.

Estos valores sirven para observar en cuanto, la destilación seca de madera, mejora los rendimientos en peso y en carbono fijo.

2.4 Delineamiento estadístico

Para observar como influyen las variables del proceso de destilación seca, temperatura final y velocidad de calentamiento, en el rendimiento en peso y en carbono fijo, se adoptó un Diseño Central Compuesto, C.C.D., con tres repeticiones en el punto central para estimar el error interno, o sea del proceso.

Un diseño experimental es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida (33).

De esta manera tendremos dos variables de entrada, variables independientes, que serán:

- * Temperatura final de carbonización entre 450 °C y 550 °C**
- * Velocidad de calentamiento entre 60 °C/hora y 120 °C/hora**

y dos respuestas de salida, variables dependientes, que serán:

*** Rendimiento en carbono fijo**

*** Rendimiento en peso de carbón en base anhidra**

El diseño conformado con estas variables, dependientes e independientes, demuestra que se tienen que realizar 11 destilaciones secas, donde el rango de las variables independientes queda conformado como se observa en la figura 2.1. . La misma indica con qué velocidad de calentamiento y con qué temperatura final de carbonización se deben realizar las 11 destilaciones secas, para así poder determinar cual de las variables independientes influye en mayor medida en las respuestas obtenidas, o si solamente una de ellas es la que influye en las respuestas obtenidas (34).

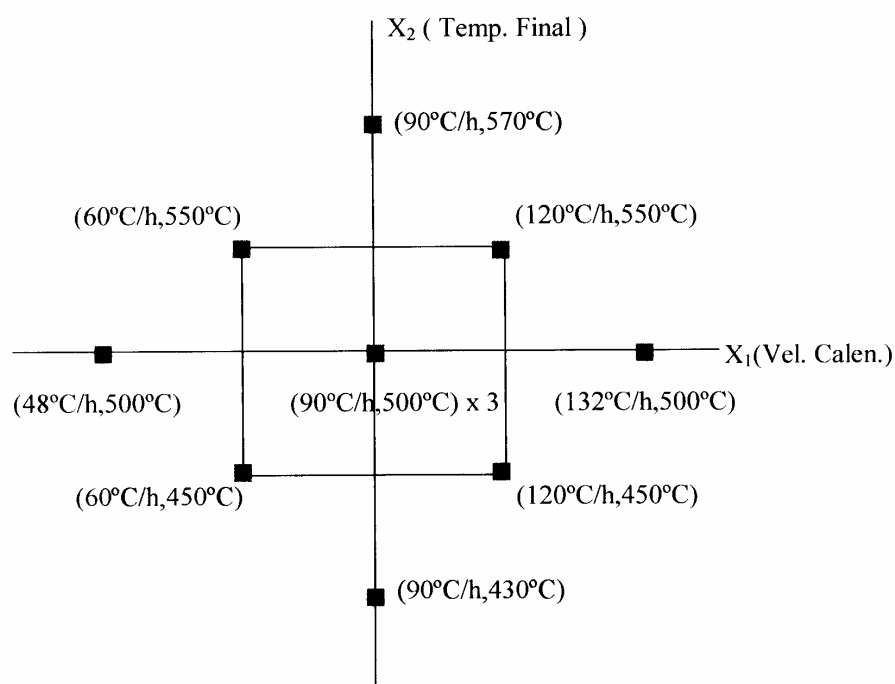


Figura 2.1: Diseño central compuesto

Los rangos de las variables independientes y las tres repeticiones en el punto central, del diseño experimental adoptado, se observa en la tabla 2.2 .

Tabla 2.2: Rango de las variables independientes

N°	Temp. Final	Veloc. de Carb.	Respuestas	
			Carbono Fijo	Rend. de Carbón
1	- 1	+ 1		
2	+ 1,4142	0,0		
3	0,0	- 1,4142		
4	0,0	1,4142		
5	+ 1	- 1		
6	- 1	- 1		
7	- 1,4142	0,0		
8	+ 1	+ 1		
9	0,0	0,0		
10	0,0	0,0		
11	0,0	0,0		

3 - RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Resultados de hornos media naranja

Los resultados obtenidos, para determinar el rendimiento en peso del carbón en base seca, de contenido de humedad y madera anhidra, para cada uno de los hornos media naranja de los 16 productores de carbón de *Aspidosperma quebracho-blanco* se observan en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: Cálculo de contenido de humedad y madera anhidra

Muestra N°	Madera Verde (tn)	C. H. (%)	Mad. Anhidra (tn)
1	33.80	55.0	21.81
2	34.60	58.0	21.90
3	33.00	49.0	22.15
4	31.80	47.0	21.63
5	32.30	52.0	21.25
6	29.80	61.0	18.51
7	29.30	51.3	19.37
8	33.50	49.5	22.41
9	33.40	56.8	21.30
10	32.90	57.8	20.85
11	32.50	62.0	20.06
12	33.10	57.8	20.98
13	31.40	44.0	21.81
14	30.90	53.9	20.08
15	31.30	46.9	21.31
16	30.30	57.0	19.30

Transcurridos los 19 días promedio, que tarda en fabricarse el carbón vegetal en este tipo de horno, se tomaron los rendimientos del mismo, según datos suministrados por cada uno de los 16 productores, para cada horno, y se calculó el rendimiento de carbón en base anhidra.

Los resultados se detallan en la tabla 3.2 .

Tabla 3.2: Rendimiento en peso de carbón por horno en base anhidra

Muestra N°	Carbón Obt. / Horno (tn)	Rend. Base Seca (%)
1	7.30	33.48
2	6.80	31.05
3	7.10	32.06
4	6.20	28.66
5	7.00	32.94
6	6.10	32.96
7	6.50	33.56
8	6.80	30.35
9	6.50	30.51
10	6.90	33.09
11	6.80	33.90
12	6.60	31.46
13	7.40	33.94
14	7.00	34.86
15	6.70	31.45
16	7.30	37.83

Posteriormente se analizó el carbón obtenido, determinando el contenido de humedad, contenido de cenizas y el contenido de materias volátiles, para con ellos calcular el rendimiento en carbono fijo.

Los resultados se indican en la tabla 3.3 .

Tabla N° 3.3: Rendimiento en carbono fijo del carbón por horno media naranja

Muestra N°	Cont.H.(%)	Cont. C.(%)	M. Vol. (%)	Carb. F.(%)
1	2.67	5.96	19.91	71.5
2	2.54	4.30	12.80	80.4
3	2.48	6.86	15.50	75.2
4	2.23	4.77	19.40	73.6
5	2.79	5.96	14.50	76.7
6	6.61	8.10	25.38	59.9
7	5.41	6.61	15.67	72.3
8	3.78	4.77	16.89	74.6
9	2.76	6.06	14.79	76.4
10	3.24	4.47	13.64	78.7
11	3.50	5.23	18.06	73.2
12	2.51	2.67	17.49	77.3
13	3.23	4.60	16.02	76.2
14	2.38	2.40	19.40	75.8
15	2.49	6.01	14.50	77.0
16	4.30	5.38	19.65	70.7

3.1.1. Análisis estadístico de los resultados (hornos media naranja)

A los resultados, en términos de, rendimiento en peso de carbón sobre base anhidra y rendimiento de carbono fijo en base anhidra, se los analizó calculando la media estadística y la desviación estándar con un 95 % de confianza, resultando:

**Rendimiento en peso de carbón
sobre base anhidra**

Media = 32.66

Desviación estándar = 2.13

Rango = 9.16

**Rendimiento de carbono fijo
sobre base anhidra**

Media = 74.33

Desviación estándar = 4.64

Rango = 20.45

Los resultados obtenidos dan una idea concreta de los rendimientos en peso de carbón y carbono fijo de los hornos convencionales tipo media naranja de la provincia del Chaco para la especie en consideración.

3.2 Resultados de las destilaciones secas

Las destilaciones secas de madera se realizaron siguiendo las pautas indicadas por el diseño experimental.

La marcha de la destilación N° 3, a una velocidad de calentamiento de 48 °C por hora y 500 °C de temperatura final se puede observar en la figura 3.1. .

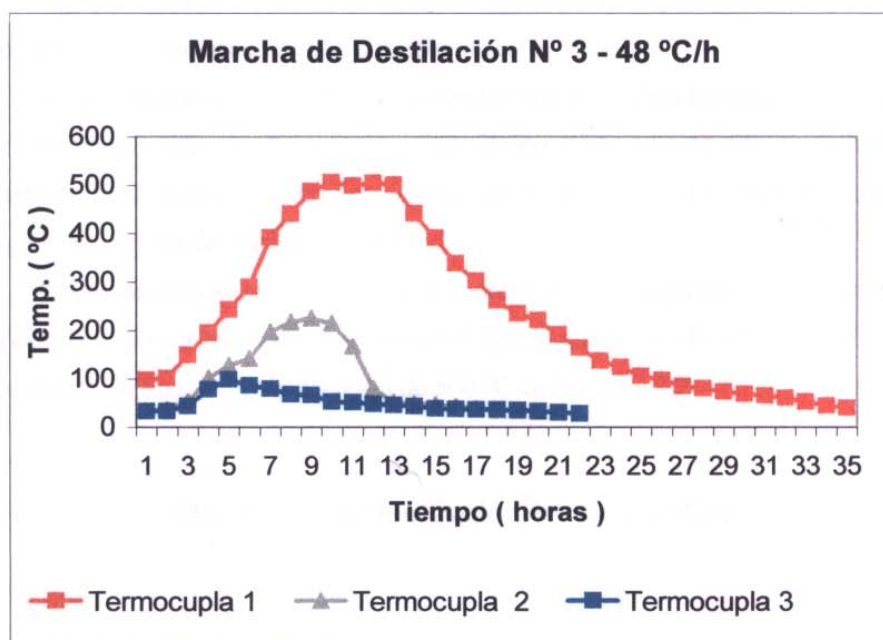


Figura 3.1: Marcha de temperaturas en destilación seca “lenta”

En la figura 3.1 se observa cómo se fue elevando la temperatura de calentamiento del proceso de carbonización, termocupla N° 1, hasta arribar a la temperatura final de carbonización.

La termocupla N° 2 mide la temperatura de los gases producidos y está ubicada a la entrada del condensador a aire (ciclón).

La termocupla N° 3, ubicada entre el condensador a aire y el condensador de agua en contracorriente, mide la temperatura de los gases antes de ingresar al último condensador mencionado.

La medición de temperatura por parte de la termocupla N° 2, es muy importante, porque es indicativa de la “vida” del proceso de carbonización. Con

esto se quiere decir que por más que se continúe manteniendo la temperatura de proceso en 500 °C, la temperatura de los gases va a seguir decreciendo, porque quedan muy pocos gases condensables y no condensables por extraer. Esto se observa en la figura anterior, porque a 11 horas de comenzada la destilación y luego de haber seguido la velocidad adoptada por diseño, la temperatura de la termocupla N° 2 acusa una disminución de temperatura por más que se siga manteniendo la misma temperatura final de carbonización.

Hay que rescatar, también, de la figura 3.1 un dato muy importante, que es el tiempo total que lleva hacer carbón con este proceso, 35 horas.

Si se comparan con los 19 días promedio que utilizaban los productores para hacer carbón en hornos media naranja, es un tiempo relativamente inferior, salvando obviamente las distancias en términos de Kg de madera que ocupa un horno media naranja y una retorta de destilación seca.

Análogamente, se puede observar la marcha de las temperaturas, por ejemplo, de la destilación seca N° 4 con una velocidad de calentamiento de 132 °C por hora y una temperatura final de carbonización de 500 °C en la figura 3.2.

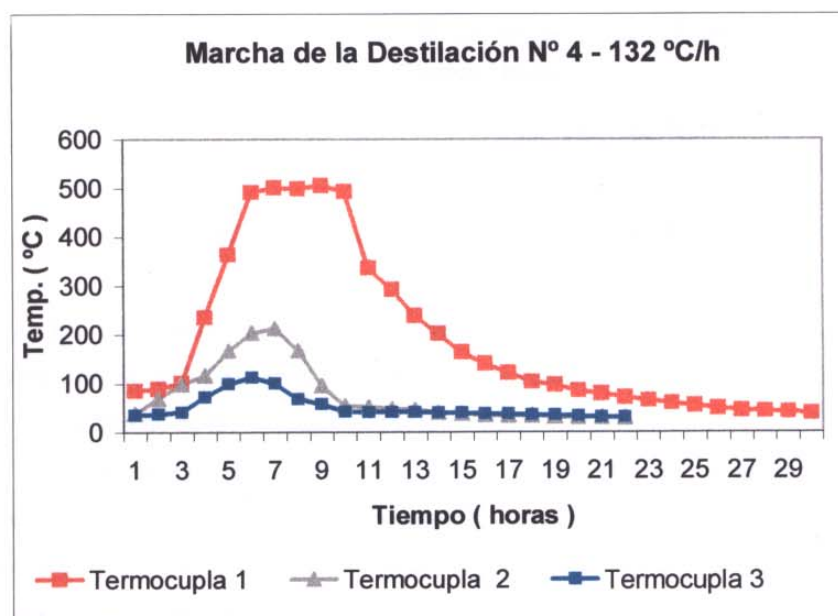


Figura 3.2: Marcha de temperaturas en destilación seca “ rápida ”

En la figura anterior se observa que a las 8 horas de haber comenzado el proceso, la temperatura que indica de la termocupla N° 2 empieza a decaer, como se ha mencionado anteriormente, por más que se mantenga la temperatura final de carbonización. Como es una destilación seca rápida, obviamente, el tiempo de enfriamiento es menor que la destilación seca de la figura 3.1. .

Si se comparan, por ejemplo, las destilaciones secas N° 3 y N° 4, se puede observar lo siguiente en la figura 3.3:

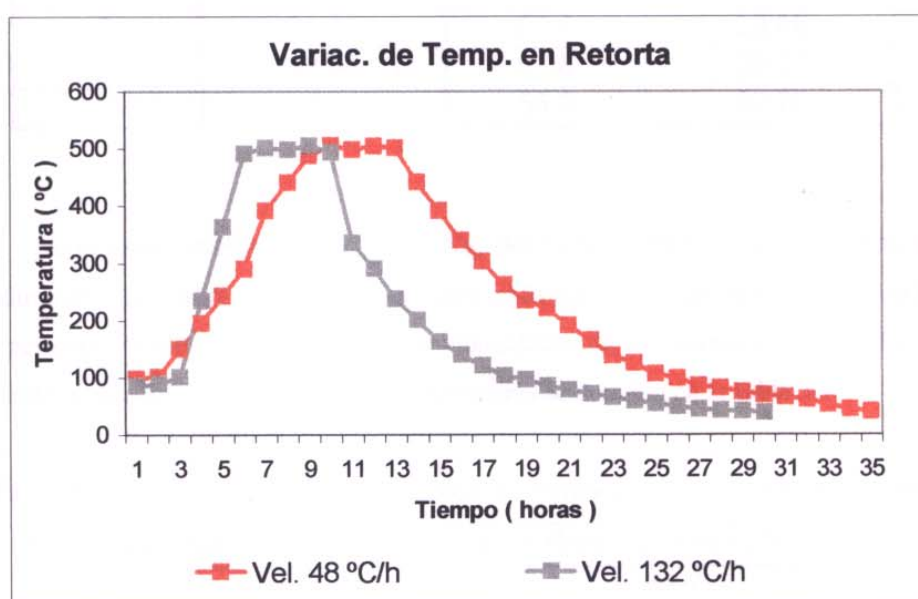


Figura 3.3: Comparación de destilación seca N° 3 y N° 4

En esta figura se observa claramente la diferencia de pendientes de las destilaciones secas N° 3 y N° 4, en términos de la velocidad de calentamiento.

La marcha de las destilaciones secas restantes se detalla en el Anexo 5.

A medida que se fueron realizando las destilaciones secas, según el diseño experimental adoptado, fueron obteniéndose los resultados de contenido de humedad y madera anhidra de las muestras utilizadas, para determinar el rendimiento en peso de carbón en base anhidra.

Estos resultados se indican, de manera detallada, según la secuencia de realización de las experiencias en la tabla 3.4. .

Tabla 3.4: Cont. de humedad y madera anhidra del carbón de destilaciones secas

Muestra N°	Mad. Ver. (Kg)	Cont. H.(%)	Mad. Anh.(Kg)
1	52.00	52.0	34.21
2	50.00	57.8	31.69
3	52.50	68.8	31.10
4	50.00	28.4	38.94
5	52.00	52.0	34.22
6	50.00	57.8	31.69
7	50.00	57.8	31.69
8	51.50	28.4	40.11
9	51.00	51.4	33.69
10	52.65	57.8	33.37
11	51.00	56.0	32.70

Con estos valores y el peso, en Kg, del carbón obtenido se calcularon los rendimientos de carbón en base anhidra para cada una de las destilaciones, según las temperaturas finales de carbonización y velocidades de calentamiento adoptadas de acuerdo al diseño central compuesto. Los mismos se detallan en la tabla 3.5. .

Tabla 3.5: Rendimiento en peso de carbón de destilaciones secas en base anhidra

Muestra N°	Carb.Obt.(Kg)	Rend. B. Seca (%)
1	14.60	42.7
2	13.50	42.6
3	15.25	49.0
4	14.00	36.0
5	14.50	42.4
6	15.00	47.3
7	14.50	45.8
8	13.75	34.3
9	14.00	41.6
10	14.50	43.5
11	14.00	42.8

Análogamente, se calcularon los rendimientos carbono fijo para las muestras mencionadas anteriormente. Los resultados se detallan en la tabla 3.6. .

Tabla 3.6: Rendimientos en carbono fijo de destilaciones secas

Muestra N°	Cont. H.(%)	Cont.Cen.(%)	M. Vol.(%)	Carb. F.(%)
1	1.30	5.96	5.03	87.7
2	0.88	4.10	4.48	90.5
3	6.03	6.86	4.70	82.4
4	2.23	4.77	6.22	86.8
5	1.28	5.96	5.05	87.7
6	0.88	3.44	11.00	84.7
7	3.35	4.49	6.32	85.8
8	1.37	4.77	3.94	89.9
9	2.76	6.06	6.35	84.8
10	3.84	4.98	6.94	84.2
11	3.24	4.47	8.15	84.1

Con la totalidad de los resultados obtenidos de las 11 destilaciones secas, de rendimiento en peso y carbono fijo, la tabla de rangos de las variables independientes y dependientes, quedó conformada de la siguiente manera, tabla 3.7. .

Tabla 3.7: Rango de las variables independientes y dependientes

Muestra N°	Variables Independientes		Variables dependientes	
	Temp. Final	Vel. de Calen.	Carbono Fijo	Rend. Base seca
1	- 1	+ 1	87.7	42.7
2	+ 1,4142	0.0	90.5	42.6
3	0.0	- 1.4142	82.4	49.0
4	0.0	+ 1.4142	86.8	36.0
5	+ 1	- 1	87.7	42.4
6	- 1	- 1	84.7	47.3
7	- 1.4142	0.0	85.8	45.8
8	+ 1	+ 1	89.8	34.3
9	0.0	0.0	84.8	41.6
10	0.0	0.0	84.2	43.5
11	0.0	0.0	84.1	42.8

3.2.1. Análisis estadístico de los resultados – Rendimiento en peso de carbón (destilaciones secas)

Haciendo el análisis de varianza de la variable dependiente, rendimiento en peso de carbón, en función de las variables independientes, en el rango establecido del diseño central compuesto, se obtienen los siguientes resultados, tabla 3.8. .

Tabla 3.8: 1er. Análisis de varianza para rendimiento en peso

Efectos	Suma de Cuadr.	GL	Media Cuadr.	F ₀	Probabil.
A: Temperat.	39.71	1	39.71	43.02	0.0225
B: Velocidad	120.78	1	120.78	130.81	0.0076
AB	3.06	1	3.06	3.32	0.2102
AA	0.75	1	0.75	0.81	0.4710
BB	1.33	1	1.33	1.44	0.3529
Desajuste	19.27	3	6.42	6.96	0.1282
Error Puro	1.84667	2	0.92		
Total (corr.)	187.607273	10			

$$R^2 = 0.887416$$

Se observa por un lado, que los efectos de las interacciones, temperatura final-velocidad de calentamiento, las interacciones cuadráticas de la temperatura final y las interacciones cuadráticas de la velocidad de calentamiento, no son significativas, por consiguiente se las elimina del análisis.

Por otro lado el efecto de la temperatura final es significativo, esto quiere decir que influye en las variables de respuesta, al igual que la velocidad de calentamiento.

El análisis de varianza con las interacciones no significativas ya eliminadas, queda del siguiente modo, tabla 3.9. .

Tabla 3.9: Análisis de varianza para rendimiento en peso

Efectos	Suma de Cuadr.	GL	Media Cuadr.	F ₀	Probabil.
A: Temperatura	39.71	1	39.71	43.02	0.0225
B: Velocidad	120.78	1	120.78	130.81	0.0076
Desajuste	25.25	6	4.20	4.56	0.1908
Error Puro	1.84	2	0.92		
Total (Corr.)	187	10			

$$R^2 = 0.855518$$

Como se indica en tabla anterior, la temperatura final de carbonización es significativa, pero lo es aún más, la velocidad de calentamiento.

El desajuste no es significativo y esto quiere decir que los datos ajustan al diseño adoptado.

La superficie de respuesta estimada para el rendimiento de carbón en peso sobre base anhidra, en función de la temperatura final y la velocidad de calentamiento, queda según se indica en la figura 3.4. .

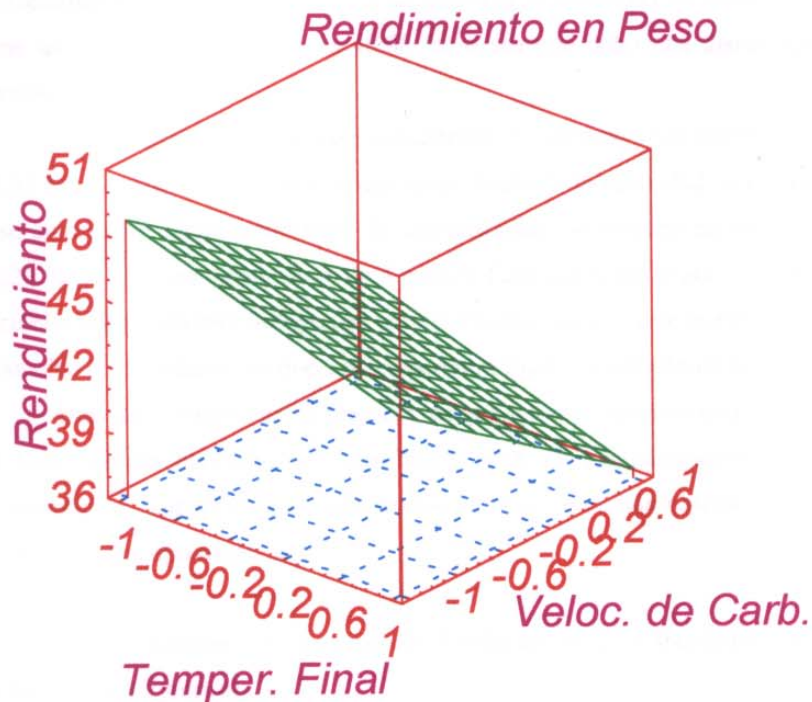


Figura 3.4: Rendimiento en peso de carbón en base anhidra

Claramente se observa que a medida que se aumenta la temperatura final de carbonización el rendimiento en peso de carbón disminuye, comportándose el proceso de destilación seca de modo general de acuerdo con, Alemida, J.M., Barbosa, J.A., Gomes P. y Oliveira J. y Fonseca Faría, W., haciendo la salvedad de que los parámetros utilizados en el proceso de destilación seca son distintos, porque las velocidades de calentamiento son distintas, al igual que las temperaturas finales

citadas por estos autores. También hay que destacar que las especies no son las mismas (19, 20, 23 y 24).

La velocidad de calentamiento del proceso de carbonización, como observamos en la figura 3.4, también influye en el rendimiento en peso de carbón, a medida que ella aumenta, el rendimiento de carbón disminuye.

Hay que destacar un dato muy importante que brinda la figura 3.4, que es, si se toma el máximo rendimiento en peso de carbón, 48,65 %, temperatura final y velocidad de calentamiento bajas, y a partir de ese punto se mantiene constante la temperatura final de carbonización y se aumenta la velocidad de calentamiento, se tiene un rendimiento en peso de 40,88 %, o sea que hubo una disminución de 8 puntos.

Ahora bien, si se toma nuevamente el máximo rendimiento de carbón, 48,65 %, y a partir de ese punto se mantiene constante la velocidad de calentamiento y se aumenta la temperatura final de carbonización, se obtiene un rendimiento de 44,20 %, o sea, una disminución de 4 puntos. Esto quiere decir que, si bien, las dos variables independientes influyen en el rendimiento en peso, este es más sensible a la velocidad de calentamiento que a la temperatura final de carbonización.

Otro dato importante de destacar, es que los rendimientos en peso de carbón en base anhidra obtenidos por destilación seca, en los parámetros consignados anteriormente, superan a los rendimientos en peso de carbón obtenidos por hornos convencionales tipo media naranja.

3.2.1.1 Rendimiento en peso de destilación seca vs Rendimiento en peso de horno media naranja

Analizando la figura 3.4 se puede decir, por un lado, que si se produce carbón por destilación seca de madera en las peores condiciones, esto es, máxima temperatura final y máxima velocidad de calentamiento, se obtiene un rendimiento de 36,4 % de carbón, siendo este valor mayor en 11,50 %, con respecto al rendimiento medio, de 32,66 %, para carbones obtenidos por hornos convencionales.

Y si, por otro lado, se compara con el mejor rendimiento obtenido por destilación seca, es decir, con una baja temperatura final de carbonización y velocidad de calentamiento, se obtiene un incremento del 48 % sobre el valor indicado anteriormente.

El rendimiento en peso de carbón de 48,65 %, es mayor que el rendimiento obtenido mediante destilación seca con una presión efectiva en la retorta de 1,00 MPa y menor cuando la presión efectiva en la retorta es superior a 3,30 Mpa, de acuerdo con Arcate, J.R. (27).

3.2.2. Análisis estadístico de los resultados – Rendimiento en carbono fijo (destilaciones secas)

Análogamente, si de la misma manera que se analizó el rendimiento en peso de carbón, se realiza el análisis de varianza de la otra variable dependiente, rendimiento en carbono fijo, en función de las variables independientes, en el rango establecido del diseño central compuesto, se obtiene la tabla 3.10. .

Tabla 3.10: 1er. Análisis de varianza de rendimiento en carbono fijo

Efectos	Suma de Cuadr.	GL	Media Cuadr.	F ₀	Probabil.
A: Temperatura	17.24	1	17.24	120.34	0.0082
B: Velocidad	16.02	1	16.02	111.80	0.0088
AB	0.20	1	0.20	1.41	0.3566
AA	26.50	1	26.50	184.95	0.0054
BB	0.86	1	0.86	6.04	0.1332
Desajuste	2.87	3	0.95	6.69	0.1328
Error Puro	0.28	2	0.14		
Total (corr.)	63.52	10			

$$R^2 = 0.950203$$

De la tabla 3.10 se deduce que la temperatura final de carbonización, la velocidad de calentamiento y la interacción cuadrática de la temperatura, son significativos; mientras que, la interacción temperatura – velocidad y la cuadrática de la velocidad, no lo son, por ende son eliminadas del análisis, tabla 3.11. .

Tabla 3.11: Análisis de varianza de rendimiento en carbono fijo

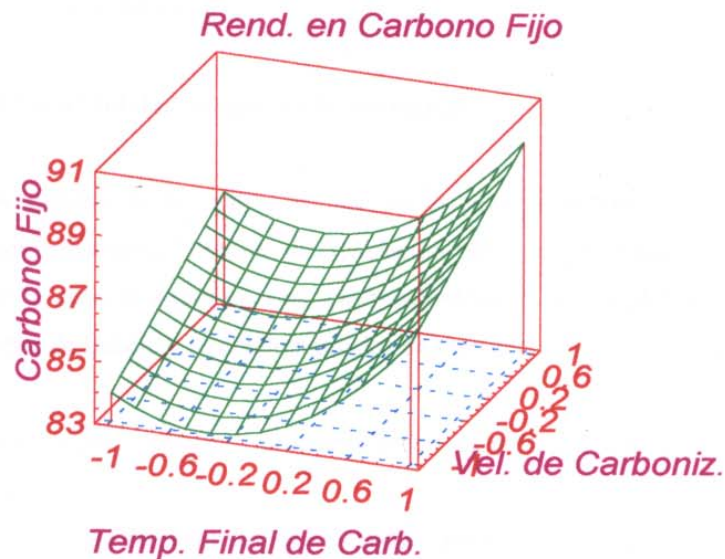
Efectos	Suma de Cuadr.	GL	Media Cuadr.	F ₀	Probabil.
A: Temperatura	17.24	1	17.24	120.34	0.0082
B: Velocidad	16.02	1	16.02	111.80	0.0088
AA	26.01	1	26.01	181.51	0.0055
Desajuste	3.94	5	0.78	5.51	0.1608
Error Puro	0.28	2	0.14		
Total (corr.)	63.52	10			

$$R^2 = 0.933378$$

Entonces, la temperatura final de carbonización, la velocidad de calentamiento y la interacción cuadrática de la temperatura, son los efectos que influyen en el rendimiento en carbono fijo.

El desajuste no es significativo, por consiguiente, los datos ajustan al diseño adoptado.

La superficie de respuesta estimada para el rendimiento en carbono fijo sobre base anhidra, en función de la temperatura final y la velocidad de calentamiento, queda según se indica en la figura 3.5 .

**Figura 3.5:** Rendimiento en carbono fijo

En la superficie de respuesta de la figura 3.5, se observa un comportamiento inverso del rendimiento en carbono fijo con respecto al rendimiento en peso de carbón, en función de las mismas variables independientes, temperatura final de carbonización y velocidad de calentamiento. Esto es, produciendo carbón a velocidades de calentamiento elevadas y temperaturas finales de carbonización altas, se obtiene un rendimiento en carbono fijo del orden del 90 % sobre base anhidra.

Esto está de acuerdo con Almeida, J.M., Barbosa, J.A., y Fonseca Faría, W.L., haciendo también la salvedad con respecto a los parámetros de temperatura finales de carbonización y velocidades de calentamiento que se mencionaron cuando se hizo el análisis de rendimiento de carbón en peso (19, 20 y 24).

3.2.2.1 Rendimiento en carbono fijo de destilaciones secas vs Rendimiento en carbono fijo de hornos media naranja

Es de destacar, como resultado relevante, en términos de rendimiento en carbono fijo, que cualquiera sea la velocidad de calentamiento o temperatura final de carbonización, trabajando dentro de los parámetros consignados anteriormente, siempre se obtuvo un rendimiento en carbono fijo superior al 82 %, superior a la media de rendimientos en carbono fijo para hornos convencionales tipo media naranja, que es de 74,33 %.

3.3 Factibilidad de aplicación industrial

A efectos de la realización de un estudio preliminar de factibilidad de aplicación industrial del Método de Destilación Seca para la fabricación de carbón a partir de la especie *Aspidosperma quebracho-blanco*, se adoptaron las siguientes condiciones de trabajo y se detallan precios de mercado:

- Un aserradero o conjunto de aserraderos que utilicen 75 tn diarias de materia prima.
- Disponibilidad de 30 tn diarias de residuos para destilación seca, de acuerdo a lo establecido en el ítem 2.2 .

- Costo de una Planta Industrial, tipo CML, llave en mano, para destilación seca con capacidad para procesar 7.500 tn de residuos de madera anuales: \$ 393.000 con un plazo de amortización de 12 años. Dicha planta se observa en la foto 3.1 .
- Plantas industriales del tipo CML cuentan en el mercado internacional con créditos preferenciales, con una tasa interés del 6% anual y con un año de gracia. Este bajo interés se debe a que la Planta Industrial contribuye con la ecología, porque los gases y humos producidos, que son contaminantes, son incinerados. Trayendo aparejado esto, por un lado, la supresión de efectos nocivos de tipo oftálmicos y visuales, por otro lado, la eliminación de líquidos piroleñosos y alquitranes, y por último, el aprovechamiento y recuperación de la energía calórica que poseen los gases y humos generados.
- Precio de mercado por tonelada de carbón de esta especie \$ 92.

Teniendo en cuenta los datos citados y los resultados obtenidos en términos de rendimiento en peso de carbón, detallado en el ítem 3 de esta Tesis, en forma preliminar se puede establecer lo siguiente (35):

- Cantidad de residuos anuales con un 50 % CH:
7500 tn (30 tn x 250 días/año)
- Cantidad de carbón producido por destilación seca:
2430 tn (7500 tn / 1,5 * 0,486)
- Cantidad de carbón producido por hornos media naranja:
1630 tn (7500 tn / 1,5 * 0,326)
- Incremento anual de rendimiento:
800 tn (2430 tn – 1630 tn)
- Incremento de ingresos anuales:
\$ 73.600 (800 tn * \$ 92 / tn).

Tasa interna de retorno para el incremento de producción:

- **Sin crédito:**

Capital propio de \$ 393.000.

TIR = 15,3 % (A = \$ 73.600; 12 años)

- **Con crédito externo:**

Monto del crédito \$ 200.000; sistema francés C = \$ 13.443 / semestre

Plazo 11 años con 1 de gracia

Capital propio de \$ 193.000

TIR = 24,1 % (F = \$ 61.600; 1 años; F = \$ 73.600; 12 años; A = \$ 46.714; 10 años)

Estos valores de TIR, correspondientes a la inversión necesaria para incrementar el rendimiento de carbón por destilación seca, permiten la aplicación industrial de este proceso.



Foto 3.1: Planta industrial de producción de carbón

4 - CONCLUSIONES

- La producción de carbón por destilación seca de residuos de la especie *Aspidosperma quebracho-blanco*, obtiene un rendimiento de 48,65 % en peso sobre base anhidra, trabajando a una velocidad de calentamiento de 60 °C/h y con una temperatura final de carbonización de 450 °C
- El rendimiento en peso de carbón en base anhidra producido por destilación seca de residuos de esta especie aumenta su rendimiento en 48,95 % con respecto a los hornos convencionales tipo media naranja, trabajando en los parámetros anteriormente indicados.
- El rendimiento en carbono fijo en base anhidra obtenido por destilación seca de residuos, con los parámetros que corresponden al mayor rendimiento en peso, es de 83,90 %, o sea un 12,87 % mayor que el promedio para hornos media naranja. Por otra parte, si el carbón es fabricado con velocidades de calentamiento de 120 °C y temperatura finales de 550 °C, el rendimiento en carbono fijo aumenta un 20,63 % con respecto a la media de hornos convencionales.
- El mayor rendimiento en peso de carbón, producido mediante destilación seca de esta especie, permite la realización de las inversiones necesarias para su aplicación industrial. Dichas inversiones indican una TIR de 24,1 % a lo largo de la vida útil de la Planta Industrial.

Por lo expuesto, el proceso de producción de carbón por destilación seca de residuos de *Aspidosperma quebracho-blanco* puede ser aplicado industrialmente de manera rentable y con un importante beneficio ecológico.

BIBLIOGRAFIA

1. Kollman, F.: “ Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones ”, 2^{da}. ed., Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y el Servicio de la Madera, España, pp. 290 (1959).
2. Gomes, P.A.; Oliveira, J.B.: “ Teoria da Carbonizacao da Madeira “, Uso da Madeira para Fins Energéticos/CETEC, 001: 29 (1980).
3. Da Rocha, M.P.: “ Energía da Madeira “, Universidad Federal do Paraná, pp. 42-48 (1996).
4. Gomes, P.A.; Oliveira, J.B.: “ Teoria da Carbonizacao da Madeira “, Uso da Madeira para Fins Energéticos/CETEC, 001: 30 (1980).
5. Sjöström, E.: “ Wood Chemistry “, 2^{da}. ed., Academic Press, Inc., U.S.A., pp. 234 (1993).
6. Fonseca Faría, W.L.: “ A Jurema Preta (*Mimosa hostilis* Benth) Como Fonte Energética do Semi-Arido do Nordeste-Carvao “, Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Nacional do Paraná, Curitiba, Brasil (1984).
7. Fengel, D.; Wegener, G.: “ Wood “, 1^{era}. ed., Walter de Gruyter & Co., Berlin, New York, pp. 338-342 (1984).
8. Martin, F.M.: “ El carbón Vegetal “, 1^{era}. ed., Mundi-Prensa, Madrid, España, pp. 37-38 (1989).
9. Sjöström, E.: “ Wood Chemistry “, 2^{da}. ed., Academic Press, Inc., U.S.A., pp. 235-236 (1993).
10. Doat, J.; Deglise, X.: “ Gazéification Par Pyrolyse Eclair de Quelques Bois Tropicaux “, Revue Bois et Forets des Tropiques 198: 59-73 (1982).
11. Tsoumis, G.: “ Science and Technology of Wood “ 1^{era}. ed., Chapman & Hall, U.S.A., pp. 426-428 (1991).
12. Walker, J.C.F.: “ Primary Wood Processing “, 3^{era}. ed., Chapman & Hall, Great Britain, pp. 544-546 (1993).
13. Coronel, E.O.: “ Fundamentos de las Propiedades Físicas y Mecánicas de las Maderas “, 2^{da}. parte, 1^{era}. ed., EL Liberal, Santiago del Estero, Argentina, pp. 304-307 (1995).

14. Coronel, E.O.: “ Fundamentos de las Propiedades Físicas y Mecánicas de las Maderas “, 1^{era}. parte, 1^{era}. ed., EL Liberal, Santiago del Estero, Argentina, pp. 63-65 (1994).
15. Ribaski, J.; Lima, P.C.F.: “ Especies Arbóreas y Arbustivas para las Zonas Aridas y Semi-Aridas de América Latina “, Serie: Zonas Aridas y Semi-Aridas N° 12, Publicado en el Marco del Programa Conjunto FAO/PNUMA del Control de la Desertificación en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile <http://www.fao.org/regional/lamerica/bosques/arboles/bra-m-ca.htm> (1997).
16. Serra, M.T.: “ Especies Arbóreas y Arbustivas para las Zonas Aridas y Semi-Aridas de América Latina “, Serie: Zonas Aridas y Semi-Aridas N° 12, Publicado en el Marco del Programa Conjunto FAO/PNUMA del Control de la Desertificación en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile <http://www.fao.org/regional/lamerica/bosques/arboles/chi-aca.htm>. (1997).
17. Serra, M.T.: “ Especies Arbóreas y Arbustivas para las Zonas Aridas y Semi-Aridas de América Latina “, Serie: Zonas Aridas y Semi-Aridas N° 12, Publicado en el Marco del Programa Conjunto FAO/PNUMA del Control de la Desertificación en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile <http://www.fao.org/regional/lamerica/bosques/arboles/chi-atri.htm> (1997).
18. Ribaski, J.; Lima, P.C.F.: “ Especies Arbóreas y Arbustivas para las Zonas Aridas y Semi-Aridas de América Latina “, Serie: Zonas Aridas y Semi-Aridas N° 12, Publicado en el Marco del Programa Conjunto FAO/PNUMA del Control de la Desertificación en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile <http://www.fao.org/regional/lamerica/bosques/arboles/bra-ana.htm> (1997).
19. Almeida, J.M.: “ Efeito da Temperatura Sobre Rendimiento e Propriedades dos Productos da Carbonizacao de *Eucalyptus grandis* “, Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Federal de Vicosa, Minas Gerais, Brasil (1983).
20. Barbosa, J.A.: “ Avaliacao Qualitativa e Quantitativa do Carvao e Dos Condensados Produzidos na Carbonizacao da Madeira de Algaroba, *Prosopis juliflora* DC “, Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Federal de Vicosa, Minas Gerais, Brasil (1986).
21. Fengel, D.; Wegener, G.: “ Wood “, 1^{era}. ed., Walter de Gruyter & Co., Berlin, New York, pp. 527-530 (1984).

22. Kollman, F.: “ Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones ”, 2^{da} ed., Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y el Servicio de la Madera, España, pp. 292-296 (1959).
 23. Gomes, P.A.; Oliveira, J.B.: “ Teoria da Carbonizacao da Madeira “, Uso da Madeira para Fins Energéticos/CETEC, 001: 39-40 (1980).
 24. Fonseca Faria, W.L.: “ A Jurema Preta (*Mimosa hostilis* Benth) Como Fonte Energética do Semi-Arido do Nordeste-Carvao “, Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Federal do Paraná, Curitiba, Brasil (1984).
 25. Duke, J.A.: “ Hand Book of Energy Crops unpublished “, U.S.A. http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Acacia-mearnsii.htm (1983).
 26. Fuwape, J.A.: “ Carbonisation of Some Short Rotation Tropical Tree Species ”, IUFRO XX World Congress, Tampere <http://www.salaya.metha.fi:4040/iufro/iufro.net/ds/hp50701.htm> (1995).
 27. Arcate, J.R.: “ Biomass Charcoal Co-Firing With Coal “, http://www.techtp.com/HY_charcoal.htm ó <http://www.techtp.com/Co-firing.htm> ASME Turbo Expo '98 in Stockholm, Sweden in June 1998.
 28. Herrera, H; Velez, S.I.; Vergnet, A.M.: “ Pirólisis de Maderas Argentinas “, VI Congreso Forestal Argentino, Tomo III, pp. 573-575 (1988).
 29. Martin, F.M.: “ El carbón Vegetal “, 1^{era} ed., Mundi-Prensa, Madrid, España, pp. 42-43 (1989).
 30. Martin, F.M.: “ El carbón Vegetal “, 1^{era} ed., Mundi-Prensa, Madrid, España, pp. 44-46 (1989).
 31. Martin, F.M.: “ El carbón Vegetal “, 1^{era} ed., Mundi-Prensa, Madrid, España, pp. 34-36 (1989).
 32. Palavecino, S.R.; Pérez, W.O.: “ Rendimiento de Materia Prima de las Principales Especies del Parque Chaqueño “, VI Congreso Forestal Argentino, Tomo III, pp. 620-623 (1988).
 33. Montgomery, D.C.: “ Diseño y Análisis de Experimentos “, 1^{era} ed., Grupo Editorial Iberoamérica S.A. de C.V., Mexico, pp. 1-3 (1991).
 34. Montgomery, D.C.: “ Diseño y Análisis de Experimentos “, 1^{era} ed., Grupo Editorial Iberoamérica S.A. de C.V., Mexico, pp. 479-494 (1991).
 35. Degarmo, E.; Sullivan, W.; Bontadelli, J.: “ Engineering Economy ”, 9^{na} ed, Macmillan Publishing Company, U.S.A., pp. 77 – 89 (1993).
-

ANEXO 1

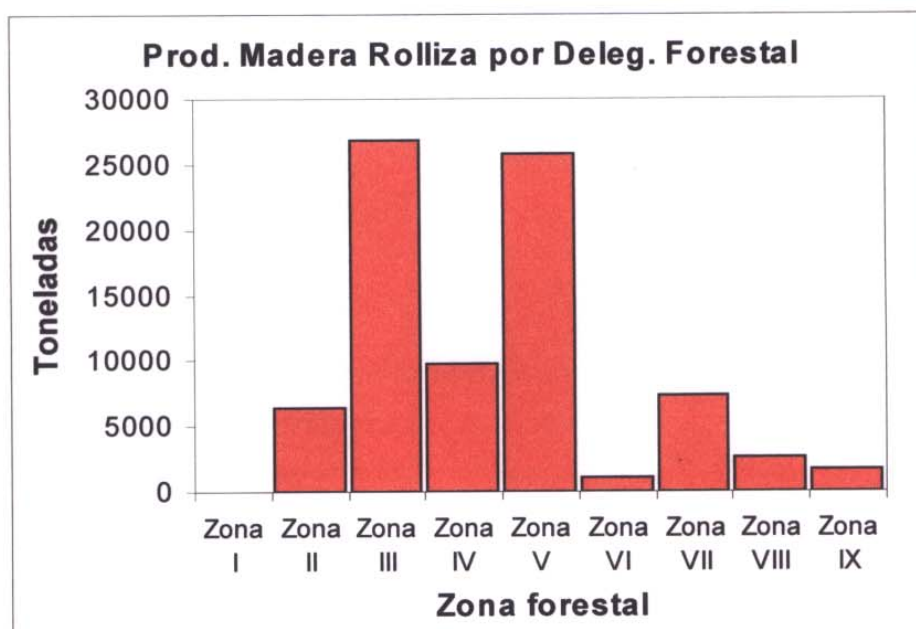
**DISTRIBUCION GEOGRAFICA DE ZONAS FORESTALES DE
LA PROVINCIA DEL CHACO**

ANEXO 2

**PRODUCCION DE MADERA ROLLIZA POR DELEGACION
FORESTAL**

La producción de madera rolliza por Delegación Forestal en la provincia del Chaco es de:

Delegación Forestal	Toneladas
Zona I	41
Zona II	6348
Zona III	26875
Zona IV	9738
Zona V	25710
Zona VI	1068
Zona VII	7301
Zona VIII	2665
Zona IX	1744



ANEXO 3

**DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN
MADERAS - NORMA IRAM N° 9532**

CONTENIDO DE HUMEDAD EN MADERAS

Para la determinación del contenido de humedad, en maderas, con el método de secado con estufa se emplean los siguientes aparatos:

A – Balanza que permita apreciar 0,01 g

B – Estufa eléctrica provista de termorregulador que permita operar a una temperatura de 103 °C +/- 2 °C

C – Desecador

Las muestras de madera son cortadas en forma de cubo con 20 mm de arista y son pesadas con una precisión de 0,01 g y se colocan en la estufa. Se aplica un calentamiento gradual hasta alcanza los 103 °C +/- 2 °C, dejando las probetas a esta temperatura no menos de veinte horas.

Luego se retiran las muestras de la estufa, se dejan enfriar en desecador y se pesan. Se repite el tratamiento hasta constancia de peso, 0,01 g, lo cual se comprueba repitiendo las pesadas cada dos horas hasta cumplir esa condición.

El contenido de humedad se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$CH = \frac{P_H - P_S}{P_S} \times 100$$

siendo:

CH = Contenido de humedad de la madera, en por ciento, base seca

P_H = Peso original de la muestra, en gramos

P_S = Peso de la muestra seca, en gramos

ANEXO 4

**DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD, CENIZAS,
MATERIAS VOLATILES Y CARBONO FIJO, EN CARBON VEGETAL
NORMAS IRAM N° 17005, 17006, 17007 Y 17013, PARA CARBON**

CONTENIDO DE HUMEDAD EN CARBON VEGETAL

Para la determinación del contenido de humedad, en carbón vegetal, se utilizan los siguientes aparatos:

- A – Balanza que permita apreciar 0,0001 g
- B – Estufa eléctrica provista de termorregulador
- C – Desecador

Se utilizaron crisoles de 22 mm de profundidad y 45 mm de diámetro.

Se calienta el crisol vacío bajo las mismas condiciones en las cuales debe secarse la muestra, se coloca la tapa del crisol sobre el mismo y se deja enfriar durante treinta minutos sobre ácido sulfúrico, $d = 1.84$, y luego se pesa.

Se pesa, aproximadamente, 1 g de muestra en el crisol y se introduce el mismo en la estufa. Estas operaciones se tienen que realizar con la mayor celeridad posible. La estufa tiene que estar previamente calentada a $105^{\circ}\text{C} - 110^{\circ}\text{C}$.

Se calienta la muestra durante una hora, para posteriormente, sacarla y pasarla a un desecador hasta que este fría para poder pesarla.

El contenido de humedad se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$\text{Ch} = \frac{\text{P}_0 - \text{P}_s}{\text{P}_s} \times 100$$

siendo: Ch = Contenido de humedad, en por ciento, base seca

P_0 = Peso de la muestra original, en gramos

P_s = Peso del residuo obtenido, en gramos

CONTENIDO DE CENIZAS EN CARBON VEGETAL

Para la determinación del contenido de cenizas, en carbón vegetal, se utilizan los siguientes aparatos:

A – Balanza analítica con una precisión de 0.0001 g

B – Mufla con termostato de temperatura entre 700 °C y 750 °C

Se utilizan los mismos crisoles que para contenido de humedad.

Se coloca el crisol que contiene el carbón seco proveniente de la determinación de humedad efectuada según Norma IRAM 17005 en la mufla fría, y se calienta gradualmente de manera de llegar a los 500 °C en una hora y a 750 °C en dos horas y se prosigue el calentamiento a esa temperatura hasta peso constante.

El contenido de cenizas se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$C_c = \frac{P_0}{P} \times 100$$

siendo : Cc = Contenido de cenizas, en por ciento de peso, sobre base seca

P₀ = Peso del residuo obtenido

P = Peso de la muestra empleado

CONTENIDO DE MATERIAS VOLATILES EN CARBON VEGETAL

Para la determinación del contenido de materias volátiles, en carbón vegetal, se utilizan los siguientes aparatos:

- A – Balanza analítica con una precisión de 0.0001 g
- B – Mufla con termorregulador de temperatura entre 950 °C +/- 2 °C
- B – Desecador

Se coloca el crisol con la muestra de carbón en la mufla a 950 °C durante 7 minutos, luego de este tiempo se saca el crisol y se lo lleva a un desecador y cuando se ha enfriado se pesa.

El contenido de materias volátiles se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$M_v = \frac{P - P_1}{P} \times 100 - H$$

siendo :

M_v = Contenido de materias volátiles, en por ciento en peso, calculado sobre base seca

P = Peso de la muestra empleada sin secar, en gramos

P_1 = Peso del residuo, en gramos

H = Contenido de humedad, en por ciento, sobre base húmeda

CONTENIDO DE CARBONO FIJO EN CARBON VEGETAL

Para la determinación del contenido en carbono fijo, en carbón vegetal, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\mathbf{CF = 100 - (CH_S + CC_S + MV_S)}$$

donde: CF = Contenido de carbono fijo, en por ciento, sobre base seca

CH_S = Contenido de humedad, en por ciento, sobre base seca

CC_S = Contenido de cenizas, en por ciento, sobre base seca

MV_S = Contenido de materias volátiles, en por ciento, sobre base seca

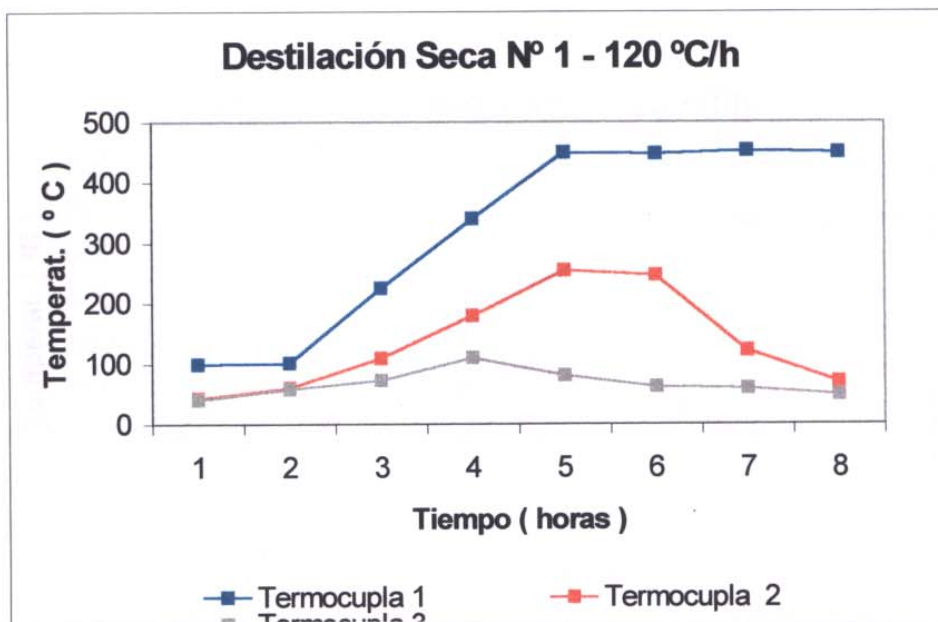
ANEXO 5

MARCHA DE LAS DESTILACIONES SECAS

DESTILACION SECA N° 1

Realizada con una velocidad de calentamiento de 120 °C por hora y 450 °C de temperatura final.

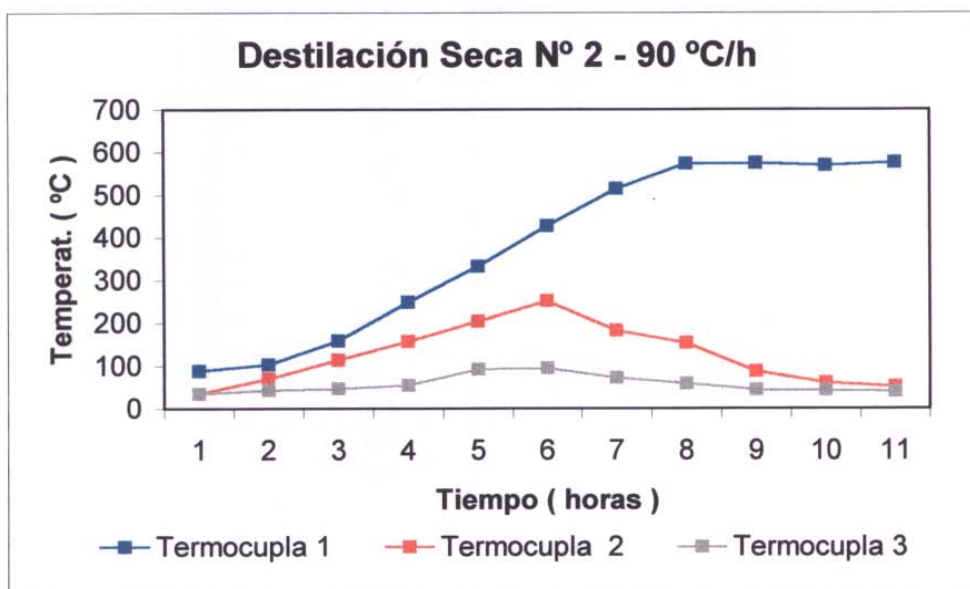
Tiempo/horas	Termocupla 1	Termocupla 2	Termocupla 3
6.3	99	42	40
7.3	101	60	58
8.3	225	108	72
9.3	340	179	109
10.3	449	254	80
11.3	447	246	62
12.3	452	121	59
13.3	449	69	48



DESTILACION SECA N° 2

Realizada con una velocidad de calentamiento de 90 °C por hora y 570 °C de temperatura final.

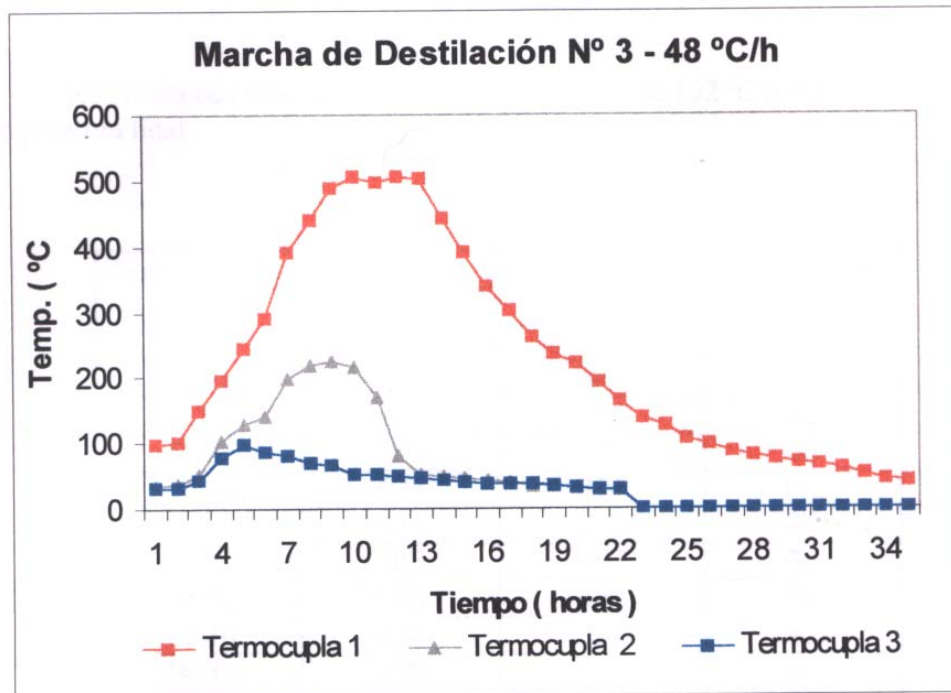
Tiempo/horas	Termocupla 1	Termocupla 2	Termocupla 3
10.3	87	35	34
11.3	102	69	43
12.3	158	113	46
13.3	248	156	55
14.3	332	203	92
15.3	427	251	94
16.3	515	182	72
17.3	573	152	58
18.3	574	86	44
19.3	569	59	42
19.3	575	50	40



DESTILACION SECA N° 3

Realizada con una velocidad de calentamiento de 48 °C por hora y 500 °C de temperatura final.

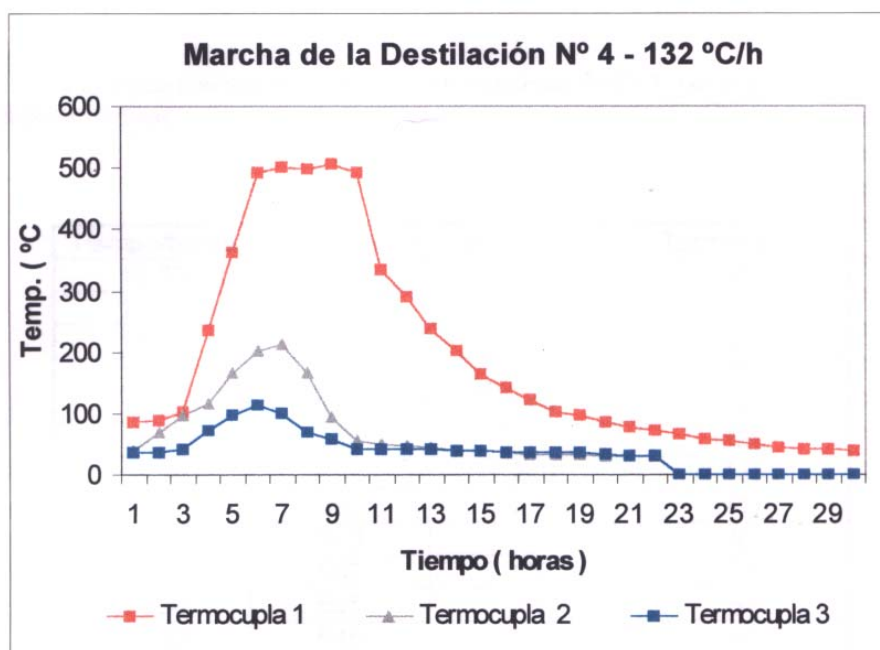
Tiempo/horas	Termocupla 1	Termocupla 2	Termocupla 3
5.30	98	34	33
6.30	101	37	33
7.30	150	52	43
8.30	195	103	78
9.30	243	128	99
10.30	290	142	86
11.30	391	197	79
12.30	440	217	68
13.30	487	225	67
14.30	505	215	53
15.30	498	168	51
16.30	504	81	48
17.30	501	51	45
18.30	441	49	43
19.30	391	47	39
20.30	339	43	37
21.30	302	39	36
22.30	262	35	36
23.30	235	34	35
0.30	221	33	33
1.30	191	30	30
2.30	165	28	28
3.30	138	-	-
4.30	125	-	-
5.30	106	-	-
6.30	98	-	-
7.30	85	-	-
8.30	81	-	-
9.30	74	-	-
10.30	69	-	-
11.30	65	-	-
12.30	61	-	-
13.30	52	-	-
14.30	44	-	-
15.30	40	-	-



DESTILACION SECA N° 4

Realizada con una velocidad de calentamiento de 132 °C por hora y 500 °C de temperatura final.

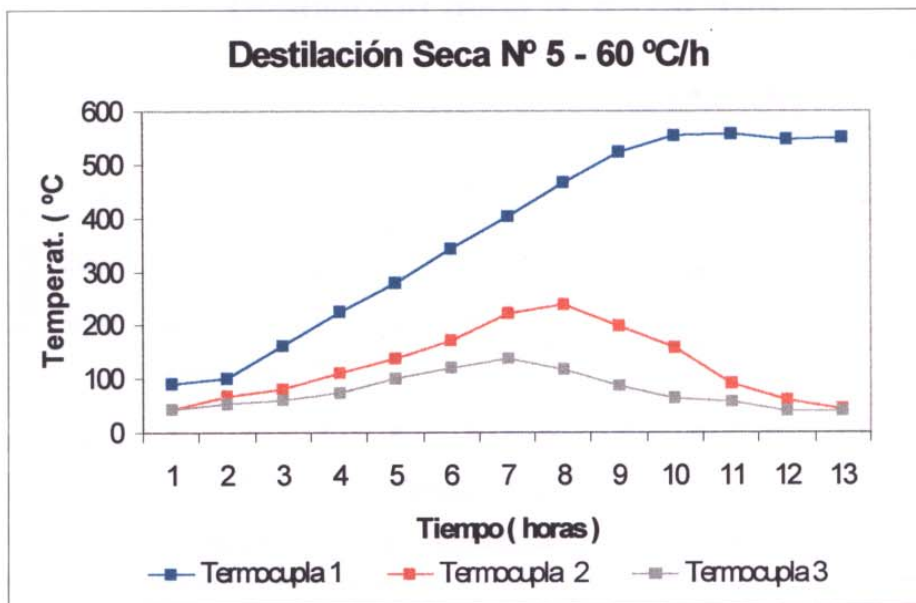
Tiempo/horas	Termocupla 1	Termocupla 2	Termocupla 3
4.30	85	38	35
5.30	89	69	37
6.30	101	98	41
7.30	235	116	72
8.30	363	167	98
9.30	491	203	112
10.30	501	213	99
11.30	498	167	68
12.30	505	95	57
13.30	493	54	42
14.30	335	51	41
15.30	291	48	41
16.30	238	45	41
17.30	201	40	39
18.30	163	38	39
19.30	140	35	37
20.30	121	34	37
21.30	103	34	35
22.30	96	32	35
23.30	85	31	33
0.30	78	31	31
1.30	71	30	31
2.30	65	-	-
3.30	59	-	-
4.30	54	-	-
5.30	49	-	-
6.30	44	-	-
7.30	42	-	-
8.30	41	-	-
9.30	38	-	-



DESTILACION SECA N° 5

Realizada con una velocidad de calentamiento de 60 °C por hora y 550 °C de temperatura final.

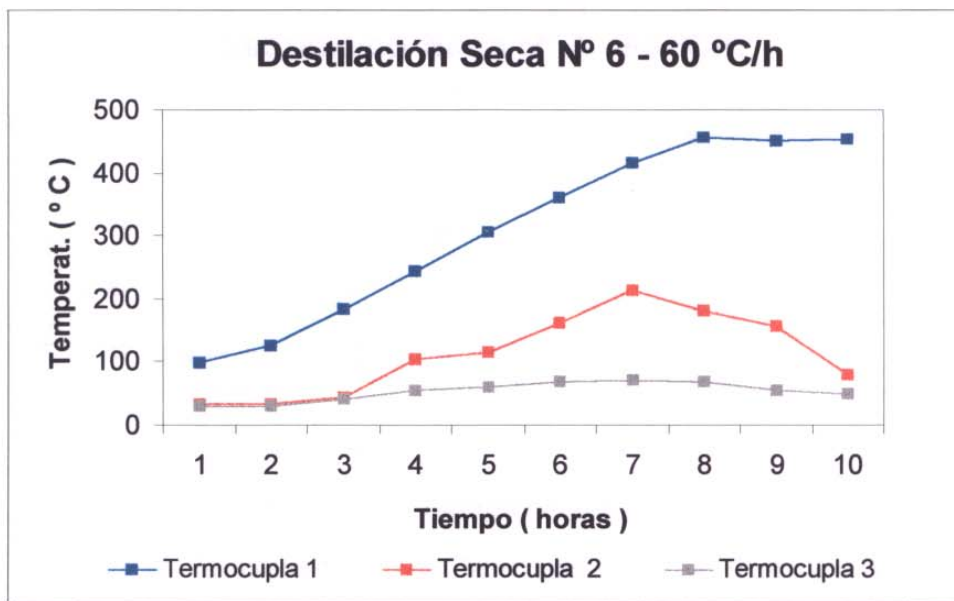
Tiempo/horas	Termocupla 1	Termocupla 2	Termocupla 3
12.30	91	45	44
13.30	102	68	55
14.30	160	82	61
15.30	225	110	75
16.30	279	139	101
17.30	342	172	120
18.30	401	220	138
19.30	465	238	117
20.30	523	198	87
21.30	553	157	64
22.30	555	89	57
23.30	548	62	41
0.30	551	45	40



DESTILACION SECA N° 6

Realizada con una velocidad de calentamiento de 60 °C por hora y 450 °C de temperatura final.

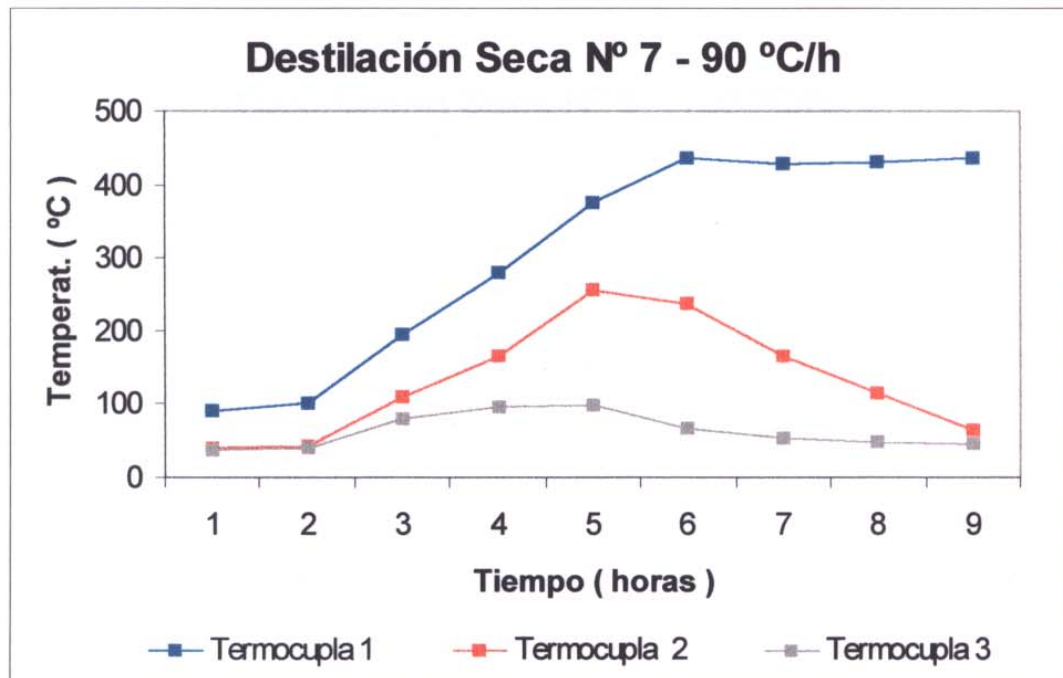
Tiempo/horas	Termocupla 1	Termocupla 2	Termocupla 3
15.30	97	33	30
16.30	125	34	31
17.30	182	45	42
18.30	243	103	55
19.30	305	116	61
20.30	360	161	68
21.30	415	212	72
22.30	455	180	68
23.30	450	157	55
0.30	454	80	48
1.30	448	62	36



DESTILACION SECA N° 7

Realizada con una velocidad de calentamiento de 90 °C por hora y 430 °C de temperatura final.

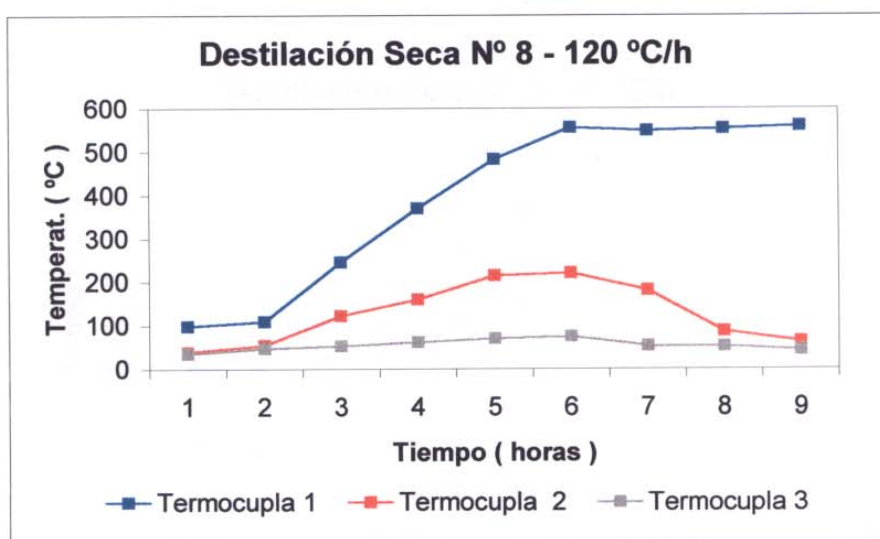
Tiempo/horas	Termocupla 1	Termocupla 2	Termocupla 3
5.30	91	39	37
6.30	100	42	39
7.30	193	108	81
8.30	280	164	95
9.80	375	256	98
10.30	435	237	67
11.30	428	166	53
12.30	431	115	48
13.30	436	64	45



DESTILACION SECA N° 8

Realizada con una velocidad de calentamiento de 120 °C por hora y 550 °C de temperatura final.

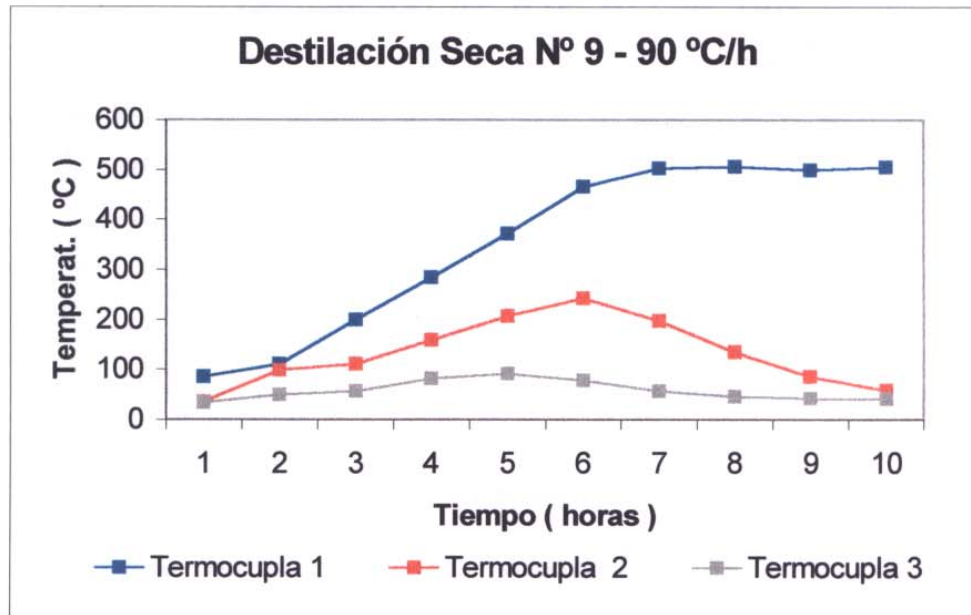
Tiempo/horas	Termocupla 1	Termocupla 2	Termocupla 3
5.00	98	38	35
6.00	108	54	46
7.00	245	122	52
8.00	368	159	61
9.00	482	213	69
10.00	555	220	74
11.00	548	180	53
12.00	552	86	51
13.00	558	62	43



DESTILACION SECA N° 9

Realizada con una velocidad de calentamiento de 90 °C por hora y 500 °C de temperatura final.

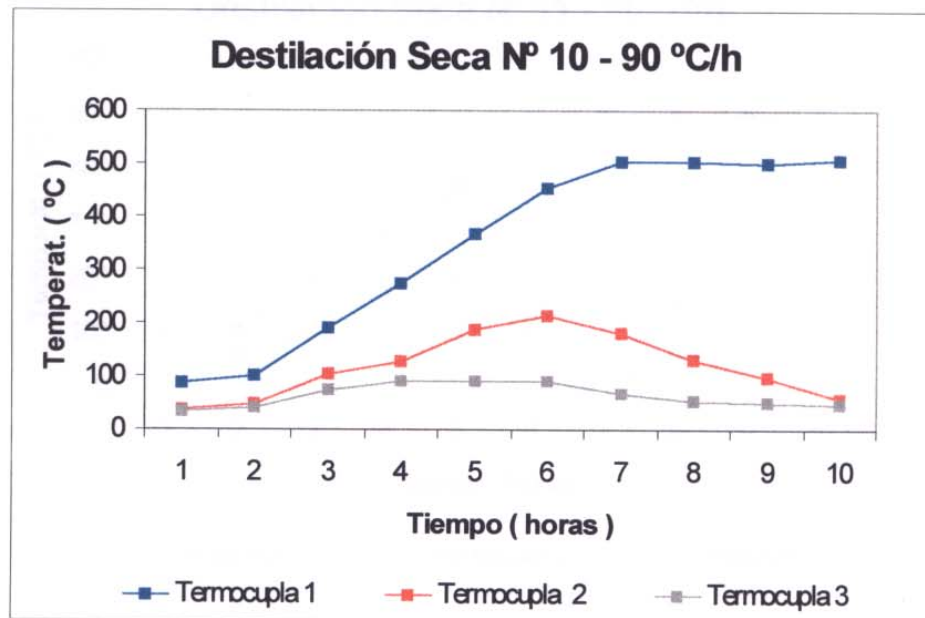
Tiempo/horas	Termocupla 1	Termocupla 2	Termocupla 3
5.45	85	35	34
6.45	110	98	49
7.45	198	110	56
8.45	283	158	81
9.45	370	205	91
10.45	465	241	78
11.45	502	196	56
12.45	505	134	45
13.45	498	85	42
14.45	504	57	41



DESTILACION SECA N° 10

Realizada con una velocidad de calentamiento de 90 °C por hora y 500 °C de temperatura final.

Tiempo/horas	Termocupla 1	Termocupla 2	Termocupla 3
5.15	87	38	34
6.15	101	48	39
7.15	190	103	73
8.15	275	126	89
9.15	368	186	91
10.15	453	213	90
11.15	502	179	68
12.15	505	130	54
13.15	499	98	51
12.15	506	58	48



DESTILACION SECA N° 11

Realizada con una velocidad de calentamiento de 90 °C por hora y 500 °C de temperatura final.

Tiempo/horas	Termocupla 1	Termocupla 2	Termocupla 3
12.15	97	41	40
13.15	103	64	51
14.15	195	105	58
15.15	283	182	83
16.15	370	201	92
17.15	458	259	112
18.15	507	206	87
19.15	499	147	63
20.15	502	80	51
21.15	501	57	46

