

## **TRABAJO FINAL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL**

### **TÍTULO**

Evaluación de las propiedades físico-químicas de carbones vegetales, elaborados en horno metálico transportable, a partir de madera de Acacia negra (*Gleditsia triacanthos* L.)

### **ALUMNO**

Nombre y Apellido: Juan Ignacio Churrarín

Nº de Legajo: 25.531/9

DNI: 32.109.033

Dirección de correo electrónico: [juanignacioforestal@gmail.com](mailto:juanignacioforestal@gmail.com)

Teléfono: (0221) 606-8199

### **MODALIDAD**

Trabajo de Investigación en un campo de las Ciencias Agrarias y Forestales.

### **DIRECTORA**

Dra. Ing. Ftal. Natalia Raffaeli

Profesora Adjunta. Curso Industrias de Transformación Química.

### **CO-DIRECTORA**

Dra. Ing. Ftal. María Laura Tonello

Jefa de Trabajos Prácticos. Curso Industrias de Transformación Química.

### **ÁREAS DE TRABAJO**

Industrias de Transformación Química. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal.

Análisis Químico. Departamento de Ciencias Exactas.

Laboratorio de Físico Química. Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Regional La Plata.

### **LUGAR Y FECHA DE ENTREGA**

La Plata, Octubre de 2019



## RESUMEN

La especie exótica *Gleditsia triacanthos* ("Acacia negra") se ha establecido exitosamente en la provincia de Buenos Aires, generando distintos problemas ecosistémicos y productivos en predios agrícolas, ganaderos, forestales y áreas de conservación. Su alta tasa de emergencia, producción de semillas y periodo juvenil corto, generan matas densas en los márgenes de cuerpos de agua, con lo cual, contribuye a un desarrollo bien distinto al del hábitat natural. Además invade caminos rurales y praderas de predios ganaderos donde es muy difícil su erradicación. El manejo mecánico no es suficiente ya que esta especie rebrota y reaparece el inconveniente generando un gasto importante. Ante este problema, el objetivo de este trabajo fue la evaluación de las características físico-químicas del carbón de acacia negra, a vistas de un posible uso como material dendroenergético. Para su evaluación se analizaron los contenidos de humedad, de volátiles, de cenizas, de carbono fijado y el poder calorífico de los carbones obtenidos en un horno semi-industrial de tipo TPI y en una mufla en laboratorio. Los contenidos de volátiles (36,60% y 35,02% para horno TPI y mufla respectivamente) se encontraron dentro de los parámetros teóricos (30%-40%); los valores de contenidos de cenizas (1,94% y 1,22% para horno TPI y mufla respectivamente) se mostraron muy por debajo del máximo aceptable (5%); los porcentajes de carbono fijado (63,04% y 62,18% horno TPI y mufla respectivamente), se encontraron dentro de los parámetros teóricos (50%-95%) y los valores de poder calorífico (33,47 kJ/g y 35,35 kJ/g para horno TPI y mufla respectivamente), fueron similares a otros provenientes de especies nativas actualmente utilizadas comercialmente y de otras especies exóticas aptas para carbonización. En conclusión, se obtuvo un carbón con buenas aptitudes para el uso doméstico, siendo una alternativa tecnológica factible de considerar para enfrentar el problema de la Acacia negra en la Provincia de Buenos Aires.



## ÍNDICE

INTRODUCCION .....	5
OBJETIVOS.....	8
Objetivo General .....	8
Objetivos Específicos.....	8
MATERIALES Y MÉTODOS .....	9
Materia Prima.....	9
Horno Metálico Transportable .....	9
Proceso Tecnológico.....	10
Laboratorio.....	11
Contenido de Humedad Relativa de la madera.....	11
Pirólisis de la madera para la obtención de carbón en mufla .....	12
Acondicionamiento de carbones para su posterior análisis .....	13
Determinación de los parámetros físico-químicos principales para caracterizar el material desde el punto de vista energético .....	13
RESULTADOS .....	16
Contenido de Humedad .....	16
Rendimiento de carbonización en mufla y horno.....	16
Contenido de Volátiles .....	17
Contenido de Cenizas.....	17
Cálculo del Contenido de Carbono Fijo .....	17
Poder Calorífico .....	17



DISCUSION.....	18
Rendimiento de carbonización.....	18
Rendimiento de volátiles.....	18
Rendimiento de Cenizas.....	19
Carbono Fijo.....	20
Poder calorífico.....	20
CONCLUSIONES.....	21
BIBLIOGRAFIA.....	23
TABLAS.....	25
FIGURAS.....	31
ANEXO FOTOGRAFICO.....	36

## INTRODUCCION

La carbonización de la madera consiste en la transformación del material leñoso en carbón, bajo la sola influencia de la temperatura controlando la entrada del aire, mediante el proceso de descomposición térmica llamado pirólisis. El carbón vegetal tiene diversas aplicaciones, ya sea como combustible o como insumo industrial. En la Argentina, el proceso emplea principalmente maderas de latifoliadas provenientes en su gran mayoría de bosques nativos. Entre los usos domésticos del carbón vegetal están las aplicaciones gastronómicas y de calefacción, mientras que el uso industrial se ve en actividades tales como el secado de otros productos, en la industria siderúrgica y en la cementera, entre otros. En varias comunidades rurales y semi-rurales se recurre al empleo de leña como fuente energética, a través de una combustión abierta, ineficiente y sin ningún control del proceso. El conocimiento de la técnica de carbonización permite elaborar un material de mayor poder calorífico, a través de un método de bajo costo y simple de aprender, ya sea para uso propio - gastronomía o calefacción- y/o para proporcionar un producto factible de generar un ingreso monetario que complemente la economía familiar.

La producción en Argentina se realiza de manera semi-artesanal en hornos de ladrillo y barro conocidos como “media naranja”, que permiten alcanzar un buen nivel de carbonización con valores de carbono fijo que rondan el 60%-65%. Son frecuentemente vistos en explotaciones del norte argentino, especialmente en las provincias de Santiago del Estero, Chaco y Formosa, a partir de maderas como el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco* Schltdl.), el quebracho colorado (*Schinopsis lorentzii* Engl.) y el algarrobo (*Prosopis spp.*) (Raffaelli, 2016).

Una alternativa tecnológica de manufactura nacional son los hornos cilíndricos de acero, aptos para la producción de carbón vegetal a partir de madera de bosques o

desechos de aserradero. El producto obtenido es un carbón de alto contenido de carbono fijo, que puede llegar al 80% (Raffaeli, 2016). Este tipo de horno ha sido adquirido hace unos años por la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata, emplazado en la Estación Experimental de Los Hornos y puesto en marcha.

Normalmente la duración del proceso abarca de 3 a 5 días, dependiendo de la marcha de la carbonización, nivel de vientos de la zona, condiciones climáticas, experiencia del operario, etc. El horno metálico transportable suele necesitar un escaso mantenimiento y su vida útil alcanza unos 10 años utilizándolo en forma continua. (Raffaeli, 2016).

En relación al recurso maderero factible de ser carbonizado, varias especies se han reportado con una buena aptitud para la elaboración de carbón vegetal de alta calidad. Paralelamente, otras especies exóticas, de comportamiento invasivo, cuya presencia ha sido descripta, en especial, en numerosos campos de la provincia de Buenos Aires, podrían servir como materia prima adicional para la elaboración de biocombustibles sólidos tales como el carbón vegetal.

Entre las especies madereras posibles se encuentra la Acacia negra (*Gleditsia triacanthos*. L). Es una leñosa caducifolia, de la familia Leguminosas, originaria del este y centro de Estados Unidos, que crece hasta 20 m de altura y posee espinas prominentes generalmente ramificadas en tres. El fruto es una legumbre negra azucarada, comestible para el ganado, que escarifica las semillas facilitando la emergencia de nuevas plántulas en zonas no colonizadas. Prefiere un clima templado cálido con precipitación anual entre 500 y 1500 mm. Su reproducción anual es por lo general a partir de semillas que se producen en grandes cantidades y se mantienen viables por más de 20 años (Csurhes & Markula, 2010).



Esta especie es considerada una invasora exitosa ya que posee características que favorecen su rápida expansión; por ejemplo, su rápido crecimiento (60 cm/ año), alta tasa de emergencia, período juvenil corto y una alta producción de semillas (Marco & Páez, 2000). Forma matas densas a lo largo de las márgenes de cuerpos de agua, impide el acceso del ganado a los mismos y contribuye a acentuar los procesos de obstaculización de arroyos y ríos (Di Marzio et al., 2009). El sombreado de los arboles exóticos, como indica Feijóo *et al.* (2012), reduce o hace desaparecer la vegetación acuática en arroyos pampeanos. La reducción de macrófitas y sus algas asociadas se debería principalmente a la disminución de la luz que alcanza el 95% en verano, lo que produce a su vez una reducción de la amplitud térmica y del clima térmico (Giorgi *et al.*, 2014). Otro efecto importante producido por *Gleditsia thriacanthos* es el cambio en el ciclo de nutrientes en zonas de pastizal (Hobbs & Humphries, 1995), ya que puede fijar nitrógeno atmosférico y puede acelerar la velocidad de algunos procesos biogeoquímicos en el suelo así como incrementar las concentraciones de nutrientes (Kantola et al., 2009).

Lo mencionado contribuye a un hábitat muy distinto para las especies nativas y produce la fragmentación de los corredores de los sistemas fluviales que la fauna autóctona usa como refugio, áreas de alimentación y de desplazamiento (Ghersa et al., 2002).

No existen suficientes estudios que propongan diversas alternativas de uso para la acacia negra, ya que su manejo presenta complicaciones. En particular, escasean datos que brinden información para su potencial uso como material dendroenergético, por lo cual, este trabajo plantea que la opción tecnológica de la carbonización puede aportar una solución práctica para este material.

En vista de la coyuntura energética actual, de la existencia de economías de pequeña escala aisladas de la conexión a la red que se sirven de recursos leñosos para abastecerse de energía, y de la problemática puntual que demuestra el avance de la acacia negra en el territorio bonaerense, la metodología de la carbonización permitiría consolidar una técnica que provee una solución socioeconómica y ambiental más eficiente basada en los recursos naturales presentes en cada comunidad.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

El objetivo general del trabajo fue la evaluación de las propiedades físico-químicas de los carbones vegetales producidos a partir de material leñoso de Acacia negra, elaborado en un horno metálico transportable con vistas a su utilización comercial.

### **Objetivos Específicos**

- Elaborar carbón vegetal en un horno metálico transportable a partir de madera de Acacia negra, ajustando la técnica más conveniente en base a experiencias perfeccionadas.
- Evaluar en laboratorio las características físicas y químicas del carbón obtenido, considerando parámetros tales como humedad, contenido de volátiles, contenido de cenizas, contenido de carbono fijo y poder calorífico.
- Comparar las características del proceso de carbonización y del producto obtenido, a campo y en laboratorio, a partir del mismo material leñoso.

- Contrastar las propiedades del carbón de acacia negra con respecto a carbones provenientes de otras especies vegetales, incluyendo los de tipo comercial.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Materia Prima**

La leña fue obtenida de una masa invasora de acacia negra ubicada en el Parque Provincial Pereyra Iraola del partido de Berazategui. Los árboles fueron cortados en el mes de octubre de 2017 por trabajadores del Vivero Forestal “Carlos Darwin” y procesados en trozas de entre 5 a 50 cm de diámetro y 60 cm de largo. Las trozas fueron clasificadas en clases diamétricas para una carbonización lo más homogénea posible y permanecieron estacionadas 6 meses para su secado natural en el predio del vivero. Una vez transcurridos los 6 meses, se transportaron hasta la Estación Experimental “Julio Hirschhorn”, ubicada en Los Hornos, partido de La Plata, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP, donde se encuentra ubicado el horno metálico de carbonización. La totalidad de la carga de leña transportada fue pesada en balanza industrial. (Figura 1).

### **Horno Metálico Transportable**

Para realizar la carbonización se utilizó un horno del tipo “Tropical Products Institute” (TPI), el cual está constituido por dos cilindros de chapa de acero inoxidable encastrables, de 2,30 metros de diámetro por 0,90 metros de altura, finalizando en una tapa cónica con 4 boquillas para escape de humos; posee adicionalmente 8 canales inferiores o humeras sobre los que se montan alternadamente 4 chimeneas que permiten la entrada y salida controlada del aire. El fabricante es una empresa argentina, Teknycampo SRL, ubicada en la provincia de Santa Fe, Argentina. Este

horno posee una capacidad de 6 a 7 m<sup>3</sup> de madera ( $\approx$  3.000 kg) (Teknicampo, 2016), con un rendimiento aproximado del 20-25%, alcanzando una temperatura en el interior del horno de 500 a 600°C (Raffaelli, 2016). (Figuras 2 y 3).

### **Proceso Tecnológico**

La carbonización en horno cilíndrico metálico atraviesa una serie de etapas, descritas brevemente a continuación:

- a. Armado y ensamblado del horno: El primer anillo del horno se monta sobre las 8 humeras dispuestas radialmente en el suelo, que debe estar limpio y apisonado.
- b. Carga del material leñoso y cierre mediante colocación de la tapa y chimeneas: Se carga la madera generalmente en disposición radial desde el suelo hasta el nivel del primer anillo y luego se monta el segundo cilindro para continuar la carga hasta completar la altura de la unidad. Se termina colocando la tapa cónica dejando destapadas inicialmente las boquillas superiores para permitir el escape de los humos preliminares.
- c. Encendido desde la base del equipo y puesta en marcha: Se prende con la ayuda de pequeñas ramas secas y papel introducidos por debajo del anillo inferior, comenzando por la zona opuesta a la dirección principal de los vientos predominantes, y luego se continúa el encendido de forma circular alrededor de la base. Una vez encendido en su totalidad, se cierran las boquillas superiores de la sección cónica colocando las tapas provistas.
- d. Monitoreo y alternancia de chimeneas para facilitar la circulación pareja del aire dentro del horno: Se verifica la progresión de los humos a lo largo del proceso. Normalmente al inicio son blancos y espesos, luego se tornan grisáceos, azulinos y por último transparentes y menos densos. Las 4 chimeneas móviles van rotando en



forma manual su posición en la base del horno cada 8 a 10 horas de manera de permitir la correcta y pareja circulación de aire dentro del equipo (Figura 4).

e. Terminación del proceso mediante el sellado total del equipo (ausencia de oxígeno): Cuando se determina el final de la carbonización -humos transparentes- se retiran las chimeneas y se tapan todas las entradas de oxígeno con tierra húmeda con el fin de evitar el avance de la combustión del material.

f. Enfriado y apertura del horno: Para abrir el horno, se debe verificar el completo enfriamiento de la unidad, para evitar posibles incendios espontáneos provocados por la entrada abrupta del aire si aún persisten focos encendidos.

g. Descarga y embolsado del material: El horno se desarma y se procede al acopio del carbón en bolsas.

Las bolsas con el carbón producido fueron pesadas utilizando un dinamómetro para así poder calcular el rendimiento de carbonización mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Rend. Carbonización (\%)} = \text{Psc} / \text{Psm} \times 100$$

Psc: peso seco del carbón

Psm: peso seco de la madera

## Laboratorio

### Contenido de Humedad Relativa de la madera

Se tomó una alícuota de madera seca al aire y se la trozó en pequeñas astillas. Las alícuotas, cada una de 2 gramos aproximadamente, fueron puestas en un vaso de aluminio, previamente tarado, y llevadas a estufa a 105° por 24-48 horas, hasta peso



constante. Al término del procedimiento, se dejaron en desecador para su estabilización y posterior pesada. Para el cálculo del contenido de humedad, se utilizó la siguiente fórmula:

$$CH\% = [(Ph - Ps) / Ps] \times 100$$

Ph: peso húmedo

Ps: peso seco

### **Pirólisis de la madera para la obtención de carbón en mufla**

La pirólisis de las muestras de madera de acacia negra se realizaron en una mufla de laboratorio bajo condiciones controladas, atendiendo a los siguientes parámetros: rampa de aumento de temperatura, temperatura final, tiempo total de residencia, y control de entrada de oxígeno.

Se utilizó una mufla eléctrica regulable, modelo Indef 134, de fabricación nacional, con una capacidad de cámara de 16cm x 10cm x 10cm, y una temperatura máxima admisible de 1.250°C (Figura 5). Todos los controles estuvieron automatizados y se programó según las necesidades de cada fase de análisis.

Cada tratamiento realizado se reflejó en un programa específico, que contempló los parámetros mencionados anteriormente. Este comportamiento del perfil de temperatura en función del tiempo se puede ver esquematizado en la Figura 6.

El tratamiento seleccionado para llevar a cabo la pirólisis consistió en depositar una muestra de entre 10 y 25 gramos de material seco (madera) en un crisol de porcelana termotratado previamente, y someterlo a un calentamiento gradual, a razón

de 1°C/minuto, hasta llegar a una temperatura final de 500°C. La muestra se mantuvo a esa temperatura durante 4 horas.

Al finalizar el procedimiento, se dejó descender la temperatura gradualmente hasta temperatura ambiente y luego las muestras (carbón vegetal) fueron trasladadas a un desecador para su acondicionamiento y posterior pesada.

### **Acondicionamiento de carbones para su posterior análisis**

Las muestras de carbón procedentes de la carbonización en horno metálico y en mufla, se procesaron en un mortero de porcelana hasta lograr un polvillo homogéneo denominado “carbonilla”. (Figura 7). Parte de ésta se utilizó para los análisis físico-químicos y otra porción para la medición del poder calorífico en bomba calorimétrica.

### **Determinación de los parámetros físico-químicos principales para caracterizar el material desde el punto de vista energético**

Esta fase experimental fue realizada en el Laboratorio de Análisis Químico de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata, según normas ASTM adaptadas (ASTM D1762 “Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal”).

Se realizaron los siguientes análisis para los carbones obtenidos en los dos tratamientos (Horno TPI y mufla):

#### **I. Determinación de contenido de humedad del carbón obtenido**

Se tomaron alícuotas de 2 gramos de carbón de ambos tratamientos (horno y mufla) y se colocaron en un crisol previamente tarado y llevados a estufa a 105° por 24 hs hasta peso constante. Al finalizar el procedimiento, fueron llevadas a desecador para su estabilización y posterior pesada. Ambos tratamientos se analizaron por triplicado.

#### **II. Determinación de volátiles**

Se tomaron muestras de 2 gramos de carbón de ambos tratamientos y se colocaron en un crisol con tapa, previamente tarado, y se llevaron a mufla. Luego de probar diferentes alternativas en cuanto a la programación de la secuencia de temperaturas y rampas, se optó por el programa que producía la menor variabilidad. Este consistió en una rampa de ascenso de temperatura de 8°C/min, una temperatura máxima de 600°C, 2 horas de mantenimiento a temperatura máxima y descenso hasta temperatura ambiente de manera espontánea (enfriamiento natural de la mufla). Las muestras fueron llevadas a desecador para su enfriamiento y posterior pesada.

#### **III. Determinación de cenizas**

Se tomaron muestras de 2 gramos de carbón de ambos tratamientos en un crisol sin tapa, previamente tarado, y se llevaron a mufla. Las características del programa utilizado fueron: rampa de 8°C/min, temperatura máxima de 900°C, 2 horas de mantenimiento (a temperatura máxima) y descenso natural hasta temperatura ambiente. Las muestras fueron llevadas a desecador para su enfriamiento y posterior pesada.

#### **IV. Determinación de carbono fijo**

La fórmula utilizada para la determinación de carbono fijo fue la siguiente:

$$\text{CF (\%)} = 100 - [\text{CH (\%)} + \text{Vol (\%)} + \text{Cen (\%)}]$$

Donde:

CF= Carbono Fijo

CH= Contenido de Humedad

Vol= Contenido de Volátiles

Cen= Contenido de Cenizas

## **V. Determinación de poder calorífico**

Se define al poder calorífico de una sustancia, como la cantidad de calor que se genera (expresada, por ejemplo, en Joules/gramo) al oxidarse completamente.

Se determinó el poder calorífico de las muestras de madera y su respectivo carbón mediante la utilización de una bomba calorimétrica (Figura 8). Estas determinaciones fueron realizadas en el Laboratorio de Física y Química del Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata.

En cada caso, se utilizó una alícuota de 1 gramo, la cual fue compactada y colocada en el interior de la cámara de combustión del calorímetro. La cámara fue herméticamente cerrada, tras lo cual se incorporó oxígeno a presión. Se conectaron las terminales de la resistencia (alambre de acero al carbono) a un generador eléctrico, y se incorporó al calorímetro una masa previamente pesada de agua. Bajo agitación permanente del agua, se realizaron mediciones periódicas de la temperatura del ensayo, hasta que se tornara constante. La combustión de la muestra se logró accionando el sistema eléctrico de encendido, tras lo cual se midió el aumento de la temperatura del agua a intervalos regulares hasta alcanzar un valor máximo. El poder calorífico fue calculado a partir de fórmulas estándar según la constante del calorímetro.

## **VI. Análisis Estadístico**

Se realizó un análisis de la varianza acoplado a un test de comparaciones múltiples (Test HSD de Tukey), para evaluar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos analizados, para las variables de rendimiento en volátiles y cenizas. El nivel de significancia de la prueba fue  $\alpha = 0,05$ .

Estos análisis estadísticos fueron realizados mediante el uso del software estadístico InfoStat (Versión 2012, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina).

## **RESULTADOS**

### **Contenido de Humedad**

El contenido de humedad de la madera previo a la carbonización fue de 34,8%. Para el carbón, los contenidos de humedad fueron de 5,59% y 2,51% para horno y mufla respectivamente.

### **Rendimiento de carbonización en mufla y horno**

Se realizaron 4 carbonizaciones, con 2 muestras en cada una, en mufla de laboratorio, dando un promedio de 27,52% de rendimiento de carbonización, como se visualiza en la Tabla 1.

En el caso de la carbonización en horno, el peso de la carga de madera fue de 1.900 kg y el peso seco de 1.409,49 kg. Con respecto al carbón, el peso fue de 358,52 kg y el peso seco de 345,32 kg. En base a estos datos se determinó que el rendimiento de carbonización en el horno TPI fue de 24,5%. Resulta importante remarcar que en alguna de las carbonizaciones a campo parte de la carga se perdió

por combustión debido a un posible problema en el sellado del horno, que permitió la entrada del aire en niveles superiores a los requeridos. Dichas vicisitudes fueron contempladas al momento de realizar los cálculos de rendimiento.

### **Contenido de Volátiles**

Los rendimientos en contenido de volátiles del carbón obtenido en mufla y horno fueron de 36,60% y 35,02% respectivamente. El resultado del análisis de la varianza mostró que no hubo diferencias significativas en el rendimiento de volátiles con respecto a los tratamientos aplicados. Los resultados se presentan en las Tablas 2 y 3.

### **Contenido de Cenizas**

Los rendimientos de cenizas en mufla y horno fueron de 1,22% y 1,94% respectivamente. En el análisis estadístico, se observó que hubo diferencias significativas entre los dos tratamientos. Los resultados se presentan en las Tablas 4 y 5.

### **Cálculo del Contenido de Carbono Fijo**

En base a los datos de rendimiento de contenido de volátiles y de cenizas obtenidos se calculó el porcentaje de carbono fijado, siendo para horno y mufla de 63,04% y 62,18% respectivamente. No se consideró en este caso el contenido de humedad de las muestras ya que se partió de carbones anhidros. La Tabla 6 resume los valores determinados para estos parámetros.

### **Poder Calorífico**

Los poderes caloríficos promedio para la madera, carbón de horno y carbón de mufla fueron 21,36 kJ/g, 33,47 kJ/g y 35,35 kJ/g respectivamente. Los datos se

observan en las Tablas 7 y 8. Se observaron diferencias significativas entre el poder calorífico de la madera y de los carbones, lo cual resalta el valor energético superior de estos materiales una vez pirolizados.

## **DISCUSION**

### **Rendimiento de carbonización**

Entre los factores que influyen favorablemente en el rendimiento de carbonización en hornos metálicos pueden mencionarse: elevada densidad de la madera, bajo contenido de humedad en la madera, condiciones de baja humedad ambiente durante la operación y un sitio con adecuado drenaje para el horno, y elevada densidad de empaque gracias a formas y tamaños regulares de la materia prima (FAO 1983).

Según datos de la FAO, los programas de carbonización en horno TPI, en siete países, han reportado un rendimiento medio de carbón vegetal, incluyendo carbonilla fina, del 26% sobre base seca.

El rendimiento obtenido en el horno TPI (24,5%) se podría incrementar mejorando el sellado del mismo con el fin de evitar pérdidas de carga por incineración y acercarse más al rendimiento en laboratorio (27,52%). Estas consideraciones fueron ajustándose en los sucesivos ciclos de carbonización realizados, hasta llegar a un rendimiento real que se acercó bastante al que reporta la literatura.

### **Rendimiento de volátiles**

FAO define a un buen carbón comercial con un rendimiento de volátiles de alrededor de 30% y con un máximo de 40% (FAO 1985). Foley también coincide con



estos valores para el carbón de uso doméstico con un mínimo de 20-30% y un máximo de 40% (Foley, 1986). Otros autores también coinciden en que el carbón destinado a la cocción de alimentos en parrilla contiene típicamente 20-30% de compuestos volátiles, mientras que, para otros usos, tales como la industria metalúrgica, el carbón a menudo contiene un 10-15% de materia volátil, o incluso menos (Domac et al., 2008). Entre los compuestos presentes en la fracción volátil se incluyen el ácido acético, el metanol, la acetona, que pueden llegar a interferir con el proceso de encendido y su calidad de combustión. Si un carbón posee un alto contenido de volátiles, se encenderá fácilmente pero su combustión no será limpia y por lo tanto producirá mucho humo. En cambio, un carbón con menor contenido de volátiles será un poco más difícil de encender pero su combustión será más limpia (FAO, 1985).

Los rendimientos para las carbonizaciones realizadas en horno y mufla fueron de 36,60% y 35,02%, respectivamente, lo que indica que estos valores se encuentran dentro del rango aceptable para uso doméstico. Una posibilidad para disminuir el contenido de volátiles en el producto final podría ser el aumento de la temperatura máxima de pirólisis, pero teniendo en cuenta los efectos negativos sobre el rendimiento del proceso de carbonización. En estos casos se impone realizar un balance entre el tipo de uso que se le va a dar, el costo que implica su producción y el valor económico del producto generado.

### **Rendimiento de Cenizas**

El contenido de cenizas representa la materia mineral remanente luego de que toda la materia combustible haya sido quemada (FAO, 1983). El contenido de cenizas del carbón vegetal varía de aproximadamente 0,5% a 5%, dependiendo de la especie y la cantidad de corteza incluida con la madera en el horno. El carbón en trozos de buena calidad generalmente tiene un contenido máximo de ceniza de

aproximadamente el 3% (FAO, 1985). Antal & Grønli (2003), coinciden con estos valores de contenidos de cenizas.

Los resultados obtenidos a través de la carbonización en mufla y horno (1,22% y 1,94%) muestran un contenido de cenizas aceptable para carbones de buena calidad. El menor valor promedio encontrado para carbones producidos en laboratorio podría relacionarse a la presencia de mayor contenido relativo de corteza (aportante significativo de contenido mineral) del material carbonizado a campo con respecto al laboratorio y a una mayor temperatura alcanzada en la mufla, lo que generaría un mayor nivel de homogeneidad del perfil de temperatura en el interior del equipo, comparado con el horno semi-industrial a campo.

### **Carbono Fijo**

Según FAO, los valores de carbono fijo varían entre un 50% hasta un 95% como máximo. Cuanto mayor es el nivel de carbono fijo, mejora la calidad del carbón. Este proceso se ve favorecido con el aumento de la temperatura de carbonización, al disminuir la presencia de materiales volátiles. Sin embargo, este aumento de temperatura incrementa la proporción de cenizas y produce una baja en el rendimiento (Marcos Martín, 1989).

Los valores de carbono fijo obtenidos, tanto en carbón de horno TPI (63,04%), como en laboratorio (62,18%), están dentro de los parámetros aceptables para el uso doméstico según la literatura.

### **Poder calorífico**

Analizando el poder calorífico de la leña y el carbón, se observó que el poder calorífico del carbón presenta diferencias significativas con aquel producido por la

madera. Los carbones producidos en horno y mufla no presentaron diferencias en este apartado.

Comparando los valores del carbón de Acacia negra (*Gleditsia triacanthos*) con carbones de Ligustro (*Ligustrum lucidum*), Paraíso (*Melia azedarach*) y Eucalyptus, carbonizados a través de la misma metodología, se observó que poseen valores análogos. Además, estos valores son similares a los alcanzados por especies nativas utilizadas para la producción de carbón comercial como Quebracho colorado (*Schinopsis balansae*) y Quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*), y mayores a los reportados para Algarrobo blanco (*Prosopis alba*) y Algarrobo negro (*Prosopis nigra*). (Tabla 9)

## CONCLUSIONES

A partir de los análisis realizados, se puede concluir que la madera de *Gleditsia triacanthos* es apta para la fabricación de carbón vegetal de buena calidad para uso doméstico, por presentar valores aceptables de compuestos volátiles, bajos niveles de cenizas, buenos valores de carbono fijo como así también de poder calorífico. Si bien el rendimiento de carbonización podría mejorarse controlando mejor el sellado del horno, procurando de esta manera evitar pérdidas por combustión de la carga, los valores medios obtenidos muestran un rendimiento dentro de los parámetros habituales para la producción de carbón mediante el uso de hornos TPI.

Conociendo la problemática actual de la Acacia negra en la Provincia de Buenos Aires, debido entre varias razones a su facilidad reproductiva y rápido avance, provocando las alteraciones en el paisaje natural e incrementando los costos de manejo, la elaboración de carbón vegetal resultaría una estrategia viable para poder contribuir a detener la expansión de esta especie. La producción de carbón permitiría

crear diversas fuentes de trabajo durante las etapas de extracción de la madera, su transformación y acondicionamiento, la realización del proceso de carbonización en el horno, su posterior fraccionamiento, distribución y venta. Asimismo, generaría una mejora de los sitios intervenidos contribuyendo al control y eventual erradicación de esta invasora exótica en grandes superficies del territorio provincial.

Predios cercanos a la Ciudad de la Plata, como el Parque Pereyra Iraola y el Parque Ecológico Municipal, experimentan esta situación y han manifestado expresamente su preocupación por la presencia de esta especie que no detiene su avance, afectando simultáneamente relictos que aún conservan la vegetación natural. Claramente es imprescindible hallar una solución técnica a esta problemática y la carbonización podría sumarse como una práctica complementaria a los controles mecánicos y/o químicos que suelen realizarse para combatir su presencia. Los servicios paisajísticos y ambientales que estos predios brindan podrían verse comprometidos si no se enfrenta esta situación, ya que es notable el impacto que ocasiona, ya no solo desde el punto de vista ambiental sino también en el ámbito social y económico.

Es importante resaltar que este trabajo puede ser de gran aporte para futuras investigaciones relacionadas con la carbonización, no solo con acacia negra sino con otras especies leñosas aptas y disponibles; es esperable generar un cúmulo de saberes básicos y aplicados que permitan profundizar el conocimiento de esta actividad, a fin de proveer información de base confiable y estandarizada para productores, responsables de áreas naturales protegidas y otros usuarios interesados.

## BIBLIOGRAFIA

**ASTM D1762-84.** 2013. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

**Antal, M. J. Grønli, M.** 2003. "The Art, Science and Technology of Charcoal Production". *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2003, 42 (8), 1619-1640. DOI: 10.1021/ie0207919

**Csurhes, S. & A. Markula.** 2010. Honey locust tree: *Gleditsia triacanthos*. Department of Employment, Economic Development and Innovation, Queensland Government, 17 pp.

**Di Marzio WD; Sáenz ME; Alberdi JI; Fortunato N; Tangorra M; Capello V; Ambrini G.** 2009. "Estrategia de Manejo de Acacia Negra (*Gleditsia triacanthos*) en la Cuenca del Río Luján. Evaluación Ecotoxicológica del Herbicida Togar Bt". *Revista Argentina de Ecotoxicología y Contaminación Ambiental. Revista Argentina de Ecotoxicología.* Luján; Año 2009, Vol. 1 p. 1 – 8.

**Domac, J., Trossero, M., Siemmons, R.** "Industrial Charcoal Production". FAO, Zagreb. 2008.

**FAO.** 1983. "Métodos simples para fabricar carbón vegetal". FAO Montes 41. ISBN 92-5-301328-1.

**FAO.** 1985. "Industrial charcoal making". FAO Forestry Paper 63. Forest Industries Division. FAO Forestry Department. Rome. ISBN 92-5-102307-7.

**Feijoó, C., P. Gantes, A. Giorgi, J.J. Rosso y E. Zunino.** 2012. Valoración de la calidad de ribera en un arroyo pampeano y su relación con las comunidades de macrófitas y peces. *Biología Acuática*, 27: 113-128.

**Foley, G.** 1986. *Charcoal Making in Developing Countries*, Earthscan-International Institute for Environment and Development, London. ISBN 0905347609.

- Ghersa, C.M., E. de la Fuente, S. Suarez y R. León.** 2002. Woody species invasion in the Rolling Pampa. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 88: 271-278.
- Giorgi, A., C. Vilches, M.C. Rodríguez Castro, E. Zunino, J. Debandi, S. Kravetz y A. Torremorell.** 2014. Efecto de la invasión de acacia negra (*Gleditsia triacanthos* L. (Fabaceae)) sobre la temperatura, luz y metabolismo de un arroyo pampeano. *Acta Biológica Colombiana*, 19: 99-106.
- Hobbs, R. y S. Humphries.** 1995. An integrated approach to the ecology and management of plant invasions. *Conservation Biology*, 9: 761-770.
- Kantola, I, T. Boutton, T. Filley y C. Hallmark.** 2009. Carbon, nitrogen, and phosphorus increase in soil physical fractions following vegetation change from grassland to woodland. *Eos Trans. AGU*, 90(52) Fall Meeting Supplement.
- Marco, D. & S. Páez.** 2000. Invasion of *Gleditsia triacanthos* in *Lithraea ternifolia* montane forest of central Argentina. *Environmental Management*, 26(4): 409-419.
- Marcos Martín, Francisco.** 1989 “El carbón vegetal – propiedades y obtención”. ISBN: 84-7114-229-5. Edición Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Raffaelli, N.** 2016. “Elaboración de Carbón Vegetal en Horno Metálico Transportable”. Boletín de Extensión “Contacto Rural”. Número 3, 2016. ISSN: 1853-4252 FCAyF, UNLP, pp 14-15.
- Teknycampo.** 2016. Ficha Técnica provista por la Empresa: “Horno Metálico Transportable Para Elaboración De Carbón”. Santa Fe, Argentina.

## TABLAS

Tabla 1. Rendimientos de carbonización en mufla.

Carbonización	Peso seco	Peso seco	Rendimiento
	Madera (gr)	Carbón (gr)	(%)
1	16,30	4,58	28,08%
2	24,52	7,25	29,54%
3	28,42	7,95	27,95%
4	21,66	5,60	25,87%
5	41,83	12,47	27,62%
6	27,51	6,86	23,12%
7	42,15	12,80	28,28%
8	25,90	8,26	29,68%
		<b>Promedio</b>	<b>27,52%</b>



**Tabla 2. Rendimientos de volátiles en carbón obtenido en horno y en mufla.**

<b>Tratamiento</b>	<b>Peso seco (gr)</b>	<b>Peso volátiles (gr)</b>	<b>Rendimiento de volátiles (%)</b>
Horno1	2,04	0,70	34,23
Horno2	1,99	0,72	36,05
Horno3	2,08	0,73	34,91
Horno4	2,12	0,74	34,72
Horno5	2,02	0,71	35,19
<b>Promedio Horno</b>			<b>35.02</b>
Mufla1	2,05	0,76	36,91
Mufla2	2,00	0,83	41,40
Mufla3	2,21	0,70	31,53
Mufla4	2,06	0,70	33,83
Mufla5	2,07	0,80	38,38
Mufla6	2,12	0,80	37,56
<b>Promedio Mufla</b>			<b>36.60</b>

**Tabla 3: Análisis de la varianza del rendimiento de volátiles según el método de obtención del carbón.**

<b>Tratamiento</b>	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>E.E.</b>	<b>Test HSD de Tukey</b>
<b>Horno</b>	5	0,35	0,01	a
<b>Mufla</b>	6	0,37	0,01	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )



**Tabla 4: Rendimiento de cenizas de carbón de horno y de mufla.**

Tratamiento	Peso seco Carbón (gr)	Peso de cenizas (gr)	Rendimiento (%)
<b>Horno</b>	1,0013	0,0202	2,02
	1,0044	0,0194	1,93
	1,0201	0,0187	1,83
	1,0762	0,0153	1,42
	0,9708	0,0134	1,38
	1,0513	0,0205	1,95
	2,1943	0,0486	2,21
	2,1502	0,0457	2,13
	2,1171	0,0549	2,59
<b>Rendimiento promedio de cenizas de carbón de horno</b>			<b>1,94</b>
Tratamiento	Peso seco Carbón (gr)	Peso de cenizas (gr)	Rendimiento (%)
<b>Mufla</b>	1,0613	0,0160	1,51
	1,0504	0,0148	1,41
	1,0056	0,0140	1,39
	1,0796	0,0111	1,03
	0,9642	0,0034	0,35
	1,0947	0,0108	0,99
	2,0395	0,0256	1,26
	2,0630	0,0261	1,27
	2,0394	0,0259	1,27
	2,0634	0,0272	1,32
	2,0721	0,0294	1,42
2,1193	0,0303	1,43	
<b>Rendimiento promedio de cenizas de carbón de mufla</b>			<b>1,22</b>



**Tabla 5: Análisis de la varianza del rendimiento de cenizas según el método de obtención del carbón.**

Tratamiento	n	Media	E.E.	Test HSD de Tukey
Horno	12	0,01	9,9E-04	a
Mufla	9	0,02	1,1E-03	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Tabla 6. Rendimiento de la carbonización, contenido de volátiles, contenido de cenizas y nivel de carbono fijo.**

Tratamiento	Rendimiento Carbonización (%)	Contenido de Volátiles (%)	Contenido de Cenizas (%)	Carbono Fijo (%)
Horno	24,5%	35,02%	1,94%	63,04%
Mufla	27,52%	36,60%	1,22%	62,18%



**Tabla 7. Poder Calorífico de la madera de acacia negra y el carbón de esta misma especie producido en horno TPI y en mufla de laboratorio.**

Muestra	Repetición	PC $\Delta H$ kJ/g	PC $\Delta H$ kcal/g
Madera	1	19,31	4,62
	2	20,25	4,84
	3	24,53	5,86
	<b>Promedio</b>	<b>21,36</b>	<b>5,10</b>
Carbón Horno	1	29,32	7,01
	2	37,62	8,99
	<b>Promedio</b>	<b>33,47</b>	<b>8,06</b>
Carbón Mufla	1	36,96	8,84
	2	32,9	7,88
	3	36,18	8,65
	<b>Promedio</b>	<b>35,35</b>	<b>8,44</b>

**Tabla 8: Análisis de la varianza del poder calorífico de la madera y el carbón de acacia según el método de obtención del carbón.**

Muestra	n	Media	E.E.	Test HSD de Tuckey
Madera	3	21,36	1,99	a
Carbón Horno	2	33,47	2,43	b
Carbón Mufla	3	35,35	1,99	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )



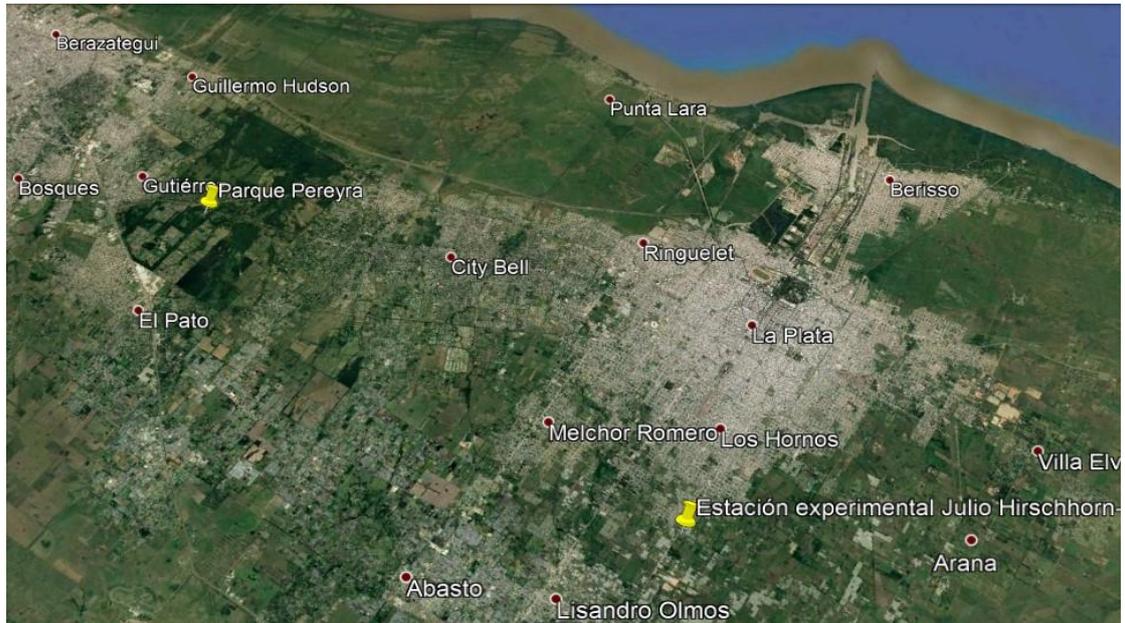
**Tabla 9. Poder calorífico del carbón de otras especies madereras, incluyendo productos comerciales.**

Espece	$\Delta H$ kJ/g
<i>Gleditsia triacanthos</i> *	33,47 – 35,35
<i>Ligustrum lucidum</i> *	33,12
<i>Melia azedarach</i> *	37,63
<i>Eucalyptus</i> sp.*	34,78
<i>Schinopsis balansae</i> #	32,77
<i>Aspidosperma quebracho-blanco</i> #	33,10
<i>Prosopis alba</i> #	25,79
<i>Prosopis nigra</i> #	29,42

\*: Determinaciones propias

#: Comunicación personal Ing. Silvia Vélez, Escuela Carbonera Itinerante, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero (2018).

## FIGURAS



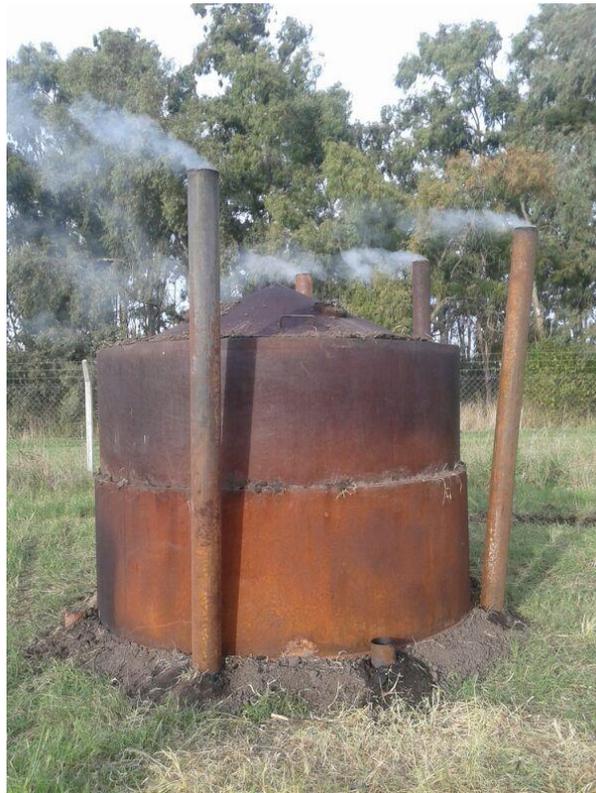
**Figura 1:** Ubicaciones de la Estación Experimental de la FCAyF-UNLP y del Parque Provincial Pereyra Iraola (Partidos de La Plata y Berazategui)



**Figura 2.** Diagrama de Horno metálico TPI



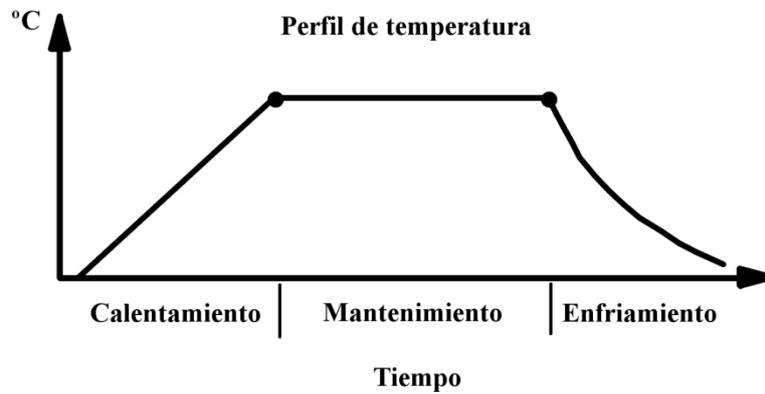
**Figura 3.** Horno TPI durante la fase de carga en la Estación Experimental.



**Figura 4.** Horno TPI en funcionamiento en la Estación Experimental



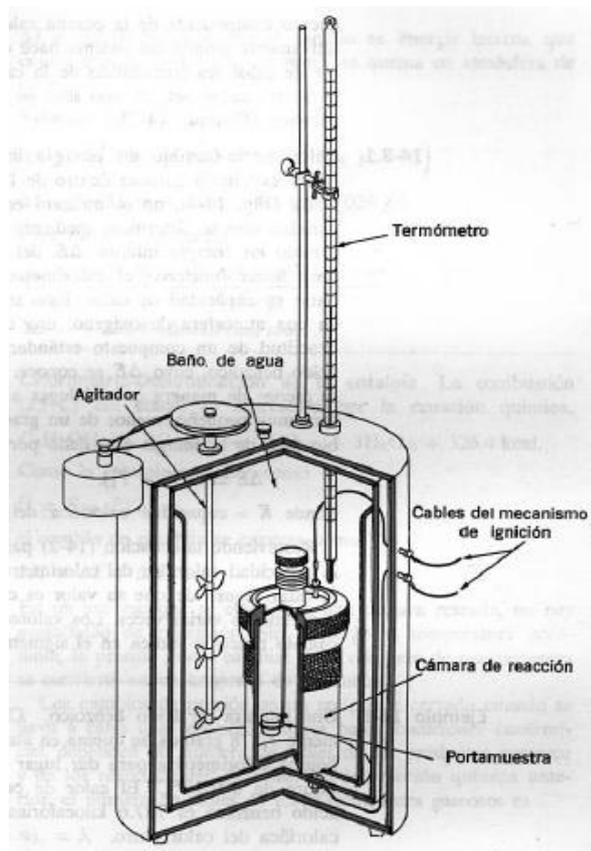
**Figura 5.** Mufla eléctrica



**Figura 6:** Esquema del perfil de temperatura aplicado para cada tratamiento.



**Figura 7.** Molienda en mortero y carbonilla obtenida.



**Figura 8:** Esquema de una bomba calorimétrica para determinar poder calorífico

**ANEXO FOTOGRAFICO**



Carga a campo y tara en balanza industrial de las trozas de Acacia negra



Descarga de la madera en la Estación Experimental de Los Hornos



Clasificación diamétrica de la madera antes de la carga



Acomodamiento y carga de la leña en el horno TPI



Sellado y puesta en funcionamiento del Horno TPI en la Estación Experimental



Carbón de acacia negra producido en Horno TPI



Determinaciones en Laboratorio: Mufla eléctrica y acondicionamiento del carbón



Carbones producidos en mufla y conversión en carbonilla mediante mortero.



Determinación de Cenizas



Gravimetría en balanza analítica