



POTENCIAL DE ESPECIES, CLONES PUROS E HÍBRIDOS DE EUCALIPTOS PARA ELABORACIÓN DE CARBÓN VEGETAL

Juan Marcelo GAUNA¹, Natalia RAFFAELI¹, María Laura TONELLO¹, Leonel HARRAND²;
Ciro A. MASTRANDREA², Matías S. MARTINEZ², Gustavo Pedro Javier OBERSCHELP², A.
José BAROTTO^{1,3}

RESUMEN

En un contexto de cambio climático y mayor demanda de energía, la biomasa se vuelve particularmente valiosa como fuente energética para el reemplazo de los combustibles fósiles por alternativas tales como la leña y el carbón vegetal. En particular, la madera del género *Eucalyptus* puede ser muy relevante en este proceso, siendo el noreste de Entre Ríos uno de sus mayores núcleos productivos. El objetivo del presente trabajo fue caracterizar diversas propiedades dendroenergéticas de la madera y el carbón de diferentes especies y clones puros e híbridos del género *Eucalyptus*. Con respecto a la madera, los materiales se ubicaron dentro del rango de maderas livianas y semipesadas, cuyas características analizadas presentaron órdenes de magnitud similares a los reportados por trabajos referentes a este género botánico. En cuanto al carbón, se encontraron resultados contrastantes en función de la variable considerada. Los valores de densidad aparente relativa, contenido de cenizas y poder calorífico encontraron correspondencia con aquellos rangos comúnmente reportados para este género, mientras que el contenido de volátiles resultó sensiblemente superior al referido por la bibliografía. Se remarca la necesidad de continuar con los análisis, empleando diferentes protocolos, a fin de corroborar los valores obtenidos, los cuales resultan de gran importancia para establecer el potencial dendroenergético para su uso doméstico e industrial.

Palabras Clave: *poder calorífico superior, rendimiento de carbonización, densidad de la madera, carbono fijo, volátiles*

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de cambio climático y aumento de la demanda energética, se ha incrementado la necesidad de reemplazar fuentes de energía fósiles por aquellas provenientes de recursos renovables, y es así que el interés por la madera y el carbón vegetal se ha ido acrecentando a nivel global, pues permite reducir la emisión de gases de efecto invernadero, entre otras ventajas (FAO, 2020).

Nuestro país presenta una gran disponibilidad de recursos biomásicos, relativamente distribuidos en el territorio nacional (en particular, leña y carbón vegetal), que podrían contribuir a la generación de energía de fuentes renovables, diversificando la matriz energética. Los usuarios de este tipo de combustibles son variados, desde grandes consumidores industriales para la producción de energía, hasta consumidores comerciales y residenciales, que los utilizan para cocinar o calefaccionar, siendo estos últimos los principales usos de la biomasa como fuente de energía en países en vías de desarrollo. A nivel nacional, la producción de leña y carbón vegetal se realiza mayoritariamente en base a madera proveniente de bosque nativo de la zona norte del país. Ambas producciones, generalmente, cuentan con poco o nulo control respecto a la homogeneidad, sustentabilidad y legalidad de origen de la materia prima. En el caso del carbón, se elabora primordialmente en hornos

¹ Cátedra de Industrias de Transformación Química, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. C.C. 31 (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

² INTA EEA Concordia. Estación Yuquerí, C.C. Nro. 34; (3200). Concordia, Entre Ríos, Argentina

³ Autor de correspondencia: +54 9 358 4234062; jose.barotto@agro.unlp.edu.ar



de ladrillo del tipo “media naranja”. De acuerdo con las últimas estimaciones, la producción anual a nivel nacional rondaría las 230 000 toneladas (FAO, 2020).

El rendimiento de la carbonización está principal y directamente influenciado por las propiedades químicas, físicas, mecánicas y anatómicas de la madera utilizada para su elaboración, y por las condiciones del proceso productivo, principalmente la temperatura, velocidad de calentamiento y tiempos de residencia, así como la atmósfera de reacción (Pereira et al., 2012).

Si consideramos la disponibilidad de madera, tanto para su uso directo como para la producción de carbón, es fundamental hablar del género *Eucalyptus* L'Hér, el cual constituye uno de los principales representantes dentro de la actividad forestal mundial. Actualmente, el cultivo de eucaliptos en Argentina ocupa un lugar de preponderancia; las estimaciones disponibles más recientes indican que hay aproximadamente 300.000 ha cultivadas con diferentes especies de este género, ubicadas principalmente en las provincias mesopotámicas que concentran casi el 90% de la superficie implantada (Gorzycki, 2019). Esta es, además, la región con mayor grado de industrialización y, dentro de ella, la zona noreste de Entre Ríos es considerada el mayor núcleo de eucaliptos del país.

Ante la necesidad de preservar los recursos provenientes de los bosques nativos o destinarlos a usos de mayor sustentabilidad, una posibilidad consiste en reemplazar la materia prima proveniente de los mismos por otra que presente características similares o superiores. Teniendo en cuenta esto, el objetivo de este trabajo fue caracterizar las propiedades dendroenergéticas de la madera y el carbón de diferentes materiales del género *Eucalyptus*, incluyendo diferentes especies, híbridos y clones.

El presente trabajo fue financiado con aportes de INTA a través de los proyectos: PL 385 “Aportes a la diversificación productiva y el agregado de valor en el Noreste de Entre Ríos”, PE I146 “Mejoramiento genético de especies forestales cultivadas y nativas de rápido crecimiento”, PE I148 “Procesos y tecnologías sostenibles para el agregado de valor en las cadenas y regiones” y PE I149 “Bioenergía en origen como estrategia para el desarrollo de la agroindustria y el desarrollo territorial sostenible”.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se desarrolló en base a dos lotes ubicados en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Concordia del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), ubicada en Estación Yuquerí en cercanías de la localidad de Concordia, Entre Ríos. Los suelos sobre los que se ubicaron estos ensayos corresponden a la serie Yuquerí Grande (ER2-46C) y el clima de la zona presenta una temperatura media cercana a los 19 °C. Las precipitaciones medias anuales rondan los 1350 mm, repartidas a lo largo del año.

Los dos lotes evaluados fueron instalados en 2014, con un distanciamiento de 3 metros entre líneas y entre plantas, y se encuentran distanciados entre ellos por poco más de 600 metros en línea recta. En total se evaluaron 13 materiales. Estos se componen por los clones híbridos GC INTA 8 (híbrido *E. grandis* x *E. camaldulensis*; abreviado GC8); GC INTA 9 (GC9); GC INTA 12 (GC12); GC INTA 24 (GC24); GC INTA 27 (GC27); GT INTA 31 (híbrido *E. grandis* x *E. tereticornis*; GT31); el clon puro EG INTA 36 (EG36) y las especies puras *E. grandis* (EG), *E. dunnii* (ED), *E. benthamii* (BE), *E. cloeziana* (CL), *E. camaldulensis* (EC) y *E. tereticornis* (ET).

El apeo de los árboles se realizó a la edad de 7 años, todos ellos con un DAP entre 10 y 20 cm. Se voltearon 4-5 árboles de cada material genético y de cada uno se extrajo una porción basal de 1,5 metros de longitud, de donde se cortaron cubos de aproximadamente 2 cm de lado, utilizados como probetas destinadas a las evaluaciones de laboratorio.

Los ensayos de aptitud dendroenergética se realizaron en la cátedra de Industrias de Transformación Química de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP, y en el Laboratorio de Calidad de Alimentos, Suelos y Agua de INTA Pergamino los de poder calorífico.

Determinaciones en madera

Densidad básica (g/cm³). Se calculó en 4 cubos de cada material. Se sumergieron los cubos en



agua durante un lapso de 3 días para lograr una completa saturación y luego se le determinó el volumen por inmersión. Posteriormente fueron llevados a estufa, a 105 °C, hasta peso constante.

Densidad básica (g/cm³) = peso seco / volumen verde

Proporción de cenizas (%). Se realizó colocando las probetas de madera en crisoles de porcelana en mufla eléctrica, determinando el contenido de cenizas según protocolo de trabajo (ascenso de temperatura a una rampa de 8 °C/min hasta alcanzar los 900 °C, permanencia a esa temperatura por 2 horas y descenso natural hasta alcanzar temperatura ambiente).

*Proporción de cenizas (%) = peso cenizas / peso madera * 100*

Poder calorífico superior de la madera (kcal/kg). Se utilizó una bomba calorimétrica y siguiendo la norma europea Fpr EN 14918 ("Solid biofuels - Determination of calorific value").

Rendimiento de carbonización (%). Las probetas de madera fueron sometidas a un proceso de pirólisis en laboratorio bajo condiciones controladas, utilizando una mufla eléctrica. Se trabajó con alícuotas entre 30 y 50 gramos, con dos repeticiones por cada material, colocadas en crisoles de porcelana con tapa. Se siguió un protocolo propio, derivado de la norma ASTM D1762 (ascenso de temperatura a una rampa de 1 °C/min hasta alcanzar los 500 °C, permanencia a esa temperatura por 4 horas y descenso natural hasta alcanzar temperatura ambiente).

*Rendimiento de carbonización (%) = peso carbón / peso madera * 100*

A fines comparativos, para el cálculo de proporción de cenizas y rendimiento de carbonización, se utilizó como base de comparación el peso seco de la madera (secada en estufa a 105 °C por 48/72 horas, hasta peso constante).

Determinaciones en carbón

Densidad aparente relativa (g/cm³). Se trabajó con el carbón en forma de cubos (tal como resultaron de la pirólisis de la madera en la mufla). Fue calculada en base a la norma brasilera NBR 9165/85. Para la cuantificación del volumen húmedo, se sumergieron los cubos de carbón en agua hasta lograr una completa saturación y luego se cuantificó por desplazamiento de fluidos. El peso seco es el obtenido luego de secar los carbones en estufa a 105 °C hasta peso constante.

Densidad aparente relativa (g/cm³) = peso seco / volumen húmedo

Humedad de equilibrio (%). Luego de un período de estabilización adecuado, se tomaron alícuotas de 2 gramos por cada material molido, se llevaron a estufa a 105 °C durante 72 horas y se pesaron.

*Humedad de equilibrio (%) = (peso húmedo - peso seco) / peso seco * 100*

Proporción de cenizas (%). Se tomaron alícuotas de aproximadamente 2 gramos de carbón molido, se colocaron en crisoles sin tapa y se llevaron a mufla, utilizando el mismo protocolo que en el caso de madera. Se realizaron 3 repeticiones por cada material.

*Proporción de cenizas (%) = peso cenizas / peso carbón * 100*

Proporción de volátiles (%). La determinación se realizó empleando mufla eléctrica y siguiendo un protocolo propio. Se trabajó con alícuotas de 1 gramo por muestra de carbón molido, con triplicados por cada material, y se emplearon crisoles de porcelana con tapa.

*Proporción de volátiles (%) = (peso con volátiles - peso sin volátiles) / peso con volátiles * 100*

Carbono fijo (%): Fue calculado con la siguiente fórmula en base a los datos obtenidos:

Carbono fijo (%) = 100 - (Cont. Humedad + Prop. volátiles + Prop. cenizas)

Poder calorífico superior del carbón (kcal/kg). Se llevó a cabo en el mismo laboratorio y siguiendo la misma norma que para madera.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Características físicas y dendroenergéticas de la madera

La **densidad básica de la madera** osciló entre 0,38 y 0,56 g/cm³, lo cual ubica a estos materiales dentro del rango de maderas livianas (0,35 - 0,50 g/cm³) y semipesadas (0,50 - 0,75 g/cm³). En este último grupo se ubicarían ET, CL, GT31 y EC, mientras que las maderas más livianas corresponderían a EG y EG36, los cuales se separaron estadísticamente del resto de los materiales, conformados por los híbridos GC, ED y BE (Figura 1). La densidad básica de la madera es uno de los principales criterios de selección para genotipos de *Eucalyptus* destinadas a la producción de carbón, ya que una mayor densidad resulta en un aumento en el rendimiento de carbonización para el mismo volumen de madera dentro del horno, además de afectar la calidad para diversos propósitos y facilitar su manejo (Pereira et al., 2012).

Respecto a la **proporción de cenizas de la madera**, ésta varió entre el 0,06 % (CL) y 0,6 % (ED), ubicándose en el rango habitual descrito por la literatura (Figura 1). Para el caso de los híbridos GC y GT y el clon EG36, estos son los primeros reportes de contenido de ceniza, los cuales coinciden con lo reportado habitualmente para *Eucalyptus* (proporciones bajas, menores al 1 %). Este es un aspecto muy favorable para su empleo en la producción de carbón, ya que reduce la carga mineral en el producto resultante (Simetti et al., 2018), así como su uso como dendrocombustible en la alimentación de equipos, tales como calderas. En este sentido, las cenizas reducen el poder calorífico de la biomasa, debido a que no intervienen en su combustión. Además, se pueden acumular en las superficies de los intercambiadores de calor, reduciendo la eficiencia en la transferencia de calor, y pueden causar corrosión de los elementos metálicos de los quemadores (Oliveira et al., 2021). Así, un bajo contenido de cenizas favorece y/o disminuye las labores de limpieza de equipos.

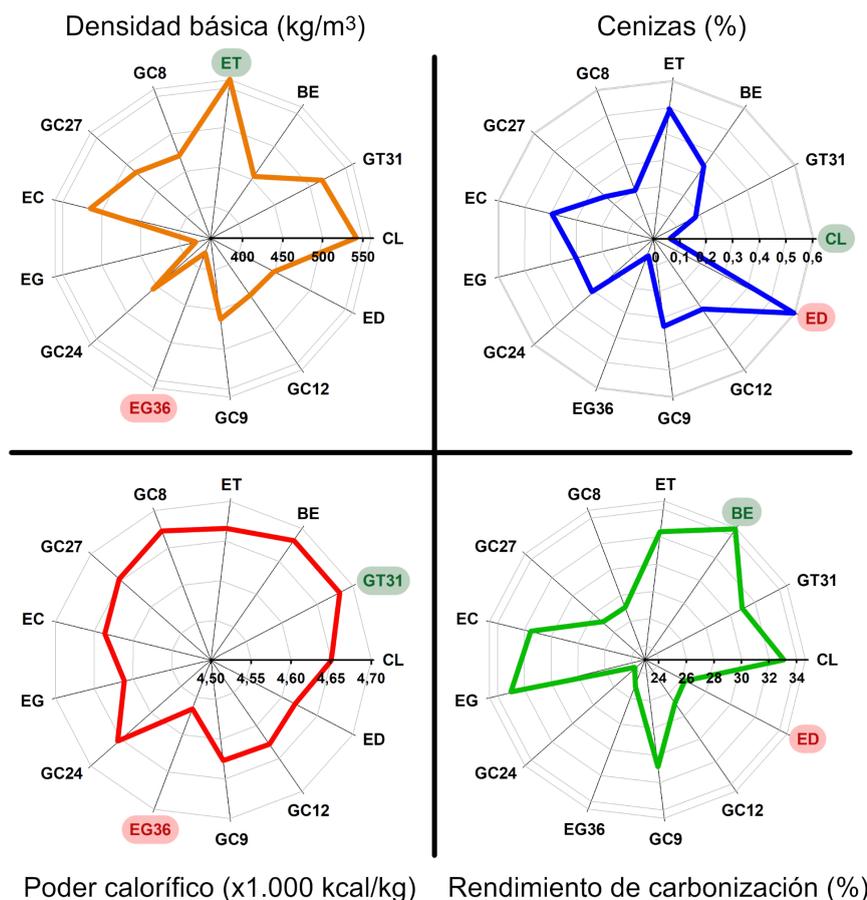


Figura 1. Resultados de las determinaciones llevadas a cabo en madera de 13 materiales del género *Eucalyptus*, incluyendo especies y clones puros e híbridos. La altura de la línea de color indica el valor para esa propiedad de acuerdo con la escala utilizada. Se señalan en color verde los resultados más favorables y en rojo las más desfavorables, de acuerdo con la característica evaluada.



En cuanto al **poder calorífico superior de la madera**, los resultados obtenidos variaron entre 4566 y 4682 kcal/kg, lo cual representa una variación del 2,54 % entre los materiales de mayor y menor poder calorífico superior (Figura 1). Entre los primeros, encontramos GT31, BE, GC8, ET y GC24, mientras que entre los segundos podemos mencionar EG36, EG, ED, GC9 y GC12. Estos valores de poder calorífico superior coinciden con la bibliografía consultada. El poder calorífico es una expresión de la cantidad de energía liberada en la combustión de un material, expresada por unidad de masa. La bibliografía referente al tema reporta poca variación de esta propiedad para la madera del género *Eucalyptus*, estando principalmente influenciada por la composición química de la madera, en particular el contenido de carbono, hidrógeno, lignina y extractivos, relacionados de manera positiva, y el contenido de oxígeno y cenizas, que la disminuyen (Pereira et al., 2012, 2013; Simetti et al., 2018).

El **rendimiento de carbonización**, es decir, la eficiencia del proceso de transformación de la madera en carbón, osciló entre 23,8 y 34,6 % (Figura 1). Los genotipos que presentaron mayor rendimiento fueron BE, CL, EG, ET y EC, mientras que aquellos ubicados en el extremo opuesto resultaron GC24, EG36, ED, GC12 y GC8. Particularmente para el caso de rendimiento, los trabajos analizados evalúan algunas de las especies aquí estudiadas o clones de las mismas, hallando resultados de similar magnitud. Nuevamente, para los híbridos GC y GT, así como para EG36, estos son los primeros datos de los que se tiene conocimiento. Un rendimiento alto del proceso de carbonización es deseable, ya que aumenta la eficiencia del proceso y la cantidad de producto final, pudiendo considerarse satisfactorios aquellos cercanos al 30%. Sin embargo, además de las características propias de la madera, otro factor fundamental para determinar el rendimiento son las condiciones del proceso que, a su vez, afectan otras propiedades del producto resultante, tales como el contenido de carbono fijo y el poder calorífico (Simetti et al., 2018, Marchesan et al., 2020). En base a esto, si bien los resultados encontrados permiten establecer una valoración relativa (ranking) de los genotipos ensayados, queda pendiente una investigación más detallada acerca del efecto de estas condiciones sobre los materiales testeados.

Características dendroenergéticas del carbón

En cuanto a las propiedades del carbón elaborado con los diferentes materiales, una de las características más importantes es la **densidad aparente relativa**, la cual está determinada por las condiciones de la pirólisis y por la densidad de la madera a partir de la cual se obtiene (Silva et al., 2018; Ramos et al., 2019). Una mayor densidad del carbón, generalmente, aumenta su resistencia mecánica y es una característica fundamental a ser tenida en cuenta cuando su destino es la producción siderúrgica (Ramos et al., 2019). Es por ello que resulta deseable que las densidades sean tan altas como sea posible ($> 0,25 - 0,30 \text{ g/cm}^3$; Andrade et al., 2018; Dufourny et al., 2019). Los resultados obtenidos en este trabajo se encuentran por encima de ese rango, con valores extremos de $0,280$ y $0,431 \text{ g/cm}^3$, con un efecto significativo de los materiales probados (Figura 2). Entre aquellos de mayor densidad se encuentran GC9, EC, ED, GC8, GC27 y ET, mientras que los materiales de menor densidad resultaron EG y EG36. Los valores encontrados coinciden, en gran medida, con aquellos reportados por la bibliografía para diferentes materiales de *Eucalyptus*. Los resultados obtenidos para los híbridos GC y GT31, así como para el clon EG36, son los primeros resultados reportados de los que se tiene conocimiento.

En cuanto a la **humedad de equilibrio**, esta se ubicó entre 7,3 y 10,5 % (Figura 2). Los materiales que presentaron un menor nivel de humedad fueron ET, CL, GC9, EC y GT31, todos ellos por debajo de 9,2 %. En el otro extremo, se ubicaron EG36, ED y EG, con un contenido de humedad superior al 10 %. Los valores hallados se encuentran dentro de los usualmente reportados por la bibliografía, que varían entre 2 y 10 %. De manera análoga a la madera (aunque en un nivel menor), el carbón vegetal es un material higroscópico cuya estructura porosa y gran superficie específica le permiten adsorber vapor de agua, variando su contenido de humedad según las condiciones de humedad relativa del ambiente (Costa, 2020). Esta característica puede verse influida, a su vez, por las características de la madera de origen y los parámetros del proceso de carbonización, como la temperatura final o la tasa de calentamiento (Siebeneichler et al., 2017, Costa, 2020).



Para uso doméstico, existen algunos estándares europeos que establecen límites de referencia para el contenido de humedad del carbón vegetal (7 % la norma belga NBN M11-001; 8 % la norma alemana DIN 51749), mientras que la norma N° 40 de la Secretaría de Agricultura y Abastecimiento de Brasil establece un contenido máximo del 5 %. En cuanto a los carbones elaborados en Argentina, algunos trabajos reportan valores aceptables entre 5 y 10 % de humedad (De Bedia, 2018). En el caso de la industria siderúrgica, el contenido de humedad es una de las características del carbón vegetal que interfieren directamente en el funcionamiento de los altos hornos, siendo deseable contenidos menores al 7%, si bien suele aceptarse hasta 10%, aunque en estos casos se aplican descuentos por calidad. Sobrepasar estos niveles puede afectar la eficiencia energética, resistencia mecánica, liberación excesiva de gases y retraso en la ignición del carbón (Costa, 2020). A este respecto, la mayoría de los materiales ensayados se encontrarían dentro del rango aceptable tanto para su uso doméstico como siderúrgico. Es necesario remarcar que estos valores fueron obtenidos a partir de muestras molidas, por lo que sería conveniente realizar nuevos ensayos sobre muestras de carbón con dimensiones similares a las utilizadas en esta industria para validar los resultados encontrados.

La **proporción de cenizas** de los materiales analizados osciló entre 0,3 y 2 %, con un efecto significativo de los diferentes genotipos sobre esta característica (Figura 2). La bibliografía consultada presenta un rango de variación similar al encontrado en este trabajo, con valores entre 0,17 y 1,9 %. Al igual que en la madera, las cenizas afectan negativamente el poder calorífico, además de repercutir en las tareas de mantenimiento y limpieza de hornos y calderas. Por otro lado, de acuerdo con Ramos et al. (2019), las cenizas de los materiales de *Eucalyptus* están compuestas principalmente por óxidos metálicos que, durante la producción de acero, son transferidos a la aleación metálica, contaminándola y afectando su composición química. Por lo tanto, los minerales que componen las cenizas pueden afectar las propiedades reductoras de estos materiales. En este sentido, varios autores mencionan que, en siderurgia, el contenido de cenizas del carbón debe ser lo más bajo posible, siendo deseable un contenido en torno o menor al 1%. Si tomamos esto como referencia los materiales CL, GT31, EG36, GC8, GC27 y EG serían aptos para este uso industrial, mientras que EG9 y EG24 (1,1 %) serían marginalmente aptos.

En cuanto a su uso doméstico, un buen carbón vegetal tiene, típicamente, un contenido de cenizas de alrededor del 3%, lo cual dependerá de la especie considerada, la cantidad de corteza incluida en la madera que generó el carbón y la cantidad de contaminación con tierra y arena (De Bedia, 2018). En nuestro continente, la norma N° 40 de la Secretaría de Agricultura y Abastecimiento de Brasil establece como valor de referencia aceptable para el uso doméstico un contenido de cenizas menor a 1,5 % (Marchesan et al., 2020). A excepción de ED, todos los materiales cumplen con dichos valores de referencia. Un dato interesante es que, si bien las cenizas son consideradas residuos, pueden tener aplicaciones industriales.

La **fracción de volátiles** consiste en la cantidad de materia volátil residual en el carbón y se compone principalmente de hidrógeno, hidrocarburos, CO y CO₂. Esta evidenció poca variación entre materiales, si bien presentó un alto valor absoluto (Figura 2). En este sentido, el material que menor contenido de volátiles evidenció fue GC9, mientras que aquel con mayor proporción de volátiles fue ED, los cuales se diferenciaron estadísticamente de los demás genotipos, que se mantuvieron en una situación intermedia. La proporción de volátiles evidenciada por los materiales evaluados, que presentó un rango de variación entre 41,2 y 55,3 %, resulta sensiblemente más elevada que la reportada por la bibliografía para carbón proveniente de *Eucalyptus*. Las diferencias observadas pueden deberse a diferencias metodológicas en el protocolo seguido para la determinación de esta propiedad. En este sentido, más allá de los valores absolutos hallados en este trabajo, resulta interesante el ordenamiento relativo de los diferentes materiales. Estos valores deberían compararse con los obtenidos mediante otro protocolo, a fin de poder establecer una relación entre ambos y confirmar (o descartar) el comportamiento relativo de estos genotipos.

El tenor de volátiles puede relacionarse, por un lado, con el contenido de celulosa de la madera de origen. Durante la pirólisis, parte del carbono de la madera se elimina con los volátiles, por lo que



estos y el nivel de carbono fijo varían de manera inversamente proporcional (Pereira et al., 2013). Por otro lado, la proporción de volátiles es afectada por los parámetros del proceso de carbonización, principalmente su duración y la temperatura alcanzada (Castro et al., 2016; Marchesan et al., 2020). Según Frederico (2009, citado por Santos et al., 2016), un alto contenido de volátiles aumenta significativamente la producción de humo, además de una menor eficiencia energética en la cocción. Una alta proporción de volátiles tampoco es deseable para fines siderúrgicos, ya que se pierden por evaporación y combustión con el oxígeno, siendo recomendables contenidos del 25 % o incluso menores (Pereira et al., 2013; Andrade et al., 2018). Además, al variar inversamente con el carbono fijo, imponen un compromiso a la eficiencia reductora del carbón. Sin embargo, cierta fracción de volátiles es deseable y necesaria en siderurgia, puesto que esta determina la estabilidad de la llama y la velocidad de combustión, promueve un aumento de la permeabilidad de la carga en el alto horno y una disminución de la reactividad del carbón vegetal (Santos et al., 2016).

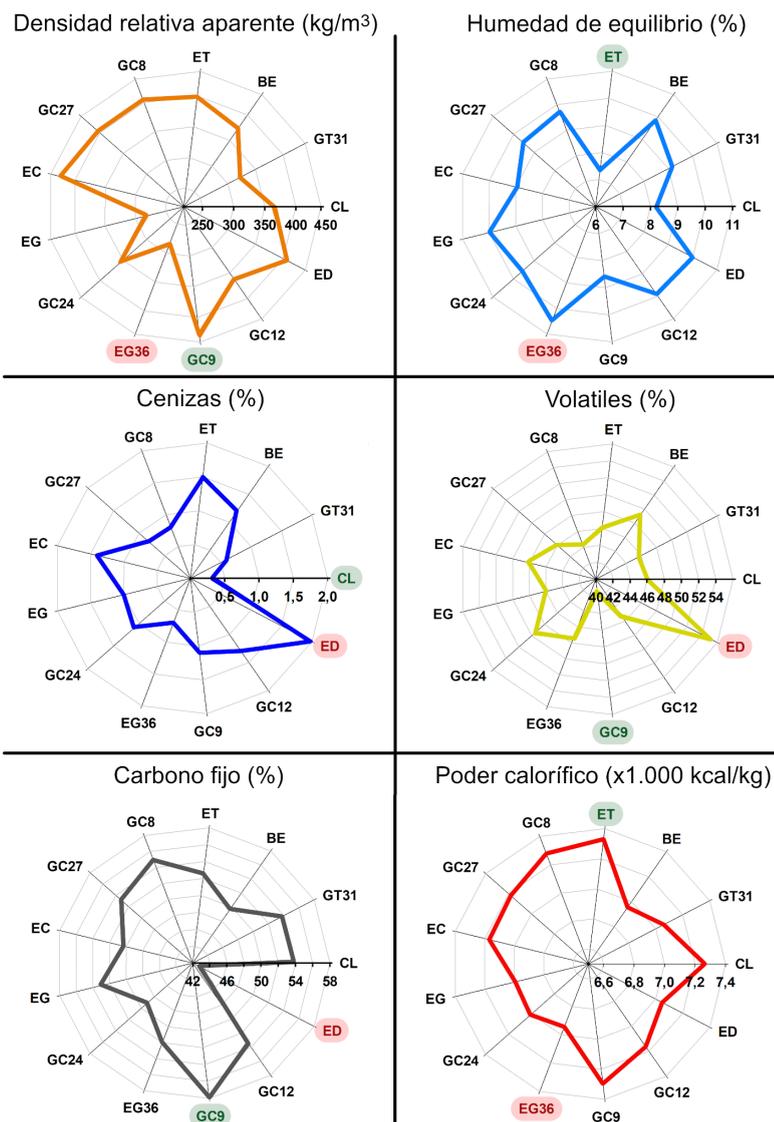


Figura 2. Resultados de las determinaciones llevadas a cabo en carbón de 13 materiales del género *Eucalyptus*, incluyendo especies y clones puros e híbridos. La altura de la línea de color indica el valor para esa propiedad de acuerdo con la escala utilizada. Se señalan en color verde los resultados más favorables y en rojo las más desfavorables, de acuerdo con la característica evaluada.

El **porcentaje de carbono fijo** presentó un rango de variación entre 42,7 y 57,8 %, cuyos extremos estuvieron representados por los mismos materiales que para volátiles (ED y GC9, respectivamente). Estos valores se encuentran por debajo de los reportados en la bibliografía de referencia para



diferentes materiales del género *Eucalyptus*. Este resultado es producto de la metodología de cálculo de carbono fijo, como diferencia entre el peso del carbón y los pesos de cenizas y volátiles, y como consecuencia de los altos niveles de volátiles medidos. Si bien es necesario, tal como se mencionó previamente, validar estos resultados, resultan indicativos del ordenamiento relativo de los diferentes materiales probados, con GC9, GC8, CL, GT31 y GC12 como aquellos genotipos que presentaron el mayor contenido de carbono fijo, mientras que ED, GC24, BE y EC fueron aquellos que se ubicaron en el extremo opuesto.

Al igual que las demás características analizadas, el contenido de carbono fijo dependerá de las características de la madera utilizada y las características del proceso de carbonización, principalmente su duración y temperatura final (Castro et al., 2016). Respecto a las características de la madera, en general, el carbono fijo se relaciona positivamente con el contenido de lignina, debido a la estabilidad térmica y alta proporción de carbono elemental de esta última (Pereira et al., 2013; Castro et al., 2016; Santos et al., 2016). Castro et al. (2016) mencionan un rango entre 70-80 % como apto. A mayor contenido de carbono fijo, mayor estabilidad térmica, lo cual hace que se quemara más lentamente, con mayor tiempo de residencia y menor volumen ocupado, siendo uno de los indicadores más importantes de la calidad del carbón vegetal como termorreductor en la industria siderúrgica. Para esta función, el carbón actúa como proveedor del carbono necesario para remover el oxígeno del mineral de hierro, por lo que mientras mayor sea su contenido, mayor será la contribución al aumento en la productividad de los altos hornos (Santos et al., 2016; Silva et al., 2018; Marchesan et al., 2020).

Respecto al **poder calorífico superior**, la bibliografía consultada sobre carbón de especies de *Eucalyptus* reporta rangos de variación relativamente amplios, entre 6800 y 8800 kcal/kg. En este sentido, los valores obtenidos en este trabajo se ubican dentro de la porción inferior de estos rangos, con valores extremos de 6945 y 7329 kcal/kg. Entre los materiales testeados, aquellos que presentaron mayores niveles para esta propiedad se pueden mencionar ET, GC9, GC8, CL y GC27, mientras que aquellos ubicados en el extremo opuesto resultaron EG36, BE, EG, GC24 y ED.

El poder calorífico del carbón es superior al de la madera que le dio origen, ya que en esta última la mayoría de los componentes que tienen enlaces poco estables son degradados durante la pirólisis, quedando aquellos que son más resistentes a la acción del calor (Pereira et al., 2013). Es así que, comúnmente, se muestra dependiente del contenido de lignina y extractivos, en forma positiva, y de cenizas, negativamente (Pereira et al., 2013; Santos et al., 2016; Silva et al., 2018). A su vez, existen antecedentes que relacionan esta propiedad con los parámetros del proceso de carbonización (Castro et al., 2016). Un mayor poder calorífico proporcionará, en el caso de su uso en siderurgia, un menor consumo de carbón (insumo reductor) para un mismo nivel de productividad (Santos et al., 2016). Respecto a esta industria, Andrade et al. (2018) establecen que son deseables poderes caloríficos superiores a 7500 kcal/kg.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se logró caracterizar las propiedades dendroenergéticas de la madera y el carbón de diferentes especies, clones puros e híbridos del género *Eucalyptus*. En algunos materiales, tales como GC, GT31 y EG36, parte de los datos que se presentan en este trabajo son los primeros que se reportan para dichos materiales, y se encuentran en etapa de revisión para su publicación en la "Revista de la Facultad de Agronomía", de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP.

Con respecto a la madera, fue posible establecer que los materiales testeados se ubicaron dentro del rango de maderas livianas y semipesadas, con un contenido de cenizas, rendimiento de carbonización y poder calorífico superior en órdenes de magnitud similares a los reportados por trabajos referentes a este género botánico. En cuanto al carbón, se encontraron resultados dispares dependiendo de la variable considerada. En este sentido, los valores de densidad aparente relativa, contenido de cenizas y poder calorífico encontraron correspondencia con aquellos rangos comúnmente reportados para este género, mientras que el contenido de volátiles resultó



sensiblemente superior al referido por la bibliografía, lo que, en última instancia, determinó rangos de variación de carbono fijo por debajo de los esperados.

Se destaca la necesidad de continuar con los análisis de estos materiales, empleando diferentes protocolos de carbonización y, especialmente, de determinación de volátiles, a fin de corroborar los valores obtenidos para estas características, las cuales resultan de gran importancia para establecer el potencial dendroenergético para su uso doméstico e industrial.

5. LITERATURA CITADA

- ANDRADE, F.W.C.; FILHO, M.T.; MOUTINHO, V.H.P. 2018. Influence of wood physical properties on charcoal from *Eucalyptus* spp. *Floresta e Ambiente*, 25(3): e20150176. DOI: 10.1590/2179-8087.017615
- CASTRO, A.F.N.M.; CASTRO, R.V.O.; CARNEIRO, A.C.O.; DOS SANTOS, R.C.; CARVALHO, A.M.M.L.; TRUGILHO, P.F.; DE MELO, I.C.N.A. 2016. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. *Revista Árvore*, 40 (3): 551-560. DOI: 10.1590/0100-67622016000300019
- COSTA, L.J. 2020. Relação água-carvão vegetal de eucalipto produzido em diferentes temperaturas. Tesis de doctorado. Universidade Federal De Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 107 pp.
- DE BEDIA, G. 2018. Carbón de Madera Santiagueño: sus usos y calidad. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - EEA Santiago del Estero. 5 pp.
- DUFOURNY, A.; VAN DE STEENE, L.; HUMBERT, G.; GUIBAL, D.; MARTIN, L.; BLIN, J. 2019. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 137: 1-13. DOI: 10.1016/j.jaap.2018.10.013
- FAO, 2020. Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina. Colección Documentos Técnicos N°19. Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/ca8764es>
- GORZYCKI, R. 2019. Informes de Cadenas de Valor: Forestal, papel y muebles. Marzo 2019. Año 4 – N° 14. Ministerio de Hacienda. Argentina. 38 pp. ISSN 2525-0221
- MARCHESAN, R.; DE OLIVEIRA, D.N.; DA SILVA, R.C.; DE CARVALHO, L.A.; GOMES, R.T.; ALMEIDA, V.C. 2020. Quality of charcoal from three species of the *Eucalyptus* and the *Corymbia citriodora* species planted in the south of Tocantins. *Floresta*, 50(3): 1643-1652. DOI: 10.5380/ufv.v50i3.65303
- OLIVEIRA, R.D.S.; Santos, L.T.V.; Melo, S.C.; Chagas, M.P.; Ribeiro, D.; Reis, C.A.F.; Novaes, E.; Sette Jr, C.R. 2021. Wood energy yield for *Eucalyptus* clones growing under seasonal drought-stress in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 154: 106264. DOI: 10.1016/j.biombioe.2021.106264
- PEREIRA, B.L.C.; Oliveira, A.C.; Carvalho, A.M.M.L.; Carneiro, A.D.C.O.; Santos, L.C.; Vital, B.R. 2012. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. *International Journal of Forestry Research*. 8 pp. DOI: 10.1155/2012/523025
- PEREIRA, B.L.C.; CARNEIRO, A.D.C.O.; CARVALHO, A.M.M.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, A.C.; FONTES, M.P.F. 2013. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. *BioResources*, 8(2): 4574-4592
- RAMOS, D.C.; CARNEIRO, A.D.C.O.; TANGSTAD, M.; SAADIEH, R.; PEREIRA, B.L.C. 2019. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for metallurgical use. *Floresta e Ambiente*, 26(2): e20180435. DOI: 10.1590/2179-8087.043518
- SANTOS, R.C.D.; CARNEIRO, A.D.C.O.; VITAL, B.R.; CASTRO, R.V.O.; VIDAURRE, G.B.; TRUGILHO, P.F.; CASTRO, A.F.N.M. 2016. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. *Ciencia Florestal* 26(2): 657-669. DOI: 10.5902/1980509822765
- SILVA, M.F.D.; FORTES, M.M.; SETTE, C.R. 2018. Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones. *Floresta e Ambiente*, 25(3): e20160350. DOI: 10.1590/2179-8087.035016
- SIMETTI, R.; BONDUELLE, G.M.; SILVA, D.A. 2018. Wood quality of five *Eucalyptus* species planted in Rio Grande do Sul, Brazil for charcoal production. *Journal of Tropical Forest Science* 30(2): 175-181. DOI: 10.26525/jtfs2018.30.2.175181