

# Evaluación de la calidad del carbón vegetal de curupaú (*Anadenanthera colubrina*), a partir de leños de diámetros menores

Josué Hermosilla y Eduardo Sandoval



# Evaluación de la calidad del carbón vegetal de curupaú (*Anadenanthera colubrina*), a partir de leños de diámetros menores

Enviado el 20/10/2022; aceptado el 17/11/2022

Josué Hermosilla<sup>1</sup> y Eduardo Sandoval<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno (UAGRM), Santa Cruz, Bolivia.

Correo: lino000jhl@gmail.com

<sup>2</sup> UAGRM, Santa Cruz, Bolivia. Correo: eduardosandoval@uagrm.edu.bo

## RESUMEN

En Bolivia, el carbón vegetal está orientado a la actividad industrial como la siderurgia y al consumo doméstico para la gastronomía. La especie preferida por el mercado para la elaboración de carbón es curupaú (*Andeanthera colubrina*), especie de rápido crecimiento en su etapa inicial, dado su alto poder calorífico, la cual podría ser manejada en plantaciones forestales; pero no se tiene información sobre cuál sería el diámetro mínimo apto para carbón. El objetivo de este estudio, fue evaluar si es posible elaborar carbón de calidad comercial a partir de leños de diámetros delgados. Para ello se aplicó un diseño aleatorizado, con cinco tratamientos (6-8, 8-10, 10-12, 12-14 y 14-16 cm) de diámetro de los leños. El material se extrajo del municipio de Porongo y la carbonización se hizo en un horno tipo medio naranja, en el municipio de El Torno. Los análisis físico químicos se realizaron en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Forestal de la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno, en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, bajo la Norma ASTM D 1762-84. Los resultados mostraron que

las propiedades químicas del carbón tienen diferencias estadísticamente significativas para los diferentes diámetros ensayados, y que la clase diamétrica de 14-16 cm alcanzó los mejores niveles de calidad en contenido de humedad, materia volátil, cenizas, carbono fijo y poder calorífico. Asimismo, el diámetro del leño utilizado, influyó en las propiedades químicas de manera directamente proporcional con el contenido de carbono fijo y el poder calorífico, mientras que, para el contenido de ceniza y materia volátil, el diámetro influyó inversamente proporcional. El contenido de humedad no reportó correlación alguna con el diámetro. La mejor calidad de carbón se alcanzó con la clase diamétrica "14-16 cm", ya que esta presentó un contenido de carbono fijo aceptable a diferencia de los leños de menor diámetro, que presentaron bajo contenido de carbono fijo y alto contenido de material volátil, aspecto no deseable por que genera humo y chispas en la combustión. De acuerdo a los umbrales de calidad del mercado internacional, solo el tratamiento "14 - 16 cm" alcanza los valores mínimos para la exportación.

**Palabras clave:** Carbón vegetal, curupaú, diámetros menores, horno, poder calorífico

# Quality assessment of curupau charcoal (*Anadenanthera colubrina*), from logs of smaller diameters

Submitted 20/10/2022; accepted 17/11/2022

Josué Hermosilla<sup>1</sup> y Eduardo Sandoval<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno (UAGRM), Santa Cruz, Bolivia.

Correo: lino000jhl@gmail.com

<sup>2</sup> UAGRM, Santa Cruz, Bolivia. Email: eduardosandoval@uagrm.edu.bo

## SUMMARY

In Bolivia, charcoal is oriented to industrial activity such as the steel industry and to domestic consumption for gastronomy. Curupaú (*Anadenanthera colubrina*), a fast-growing species in its initial stage, is preferred by consumers, given its high calorific value, and could be managed in forest plantations; but there is no information on what would be the minimum diameter suitable for charcoal processing. The objective of this study was to evaluate whether it is possible to produce commercial-grade charcoal from logs of thin diameters. For this, a randomized design was applied, with five treatments (6-8, 8-10, 10-12, 12-14 and 14-16 cm) of diameter of the logs. The woody material was extracted from the municipality of Porongo and the carbonization was done into an oven type half orange, in the municipality of El Torro. The physical-chemical analyzes were carried out into laboratories of the Forest Engineering Career at Gabriel René Moreno Autonomous University, in the city of Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, under ASTM D 1762-84. The results showed

that the chemical properties of charcoal had statistically significant differences among the diameters tested, and that the diametric class of 14-16 cm achieved the best levels of quality in terms of moisture content, volatile matter, ash, fixed carbon and calorific value. Likewise, the diameter of the wood used influenced the chemical properties in direct proportion to the carbon content and calorific value, while, for the ash and volatile matter content, the diameter influenced inversely proportional. Humidity reported no correlation with diameter. The best quality of curupaú charcoal was achieved with the logs of the diametric class "14-16 cm", since this class has an acceptable fixed carbon content unlike the logs of smaller diameter, which presented low fixed carbon content and high content of high volatile material, an undesirable aspect because it generates smoke and sparks in the combustion. According to the quality thresholds for export, only the "14 - 16 cm" treatment reaches the minimum required values.

**Keywords:** Calorific value, curupau, oven, Smaller diameters, vegetal charcoal

## INTRODUCCIÓN

El consumo de carbón en Bolivia está orientado a la actividad industrial como la siderurgia y, por otro lado, para el consumo doméstico como combustible en restaurantes y hogares, sobre todo en carnes a la parrilla. El material utilizado para su elaboración proviene mayormente de desmontes en predios destinados a la agropecuaria y en menor proporción de bosques bajo manejo forestal sostenible.

El carbón es un producto sólido y a la vez frágil con un elevado contenido de carbono. El proceso de elaboración es llamado pirólisis y se realiza bajo condiciones controladas en espacios cerrados para tener una combustión parcial de la leña a temperaturas entre 400 y 700°C. El control del aire es importante para evitar que la madera se consuma por completo y se convierta en cenizas como sucede durante el fuego normalmente (FAO 1983). El carbón conserva todas las materias combustibles capaz de volver a entrar en combustión nuevamente. La tecnología para la elaboración de carbón vegetal es muy variada, desde el horno parva, de tipo fosa, tipo colmena hasta los hornos metálicos. El tipo fosa es uno de los más antiguos, sin embargo, en la actualidad aún es utilizado (Argueta 2006). Ordaz (2003) indica que las características que definen la calidad del carbón vegetal, son los contenidos porcentuales de carbono fijo, material volátil, cenizas, contenido de humedad, rendimiento leña-carbón y poder calorífico.

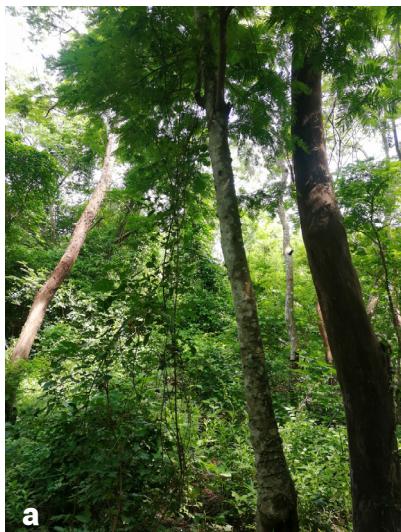
En general se usan especies duras para la elaboración del carbón, pero la especie preferida es el curupaú (*Anadenanthera colubrina*), la cual también es utilizada como madera para la construcción por su alta resistencia (Justiniano y Fredericksen 1998). La madera de curupaú para la elaboración del carbón proviene de desmontes para la agropecuaria y de planes de manejo forestal. El diámetro mínimo para aprovechamiento del curupaú en planes de manejo forestal es de 45 cm según la Norma Técnica RM Nº 248/98 (MDSP 1998), pero en desmonte no hay diámetro mínimo, por lo que cualquier diámetro es útil para este propósito.

Curupaú es una especie de rápido crecimiento en su etapa inicial y puede ser prometedor para el establecimiento de plantaciones forestales dendroenergéticas destinadas a la producción de leña y carbón, cuyo turno de aprovechamiento sea tan corto, que se pueda recuperar la inversión lo más antes posible. Sin embargo, no se tiene información sobre cuál sería el diámetro mínimo del tronco para que sea apto para carbón, en este sentido surge la interrogante si el grosor de los leños delgados influye en la calidad del carbón. En este estudio se pretende determinar cuál sería el diámetro mínimo de leños de curupaú para producir carbón de aceptable calidad de curupaú (*Anadenanthera colubrina*).

## MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se ha desarrollado en la Provincia Andrés Ibáñez, departamento de Santa Cruz, Bolivia. El material leñoso fue extraído de la zona del Urubó, en el municipio de Porongo, mientras que la carbonización se realizó en uno de los hornos del predio El Cañadón en el municipio de El Torno. La zona tiene un clima tropical, una altitud de 398 m s.n.m., temperatura media máxima y mínima de 34 y 14°C respectivamente, precipitación anual de 1539 mm y una humedad relativa del 64% (SENHAMI 2022). Los análisis físico químicos del carbón se realizaron en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Forestal, de la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno.



### Recolección de la muestra y diseño experimental

Curupaú (*Anadenanthera colubrina*), es un árbol que mide hasta 25 m de altura, con fuste recto y cilíndrico, corteza rugosa y con erupciones y agujones. Crecce hasta altitudes de 1600 m s.n.m., es una especie heliófita y en el bosque es una especie emergente (Lewis 1987). La muestra estuvo conformada por 150 leños extraídos de varios árboles de curupaú, seccionados a longitud de 20 cm, distribuidas en cinco clases diamétricas: 6-8, 8-10, 10-12, 12-14, 14-16, las cuales se constituyeron en los tratamientos (Fig. 2). Los leños se los dejó secar al aire libre, bajo sombra, por un periodo de 4 semanas. Se utilizó la norma ASTM D 1762-84 (ASTM 2001), con la cual se evaluó la calidad del carbón. Se utilizó el diseño experimental aleatorizado, donde los tratamientos fueron las clases diamétrica, con 15 unidades experimentales por cada tratamiento.

**Figura 2.** a) Árbol joven de curupáu, b) material extraído y c) leños de 6-8; 8-10; 10-12; 12-14; 14-16 cm

## Elaboración del carbón

El horno utilizado fue de fabricación artesanal construido con ladrillos y barro, muy tradicional en Bolivia para la elaboración de carbón vegetal, con forma de media naranja. Las tensiones térmicas al calentarse y enfriarse relativamente no lo afectan, también es suficientemente robusto para aguantar las tensiones mecánicas de carga y descarga. La vida útil del horno oscila entre los 5 y 8 años. En los costados tiene respiradores para controlar la entrada de aire durante la combustión, los cuales se sellan en la fase de enfriamiento. Se posicionaron los leños al horno sobre tirantes para evitar contacto con el suelo. Los primeros leños se apilaron en forma vertical y sobre estas se apilaron el resto en posición horizontal. La combustión duró siete días, durante cuatro días evacuó humo blanco (evaporación de agua) y al quinto día evació humo azul, indicando el comienzo de la carbonización. Al día siete el humo se puso transparente, casi como el aire caliente, de inmediato se sellaron las entradas de aire con barro, para dar inicio al purgado, luego se tapó la chimenea y se inició la etapa de enfriamiento. Para acelerar el enfriamiento, se agregó barro diluido con agua encima del horno durante 3 días, 3 veces/día (Fig. 3).

Se utilizó un diseño experimental aleatorizado, donde los tratamientos fueron las clases diamétrica, con 15 repeticiones por tratamiento.



**Fig. 3.** Horno tipo media naranja construido a base de ladrillo y barro.

## Toma de datos y análisis

Para la evaluación de calidad del carbón, se utilizó la Norma ASTM- D1762 – 84 (ASTM, 2001) (actualizado en 2007). Se tomó en cuenta cinco variables: humedad, material volátil, contenido de ceniza, carbono fijo y poder calorífico.

Una vez obtenido el carbón, se tomó una muestra correspondiente a cada clase diamétrica y a cada repetición, se lo molvió en un mortero y luego se cernió utilizando dos tamices N° 100 (150 micras) y N° 20 (850 micras), para evitar que con la molienda se obtengan partículas menores a 150 micras, para evitar errores, de ser arrastrado fuera del crisol.

**Contenido de humedad (Ch):** La humedad presente en el carbón vegetal puede ser definida como el porcentaje de

agua o de otros distintos líquidos que se encuentran en este (Aldana y Lauro 2002). El contenido de humedad se lo determina mediante la deshidratación de la muestra (carbón molido) a través de un cambio de la temperatura ambiente hasta 105°C. Las cápsulas se lavaron y se colocaron en el horno a 100°C por el lapso de 1 hora para su respectivo secado y esterilizado, luego se enfriaron en la campana desecadora por 30 minutos, luego se procedió a pesar cada cápsula. Posteriormente se metió en cada capsula (3 repeticiones) 5 g de cada muestra de carbón obtenida del horno, y se las secó en el horno a 105°C (3 a 4 horas) hasta alcanzar un peso constante (Ecuación 1, Cuadro 1).

**Contenido de material volátil (Mv):** La materia volátil en el carbón vegetal comprende todos los desperdicios líquidos y alquitranados que no fueron eliminados completamente en el proceso de pirólisis (Ordaz 2003). El contenido de material volátil se mide en porcentaje. Para ello, se procedió a secar los crisoles vacíos con sus tapas, en un horno a 100°C por 1 hora para quitarle la humedad ambiente, luego se los introdujo en la campana desecadora por el espacio de 30 minutos para que enfríen.

Posteriormente se pesó en cada crisol (3 repeticiones) 1 g de carbón molido y fueron sometidos a temperatura de 950°C por 6 minutos. Después se retiró los crisoles y se colocaron en una campana desecadora, dejándolos enfriar por una hora y luego se los pesó de nuevo (Ecuación 2, Cuadro 1).

### **Contenido de cenizas (Cc):**

Las cenizas pueden ser descritas como el desperdicio inorgánico del carbón vegetal, son sustancias minerales que están presentes en la madera antes del proceso de pirólisis. Este contenido puede oscilar entre 0,5 a más del 5% el cual está presente en el carbón y depende de la especie y de la cantidad de corteza, contaminantes, tierra y arena (Pacheco 2005). Para determinar el contenido de cenizas, las muestras de carbón molido se colocaron en crisoles dentro de la mufla a 750°C durante 6 horas, luego se los retiró y se los introdujo en la campana desecadora, dejando enfriar por una hora, hasta su incineración total, esto se comprobó observando el color blancuzco de las cenizas, luego se pesó cada crisol (Ecuación 3, Cuadro 1).

**Carbono fijo (Cf):** Se define al carbono fijo como el residuo carburante que queda luego que se liberan los materiales volátiles del carbón vegetal. Es decir que es la diferencia que hay entre 100% y la sumatoria del porcentaje de humedad, materia volátil y ceniza del carbón (Serrano 2009). De la cantidad de carbono dependerá en última instancia la calidad del carbón. Esta variable fue calculada en base a los valores de las anteriores variables (Ecuación 4, Cuadro 1).

**Determinación del poder calorífico (Pc):** El poder calorífico es la cantidad de calorías que se liberan por unidad de masa de un combustible cuando este está en combustión y se expresa en Kcal/k);

este poder que contiene el carbón vegetal es usualmente equivalente al carbono fijo (Guardado et al. 2010). La determinación del poder calorífico se realizó conocien-

do el porcentaje de contenido de humedad, cenizas, material volátil y carbón fijo. Para ello se adoptó la fórmula de GOUTAL (Ecuación 5 y Cuadro 1).

**Cuadro 1:** Fórmulas aplicadas para determinar el valor de las variables físico químicas

$$(1) Ch (\%) = \frac{Ph - Ps}{Ph} 100$$

$$(2) Mv (\%) = \frac{Ps - C}{Ps} 100$$

$$(3) Cc (\%) = \frac{R}{Ps} 100$$

$$(4) Cf (\%) = 100 - (Mv + Cc + Ch)$$

$$(5) Pc(kcal/kg) = 82(Cf + A(Mv))$$

Donde:

Ch = Contenido de humedad expresado en %

Ph = Peso de la muestra húmeda (g)

Ps = Peso de la muestra después de secar a 105°C (g)

C = Peso de la muestra después de secar a 950°C (g)

R = Residuos (g)

Mv = Materia volátil expresado en %

Cc = Contenido de ceniza expresado en %

Pc = Poder calorífico (Kcal/kg)

Cf = Carbono fijo expresado en %

$$A = \frac{Mv}{Mv + Cf}$$

## Análisis de datos

Los datos obtenidos en laboratorio, fueron analizados con el software estadístico InfoStat (IS/L), mediante un análisis de varianza y una comparación de medias de Tukey. También se realizó un análisis de correlación para ver la medida de asociación entre la calidad del carbón y el diámetro de los leños utilizados para la elaboración del mismo. Finalmente, los promedios resultantes de cada clase diamétrica y de cada variable fueron contrastados con los valores estándar que aceptan comercialmente los mercados de Estados Unidos, Europa y Japón.

## RESULTADOS

### Propiedades químicas del carbón

Los resultados obtenidos para las propiedades químicas como el contenido de humedad, material volátil, contenido de ceniza, carbono fijo y poder calorífico, en general muestran que los valores son relativamente proporcionales a los diámetros de los leños usados para elaborar el carbón.

Durante el proceso de carbonización, a menor diámetro del leño la carbonización es más uniforme y la perdida de agua es más rápida obteniéndose el carbón en

un tiempo más corto a diferencia de los diámetros más gruesos que contienen un contenido de humedad más elevado, lo que prolonga el tiempo de carbonización. Del mismo modo, el diámetro de los leños fue un factor importante a la hora del proceso de carbonización, se evidenció que a menor diámetro del leño es mayor la cantidad de material volátil y viceversa. El promedio de los porcentajes de ceniza, dieron a conocer que esta variable disminuye su valor a medida que aumenta el diámetro del leño, aunque en este caso el menor valor se encontró una clase diamétrica antes de la clase más gruesa "12-14 cm" con 2%. El contenido de cenizas indica la porción de madera que no pudo ser quemada después que el carbón fue totalmente incinerado, en esta lógica, el tratamiento que tenga menor cantidad de cenizas es mejor, ya que esto demuestra que la mayor parte de su masa es combustible con un mayor rendimiento.

En cambio, el contenido de carbono fijo aumenta de forma directamente proporcional al diámetro del leño, es decir que a mayor diámetro es mayor el porcentaje de carbono fijo. El carbono fijo es el compuesto más importante del carbón vegetal, y los resultados muestran que a mayor diámetro es mayor la cantidad de carbono fijo y por lo tanto un carbón de buena calidad es aquel que contiene una elevada cantidad de carbono fijo. Finalmente, el poder calorífico es directamente proporcional al diámetro del leño, evidenciándose que, a mayor diámetro, es mayor el poder calorífico del carbón.

En el Cuadro 2, se presentan los valores promedios obtenidos para cada tratamiento y para cada una de las variables evaluadas.

**Cuadro 2.** Valores promedios de las propiedades físico químicas del carbón en función a la clase diamétrica

Categorías de diámetro de leños (cm)	Contenido de humedad (%)	Materia volátil (%)	Contenido de ceniza (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico (Kcal/kg)
6-8	4,3	65	5	25	21,36
8-10	2,9	46	3	48	39,84
10-12	4,2	37	3	56	45,76
12-14	4,7	28	2	65	53,55
14-16	4,5	16	3	76	62,70

Como resultado del análisis de varianza, se han obtenido diferencias significativas ( $P<0,05$ ) entre el carbón de las diferentes clases diamétricas (leños) para todas las propiedades físico mecánicas, lo que implica que efectivamente hay

una influencia del diámetro del leño sobre la calidad del carbón. En el Cuadro 3, se presenta un resumen de las cinco variables y sus estadísticos resultantes del análisis de varianza.

**Cuadro 3.** Resultados del análisis de varianza de las propiedades físico químicas

Variable	SC	GL	CM	F	P valor
Contenido de humedad (%)	0,001	4	0,000	16,2	0,0001
Contenido de materia volátil (%)	0,42	4	0,1	437	0,0001
Contenido de ceniza (%)	0,001	4	0,0001	57	0,007
Carbono fijo (%)	0,44	4	0,11	297	0,001
Poder calorífico (Kcal/kg)	2916	4	129	352	0,0001

Siendo que hay diferencia significativa en todas las variables, corresponde evaluar la jerarquía de los diferentes tratamientos, para ver cuales resultan ser los de mayor valor y cuales los de menor valor. En función al análisis de la comparación de medias mediante la prueba de Tukey, se encontró que, para el caso del contenido de humedad, los dos tratamientos de diámetros mayores "12 - 14 cm" y "14 - 16 cm" obtuvieron los valores más altos, mientras que el tratamiento "8 - 10 cm" tuvo el menor contenido de humedad, siendo este el mejor tratamiento. Respecto al contenido de materia volátil, se tuvo el mejor valor con el diámetro más delgado, obteniendo valores menores todos los demás diámetros, pero estadísticamente diferentes. En cambio, el contenido de cenizas, tuvo similitud entre la primera y segunda clase diamétrica con los mayores

valores, y el resto obtuvieron valores menores, pero sin ser estadísticamente diferentes. Las variables carbono fijo y poder calorífico obtuvieron los valores más altos en el tratamiento con clase diamétrica mayor "14 - 16 cm" y las restantes clases obtuvieron la jerarquía relativa a medida que baja el diámetro y siendo todas estadísticamente diferentes (Cuadro 4).

### Variación de la calidad del carbón en función del diámetro del leño

Los resultados del análisis de regresión y correlación muestran claramente la dependencia de la calidad del carbón respecto al diámetro del leño utilizado para su fabricación.

En el caso del contenido de humedad, con excepción del tratamiento "8 - 10

**Cuadro 4.** Comparación de medias del contenido de las propiedades químicas (Tukey).

Categorías diámetros de leños (cm)	Contenido de humedad	Materia volátil	Contenido de ceniza	Carbono fijo	Poder calorífico
6-8	b	a	a	e	e
8-10	c	b	b	d	d
10-12	b	c	a b	c	c
12-14	a b	d	b	b	b
14-16	a	e	b	a	a

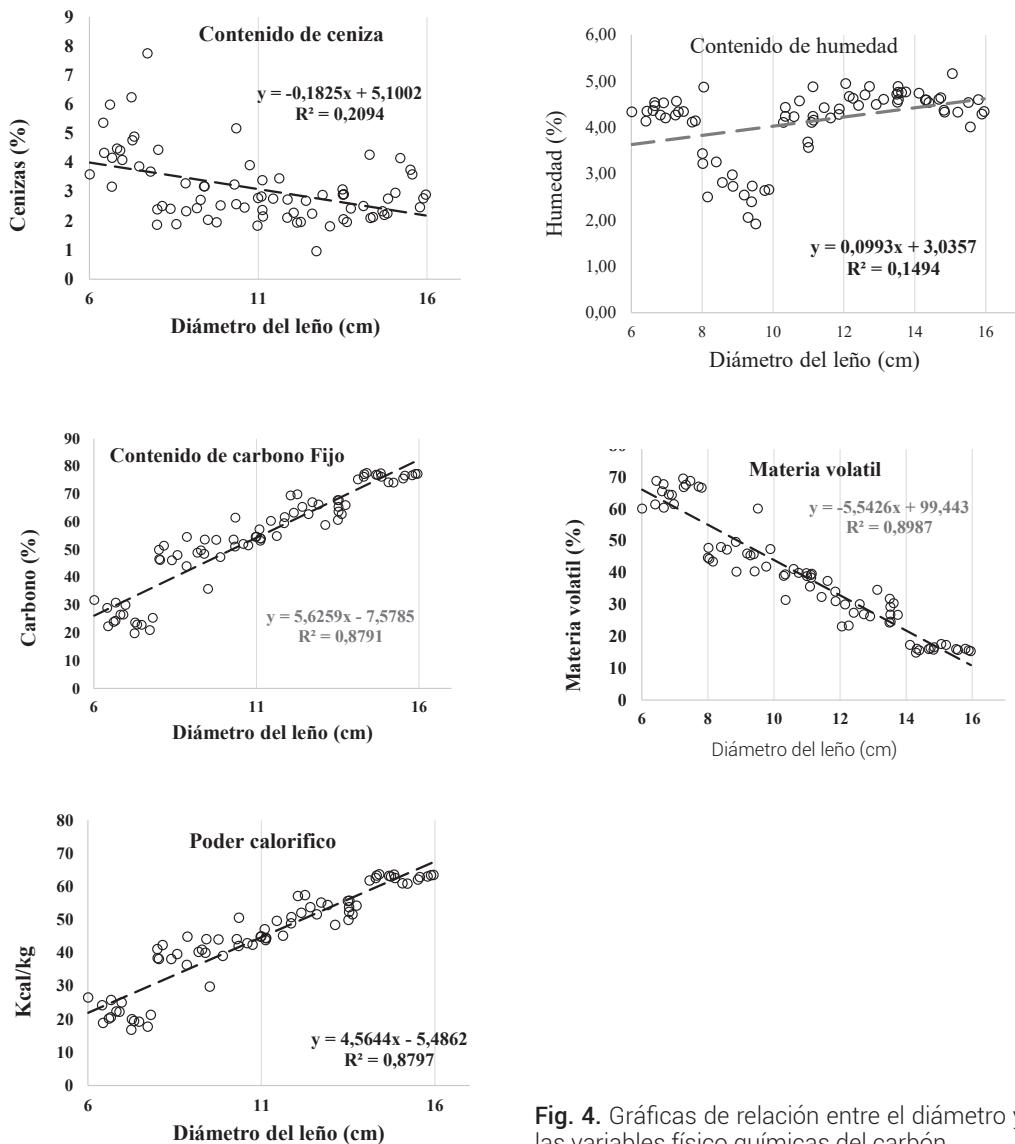
Las medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $P < 0,05$ )

cm", se presentó una correlación lineal con pendiente positiva pero muy baja ( $a = 0,09$ ) y el coeficiente  $R^2$  resultó también muy bajo, influenciado por lo inesperada desviación de los datos del tratamiento "8 - 10 cm", lo que estadísticamente lleva a concluir que no hay buena correlación entre el diámetro del leño y el contenido de humedad. De todos modos, observando la gráfica se puede ver que hay una ligera tendencia de aumentar el contenido de humedad a medida que aumenta el diámetro del leño (Fig. 4).

Con relación al contenido de material volátil, se encontró una buena correlación negativa ( $R^2 = 0,89$  y  $a = -5,5\%$ ) observándose que el porcentaje de material volátil que se liberan en la combustión del carbón, disminuye a medida que aumenta el diámetro. Esto implica que los leños de menor diámetro tienen más cantidad de material volátil, en desmedro de la calidad del carbón, a menor cantidad de materia

volátil es mejor la calidad del carbón. En cambio, en el contenido de cenizas, no se encontró correlación ( $R^2 = 0,2$ ), es decir la cantidad de ceniza del carbón, no depende del diámetro; los valores son iguales para todos los diámetros, aunque se observa una ligera tendencia a disminuir conforme crece el diámetro, pero a una tasa muy pequeña ( $a = -0,18\%$ ) (Fig. 4).

Las variables carbono fijo y poder calorífico, tienen la misma tendencia, ya que el cálculo matemático del poder calorífico depende del valor del carbono fijo. En ambos casos, se encontró alta correlación positiva ( $a = 5,62\%$  y  $4,56 \text{ kcal/kg}$  respectivamente,  $R^2 = 0,87$ ) con el diámetro del leño. Esto confirma entonces que, a mayor diámetro, mayor es el poder calorífico por la mayor cantidad de carbono retenido en el carbón, y por consiguiente mejor calidad del mismo para los usos finales de combustión (Fig. 4).



**Fig. 4.** Gráficas de relación entre el diámetro y las variables físicas químicas del carbón

## Comparación de la calidad del carbón de curupáu con los umbrales del mercado internacional

Respecto al consumo nacional del carbón, independientemente de la forma en la cual fue elaborado, los consumidores solo reparan en su calidad bajo características macroscópicas tales como: el peso del carbón, la humedad, dureza, que tenga brillo, que no despida humo, que dure suficiente tiempo y que tenga un tamaño aceptable. En cambio, en el mercado internacional, los estándares de calidad están definidos por normas nacionales y estándares internacionales.

Los valores promedios de las cuatro variables físico químicas del carbón, han sido

utilizados para enfrentar los umbrales mínimos y máximos exigidos en los mercados de Estados Unidos, Europa y Japón.

En el Cuadro 5, se presentan los umbrales permitidos de los parámetros de calidad en el mercado de Japón, Europa y Norte América.

Como se puede ver en el Cuadro 5, solo el carbón procedente de la clase diamétrica "14 - 16 cm" cumple con los parámetros mínimos (humedad, materia volátil y ceniza) y máximo (carbono fijo) para ser comercializado en los tres mercados internacionales. El carbón de las clases menores, cumplen solo en dos parámetros (humedad y cenizas) pero no cumplen en material volátil y carbono fijo.

**Cuadro 5:** Umbrales de calidad exigidos en el mercado internacional para el comercio del carbón

Propiedades químicas del carbón	Clase diamétrica del leño (cm)					Japón	Europa	EEUU
	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	Umbrales permitidos		
Contenido de humedad (%)	4,3	2,9	4,2	4,7	4,5	<7,5	7-8	<8
Contenido material volátil (%)	65	46	37	28	16	<12	10-12	<16
Contenido de cenizas (%)	5	3	3	2	3	<4	5-6	<6
Contenido de carbono fijo (%)	25	48	56	65	76	>76	75-82	>75

## DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio permitirán conocer hasta qué punto es recomendable producir carbón vegetal de buena calidad utilizando leños con diámetros menores, ya que esta información es escasa.

Los hallazgos en las variables físico químicas del carbón evaluado, permiten ver que la calidad del carbón mejora proporcionalmente al diámetro del leño que se utiliza para elaborarlo. Esta correlación positiva entre el diámetro del leño y la calidad del carbón resultante, podría deberse a que, a mayor diámetro, mayor es el área basal del duramen (madera dura) en comparación con el área basal de la albura (madera blanda).

Este estudio fortalece la tendencia al aprovechamiento integral del bosque, ya que aquellos gajos y fustes de diámetros menores que actualmente no se aprovechan, podrían ser en el futuro tomados en cuenta para elaboración de carbón, al menos en el caso de la especie de estudio (*Anadenanthera colubrina*). Por otro lado, también pueden establecerse plantaciones de curupáu con turnos cortos hasta que los tallos alcancen el diámetro apto para carbón, que, según esta evaluación, sería de 14 cm para arriba.

En concordancia a lo indicado por Sánchez (1997), el carbón que no supera los umbrales de calidad para el mercado internacional, bien puede servir para abastecer el mercado nacional, el cual sería

en definitiva el destino para el carbón de los diámetros menores (6 a 14 cm) a la clase diamétrica que sí conseguiría superar los umbrales del mercado internacional, donde los parámetros de aceptación son sobre características macroscópicas tales como: el peso del mismo, que no esté húmedo, que no se resquebraje fácilmente, que tenga brillo, que no despidga humo y que tenga un tamaño aceptable. Por lo tanto, para la exportación de este producto a los tres mercados continentales como ser el asiático, europeo y norte americano, se tiene que alcanzar parámetros mínimos de calidad. Las normas internacionales de los tres mercados no establecen al poder calorífico como un parámetro de calidad, solo se basan en cuatro: humedad, material volátil, carbono fijo y ceniza (Sánchez, 1997).

En este estudio se evidenció que el tratamiento "14 - 16 cm", el cual posee el diámetro más grande del experimento, cumplió con los estándares del mercado internacional de Norte América ya que contuvo la mayor cantidad de carbono fijo y la menor concentración de material volátil, a diferencia de los otros tratamientos de diámetros menores. Estos dos parámetros son indicativos de la calidad de carbón. Para Bravo (1995), los niveles bajos de contenido de material volátil en el carbón vegetal es indicador de mejor calidad. Por su parte Pérez y Compean (1989), comentan que el carbón vegetal con mucho material volátil se enciende fácilmente, pero, al quemarse, produce mucho humo el cual es molesto y no es

propio de un carbón de calidad.

A su vez García *et al.* (2019), encontraron en su investigación de caracterización energética del carbón vegetal de diez especies forestales, siguiendo la norma internacional ASTM D 1762-84, que el contenido de humedad es de 2,16 a 4,79 %, material volátil 15,07 a 37,19%, contenido de ceniza 1,49 a 6,97%, carbono fijo de 55,56 a 77,63% y un poder calorífico de 28,69 a 33,19 MJ kg<sup>-1</sup>. La especie que presentó los mejores valores energéticos fue *Brosimum alicatrum*, mientras que *Esemebeckya berlandieri* presentó los valores energéticos más bajos. En el presente estudio, aunque se trata de otra especie, se encontró resultados similares, ya que el contenido de humedad fue de 4,3 a 4,5 %, material volátil de 16 a 65%, contenido de cenizas de 3 a 5 %, carbono fijo de 25 a 76 % y un poder calorífico de 21,36 a 67,2 Kcal/Kg.

## CONCLUSIONES

Las propiedades químicas del carbón resultante de los leños de diámetro delgado de curupaú, presentó diferencias estadísticamente significativas para los diferentes diámetros ensayados, y al análisis de la comparación de medias, la clase diamétrica de 14-16 cm alcanzó los mejores niveles de calidad expresado en contenido porcentual de materia volátil, contenido de cenizas, contenido de carbono y poder calorífico frente a los umbrales de calidad exigidos para el comercio internacional. El diámetro del leño de curupaú, que se

usó para la elaboración del carbón, influyó en las propiedades químicas de manera directamente proporcional con el contenido de carbón y el poder calorífico, es decir a mayor diámetro mayor contenido de estos parámetros, mientras que, para el contenido de ceniza y materia volátil, el diámetro influyó inversamente proporcional, es decir que, a mayor diámetro, menor porcentaje de cenizas y de material volátil. La humedad no reportó correlación alguna con el diámetro.

La mejor calidad de carbón vegetal de curupaú se alcanzó con los leños de la clase diamétrica "14-16 cm", por presentar un contenido de carbono fijo aceptable a diferencia de los leños de menor diámetro, que presentaron bajo contenido de carbono fijo y alto contenido de material volátil alto, aspecto no deseable en un carbón, ya que genera humo y chispas a la hora de la combustión.

## LITERATURA CITADA

- Aldana, F. y Lauro A. 2002. Diccionario Ibalpe Enciclopédico. Ediciones Ibalpe, Mazatlán, Sinaloa, México. Pag. 1614.
- Argueta, C. 2006. Descripción y análisis de dos métodos de producción de carbón vegetal en el estado de Tamaulipas. Tesis para Ingeniero Agrónomo, Universidad Autónoma Chapingo. México
- ASTM. D. 1762-84. 2001. Standard method for chemical analysis of wood charcoal. Philadelphia, Pa. U.S.A. 2p.

- Bravo, L. 1995. III Seminario Nacional sobre utilización de encinos Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Mexico.
- FAO. 1983. Métodos Simples para fabricar carbón. Estudios Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO), Montes. Italia. Pag 41-154.
- García, J.D.; Pámanes, G.A.; Wehenkel, C.A.; Escobedo, M.A. Ruiz, F. y Carrillo, A. 2019. Caracterización energética del carbón vegetal de diez especies tropicales. Revista Mexicana de Agroecosistemas 6(1): 37 - 47.
- Guardado, M.; Rodríguez, A. y Monge, L. 2010. Evaluación de la calidad del carbón vegetal producido en hornos de retorta y hornos metálicos portátiles en el salvador. Universidad centroamericana "José Simeón cañas". El Salvador.
- Justiniano, M.J.; Fredericksen, T.S. 1998. Ecología y silvicultura de especies menos conocidas – curupau *Anadenanthera colubrina* (Vell.Conc.) Benth, Mimosoideae, BOLFOR. Santa Cruz, Bolivia.
- Lewis, G.P. 1987. Legumes of Bahia. Royal Botanical Garden.Kew. Pag.119-120.
- MDSPA. 1998. Normas técnicas para la elaboración de instrumentos de manejo forestal (inventarios, planes de manejo, planes operativos, mapas) en propiedades privadas o concesiones con superficies mayores a 200 hectáreas. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. La Paz, Bolivia.
- Ordaz, J. 2003. Análisis de la calidad del carbón vegetal de encino producido en horno tipo colmena brasileño en Huayacocotla, Veracruz. Tesis para Ingeniero Forestal Industrial, Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Pacheco, G. 2005. Evaluación del proceso de carbonización y calidad del carbón de acacia caven (mol.) mol. producido en hornos de barro, Tesis para Ingeniero Forestal, Universidad de Chile Facultad de Ciencias Forestales. Chile.
- Pérez, M. y Compean, G. 1989. Características físico-químicas y de producción en carbón de tres tipos de leñas de Durango. INIFAP-Durango. Memorias de la Primera Reunión Nacional Sobre Dendroenergía. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México
- Sánchez, R. L. 1997. Métodos de producción de carbón vegetal en México. Tesis de Doctorado. Pacific Western University. Los Ángeles California, E.E.UU. p. 115.
- SENAMHI. 2022. Servicio nacional de meteorología e hidrología. La Paz Bolivia. Disponible en: <https://senamhi.gob.bo/index.php/sysparametros>, accedido el 10 de noviembre de 2022.
- Serrano, A. L. 2009. Producción de carbón vegetal mediante carboneras en zonas rurales empobrecidas. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Madrid, España. 153 p.